

**LOS FLUJOS NETOS  
HIDROLÓGICOS Y QUÍMICOS  
ASOCIADOS**  
de un Bosque de Laurisilva en Tenerife



Realizada por: JESÚS R. ABOAL VIÑAS

1998

DEPARTAMENTO DE BIOLOGÍA VEGETAL  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA





D. DOMINGO MORALES MÉNDEZ, Profesor Titular de Biología del Departamento de Biología Vegetal de la Universidad de La Laguna;

Dña. M<sup>a</sup> SOLEDAD JIMÉNEZ PARRONDO, Profesora Titular de Fisiología Vegetal del Departamento de Biología Vegetal de la Universidad de La Laguna y

D. JOSÉ MANUEL HERNÁNDEZ MORENO, Catedrático de Edafología y Química Agrícola del Departamento de Edafología y Geología de la Universidad de La Laguna.

CERTIFICAN:

Que el Licenciado en Ciencias Biológicas D. Jesús Ramón Aboal Viñas, ha realizado bajo nuestra dirección en el Departamento de Biología Vegetal, (UDI de Fisiología Vegetal) de la Universidad de La Laguna, los trabajos de Investigación que han conducido a la elaboración de la presente memoria titulada: *“Los Flujos Netos Hidrológicos y Químicos Asociados de un Bosque de Laurisilva en Tenerife”*. Y considerando que representa trabajo de Tesis, autorizamos su presentación y defensa para optar al grado de Doctor en Ciencias Biológicas.

La Laguna, 29 de Abril de 1998

Fdo.:  
Dr. José Manuel Hernández  
Moreno  
Catedrático de Edafología y  
Química Agrícola

Fdo.:  
Dra. M<sup>a</sup> Soledad Jiménez  
Parrondo  
Profesora Titular de  
Fisiología Vegetal

Fdo.:  
Dr. Domingo Morales  
Méndez  
Profesor Titular de Biología



*A mis padres  
y a Esther*

## Agradecimientos

A mis directores, por la atención prestada, las ideas para el comienzo de la realización de la presente tesis, todo el tiempo dedicado sin reparar en el día de la semana, su apoyo logístico y por la ayuda en la elaboración de esta tesis. A mis compañeros de departamento, a Águeda por compartir conversaciones durante los ratos de asueto de muchas tardes, que hicieron más fácil el trabajo y a July por tener siempre una sonrisa, y una disposición hacia los demás.

A mis colaboradores en el campo: a Javier, por las conversaciones que hacían del tiempo de trabajo un tiempo de ocio, y a los amigos que he hecho en Canarias, que junto con la presente tesis es lo mejor que me llevo de aquí, y que me ayudaron en el trabajo de campo prestándome parte de sus fines de semana, sin tener otro compromiso conmigo que la amistad: Juanma, Tomás, Ino, Esther, Elena, Manolo, Jose Ramón, Tomasito, Paco y Pablo, y a mi hermano Jaime, que en vacaciones tuvo tiempo para rellenar estadillos en el campo. A quién me ayudó en el trabajo de laboratorio: a Maica, Sandra, Julia, Miguel Ángel y Antonio y en especial a Montse, que desinteresadamente me prestó su tiempo y atención, y que me enseñó a realizar los protocolos de análisis químico del presente trabajo, mostrando siempre un ánimo encomiable.

A los consejos de mi hermano Jacobo en su sabiduría forestal, a los siempre afortunados de José Ramón, por su apoyo y por la transferencia de parte de su preclara mente científica. A Vicky por el mejor curso de 3º ciclo, su talante a prestar ayuda y sus consejos; a José María por su constante apoyo y cariño mostrado. A la ayuda informática prestada por Ricardo que cambió algún nombre de archivo, y por cesión de equipo a Pedro, a Patricio a costa de abstenerse del *Civiltation* y a mis hermanos a costa de abstenerse del *FIFA-98*. A Pedro por las decenas de solicitudes de datos y a Loli por tener siempre una buena cara para mi y una rica piña de plátanos.

A la comuna Azcárate-Zerolo-Díaz de Losada, por su apoyo constante, por hacerme saber que siempre están ahí y que tengo un lugar donde siempre poder recalar en Canarias, por su apoyo en los momentos de *morriña* y *saudade*; y en concreto a Pilar por su constante cariño y Tomás que me indujo a realizar la presente tesis, me ayudó con mis dudas técnicas y el trabajo de campo durante las peores condiciones meteorológicas del periodo de medición.

A toda mi familia por aguantarme, y en especial a mis padres por darme ánimo en los malos momentos, frecuentes dado mi carácter, para seguir adelante con lo empezado, ponerme las pilas cuando lo necesitaba y no dejar que arrojase la toalla. Al resto de mis hermanos: a Jorge, y a José por los acertados consejos y ayuda en la preparación de la defensa. A Esther, a la que le ha tocado aguantarme sólo lo que ella sabe. A los espíritus arbóreos del bosque de Madre del Agua, por su compañía prestada durante tantas horas.

A todos los investigadores que atendieron mis solicitudes de bibliografía, la cual es el cuerpo de la presente tesis.

- A la Dirección General de Investigación Científica y Técnica, por su subvención del proyecto PB94-0580 "Ecofisiología de la laurisilva canaria".
- A la Viceconsejería de Medio Ambiente del Gobierno de Canarias por la instalación de la torre de investigación en la parcela de estudio.
- Al Exc. Ayuntamiento de Tacoronte por las facilidades prestadas y a la Asociación de Vecinos Madre del Agua (Agua García) por las continuas muestras de apoyo e interés en la investigación

## Tabla de Contenidos

<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>1.1. JUSTIFICACIÓN</b>	<b>1</b>
<b>1.2. MARCO TEÓRICO</b>	<b>2</b>
1.2.1. LOS FLUJOS HIDROLÓGICOS EN UN BOSQUE	2
1.2.1.1. LA ECUACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO	3
1.2.1.1.1. LAS ENTRADAS	3
1.2.1.1.2. EL CONTENIDO DE AGUA	4
1.2.1.1.3. LAS SALIDAS	4
1.2.2. LOS FLUJOS QUÍMICOS ASOCIADOS A LOS HIDROLÓGICOS	5
1.2.2.1. LA ECUACIÓN DEL BALANCE DE NUTRIENTES	5
1.2.2.1.1. LAS ENTRADAS	6
1.2.2.1.2. LA CIRCULACIÓN INTERNA	6
1.2.2.1.3. SALIDAS	7
<b>1.3. ANTECEDENTES</b>	<b>7</b>
<b>1.4. OBJETIVOS</b>	<b>7</b>
<b>1.5. BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>8</b>
<b>CAPÍTULO 2. EL LUGAR DE INVESTIGACIÓN</b>	<b>11</b>
<b>2.1. LA LAURISILVA</b>	<b>11</b>
<b>2.2. LA LAURISILVA DEL BOSQUE DE MADRE DEL AGUA EN AGUA GARCÍA. TENERIFE.</b>	<b>12</b>
<b>2.3. LA PARCELA DE INVESTIGACIÓN</b>	<b>13</b>
2.3.1. SITUACIÓN, ESTRUCTURA Y EDAFOLOGÍA.	13
2.3.2. CLIMA	14
2.3.3. CONDICIONES METEOROLÓGICAS DURANTE EL AÑO DE ESTUDIO	16
2.3.3.1. APARATOS DE MEDIDA	16
2.3.3.2. CONDICIONES METEOROLÓGICAS MEDIDAS EN LA PARCELA Y SU COMPARACIÓN CON LA ESTACIÓN DEL I.N.M.	17
<b>2.5. BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>18</b>
<b>CAPÍTULO 3. ESCURRIDO CORTICAL. CURSO ANUAL Y CAUSAS DE LA VARIACION ENTRE LAS ESPECIES</b>	<b>21</b>
<b>3.1. INTRODUCCION</b>	<b>21</b>
<b>3.2. MATERIAL Y METODOS</b>	<b>22</b>
3.2.1. ELECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS ÁRBOLES MUESTRA.	22
3.2.2. MEDIDA DEL ESCURRIDO CORTICAL	24
3.2.3. ANÁLISIS DEL ESCURRIDO CORTICAL	24
<b>3.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>25</b>
3.3.1. EL ESCURRIDO CORTICAL POR ÁRBOL MUESTRA.	25
3.3.1.1. EFECTO DE LOS PARÁMETROS DE LA CUBIERTA ARBÓREA SOBRE LA VARIACIÓN DE ESCURRIDO CORTICAL ENTRE LOS ÁRBOLES MUESTRA. MODELOS MÚLTIPLES LINEALES (VALORES ANUALES).	25
3.3.2. ESCURRIDO CORTICAL ANUAL A NIVEL DE PARCELA. CÁLCULO Y EVALUACIÓN DE LOS DIFERENTES MÉTODOS EMPLEADOS.	26

3.3.2.1. EXTRAPOLACIÓN CON BASE EN EL CÁLCULO DEL ESCURRIDO CORTICAL POR ÁREA DE LA PROYECCIÓN DE LA COPA (APC).	26
3.3.2.2. EXTRAPOLACIÓN CON BASE EN EL CÁLCULO DEL ESCURRIDO CORTICAL POR SECCIÓN NORMAL (Sn).	28
3.3.2.2.1. SIGUIENDO EL MÉTODO DE CROCKFORD Y RICHARDSON.	28
3.3.2.2.2. SIGUIENDO EL MÉTODO UTILIZADO POR LA ASOCIACIÓN ALEMANA PARA LAS CIENCIAS HIDROLÓGICAS Y LA AGRICULTURA (D.V.W.K.).	29
3.3.2.2.3. APLICANDO LAS REGRESIONES ANUALES ENTRE LA SECCIÓN NORMAL Y EL ESCURRIDO CORTICAL.	29
3.3.2.3. EXTRAPOLACIÓN CON BASE EN EL CÁLCULO DE LOS COEFICIENTES DE ESCURRIDO CORTICAL.	30
3.3.2.3. EVALUACIÓN DE LOS MÉTODOS UTILIZADOS Y COMPARACIÓN CON OTRAS CUBIERTAS.	31
3.3.3. EL ESCURRIDO CORTICAL Y LA CANTIDAD DE PRECIPITACIÓN SEMANAL.	33
3.3.3.1. CORRELACIONES SEMANALES	33
3.3.4. VARIACIÓN DEL ESCURRIDO CORTICAL ENTRE ESPECIES	34
3.3.4.1. BASADAS EN LA ESTANDARIZACIÓN DEL ÁREA DE PROYECCIÓN DE LA COPA.	35
3.3.4.2. BASADO EN LA ESTANDARIZACIÓN DE LA SECCIÓN NORMAL.	36
3.3.4.3. EFECTO DE LOS PARÁMETROS METEOROLÓGICOS SOBRE LAS RELACIONES DE ENCAUZAMIENTO.	39
3.3.5. DISTRIBUCIÓN DEL ESCURRIDO CORTICAL ALREDEDOR DEL TRONCO (ÁREA DE INFILTRACIÓN).	40
<b>3.4.. CONCLUSIONES.</b>	<b>40</b>
<b>3.5. BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>41</b>

#### **CAPÍTULO 4. PRECIPITACIÓN PENETRANTE. EL MÉTODO DE MEDIDA. 45**

<b>4.1. INTRODUCCION</b>	<b>45</b>
<b>4.2. MATERIAL Y METODOS</b>	<b>45</b>
4.2.1. EMBUDOS ( $\varnothing=170$ MM).	45
4.2.2. CANALETAS.	46
4.2.3. EMBUDOS ( $\varnothing=50$ MM).	47
4.2.4. MESAS ( $0,5$ M <sup>2</sup> ).	47
<b>4.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>48</b>
4.3.1. DIFERENCIAS ENTRE LAS CANALETAS Y LOS EMBUDOS GRADUADOS DE $\varnothing=50$ MM.	48
4.3.2. DIFERENCIAS ENTRE LAS CANALETAS Y LOS EMBUDOS DE $\varnothing=170$ MM.	50
4.3.3. DIFERENCIAS ENTRE LOS PERIODOS MEDIDOS. CORRELACIONES Y SU COMPARACIÓN CON LOS DATOS DEL ICONA Y EL PATRIMONIO FORESTAL.	52
4.3.4. EVALUACIÓN DE LOS MÉTODOS UTILIZADOS.	53
<b>4.4. CONCLUSIONES</b>	<b>54</b>
<b>4.5. BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>54</b>

#### **CAPÍTULO 5. PRECIPITACIÓN PENETRANTE. VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL. CANTIDADES. 57**

<b>5.1. INTRODUCCION</b>	<b>57</b>
<b>5.2. MATERIAL Y MÉTODOS</b>	<b>57</b>
<b>5.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>58</b>
5.3.1. VARIABILIDAD DE LA PRECIPITACIÓN PENETRANTE.	58
5.3.1.1. VARIABILIDAD ESPACIAL.	58
5.3.1.2. VARIABILIDAD TEMPORAL. EFECTO DE LOS PARÁMETROS METEOROLÓGICOS SOBRE LA PRECIPITACIÓN PENETRANTE.	66
5.3.2 CANTIDAD DE PRECIPITACIÓN PENETRANTE. COMPARACIÓN CON OTRAS CUBIERTAS.	68
5.3.3. APORTE DE LA PRECIPITACIÓN HORIZONTAL A LA PRECIPITACIÓN PENETRANTE.	70

<b>5.4. CONCLUSIONES.</b>	<b>71</b>
<b>5.5. BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>72</b>

## **CAPÍTULO 6. LA EVAPORACIÓN POR LA INTERCEPTACIÓN DE LA CUBIERTA.75**

<b>6.1. INTRODUCCION</b>	<b>75</b>
<b>6.2. MATERIAL Y METODOS</b>	<b>76</b>
6.2.1. MÉTODOS.	76
6.2.1.1. EL MODELO DE RUTTER.	76
6.2.1.2. EL MODELO ANALÍTICO DE GASH.	79
6.2.2. EL CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DE LA ESTRUCTURA DE LA CUBIERTA.	81
6.2.3.1. LA CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO DE LA CUBIERTA.	81
6.2.3.2. EL COEFICIENTE DE PRECIPITACIÓN PENETRANTE LIBRE.	83
6.2.3.3. LA RESISTENCIA AERODINÁMICA.	84
6.2.3.4. LOS PARÁMETROS DEL ESCURRIDO CORTICAL.	85
6.2.3.5. LA TASA DE DRENAJE.	85
6.2.3. MATERIAL E INSTRUMENTACIÓN.	86
<b>6.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>87</b>
6.3.1. LOS PARÁMETROS DE LA CUBIERTA.	87
6.3.1.1. LA CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO DE LA CUBIERTA	87
6.3.1.2. EL COEFICIENTE DE PRECIPITACIÓN PENETRANTE LIBRE	88
6.3.1.3. LA RESISTENCIA AERODINÁMICA	89
6.3.1.4. LOS PARÁMETROS DEL ESCURRIDO CORTICAL	89
6.3.1.5. LA TASA DE DRENAJE	90
6.3.2. LOS PARÁMETROS CLIMATOLÓGICOS.	90
6.3.3. LA EVAPORACIÓN POR INTERCEPTACIÓN.	90
6.3.4. ERROR Y SENSIBILIDAD DEL ANÁLISIS	97
6.3.4.1. ANÁLISIS DEL ERROR DE LA MEDIDA DE LAS PERDIDAS POR INTERCEPTACIÓN.	98
6.3.4.2. ANÁLISIS DEL ERROR (MODELO DE RUTTER). SENSIBILIDAD ANÁLISIS.	98
6.3.4.3. ANÁLISIS DEL ERROR (MODELO DE GASH). SENSIBILIDAD DEL ANÁLISIS.	100
<b>6.5. CONCLUSIONES.</b>	<b>100</b>
<b>6.6. BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>101</b>

## **CAPÍTULO 7. LA PRECIPITACIÓN COMPLETA** **107**

<b>7.1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>107</b>
<b>7.2 MATERIAL Y MÉTODOS</b>	<b>108</b>
7.2.1. INSTRUMENTOS DE CAMPO Y RECOGIDA DE MUESTRAS	108
7.2.2. ANÁLISIS QUÍMICO	108
7.2.3. ANÁLISIS DE LOS DATOS	109
<b>7.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>110</b>
7.3.1. LA COMPOSICION QUIMICA	110
7.3.1.1. LA CALIDAD DE PARAMETROS	112
7.3.1.2. EXCESO DE ELEMENTOS	113
7.3.1.2.1. CAUSAS DEL EXCESO DE ELEMENTOS	115
7.3.1.2.1.1. Calcio.	117
7.3.1.2.1.2. Potasio	117
7.3.1.2.1.3. Magnesio	118
7.3.1.2.1.4. Sulfatos	119
7.3.1.2.1.5. Nitratos	120
7.3.1.2.1.6. Fosfatos	120
7.3.1.2.2. FLUCTUACIONES TEMPORALES DEL pH Y DE LA CONCENTRACIÓN DE IONES. EL INCENDIO Y LA CALIMA.	120
7.3.2. LOS FLUJOS QUÍMICOS.	123
7.3.2.1. LOS FLUJOS IÓNICOS A LO LARGO DEL AÑO	125
<b>7.4. CONCLUSIONES</b>	<b>126</b>

<b>7.5. BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>126</b>
--------------------------	------------

## **CAPÍTULO 8. LOS FLUJOS DE NUTRIENTES BAJO CUBIERTA** **131**

<b>8.1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>131</b>
<b>8.2. MATERIAL Y MÉTODOS.</b>	<b>132</b>
8.2.1. INSTRUMENTOS DE CAMPO Y RECOGIDA DE MUESTRAS	132
8.2.2. ANÁLISIS QUÍMICO	132
8.2.3. ANÁLISIS DE LOS DATOS	132
<b>8.3. LOS FLUJOS DE LA PRECIPITACIÓN PENETANTE. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.</b>	<b>133</b>
8.3.1. COMPOSICIÓN QUÍMICA	133
8.3.1.1. PARÁMETROS DE CALIDAD	134
8.3.1.2. EL EXCESO DE ELEMENTOS	135
8.3.1.2.1. LAS FLUCTUACIONES TEMPORALES DE LAS CONCENTRACIONES IÓNICAS Y DEL pH. EL INCENDIO FORESTAL Y LAS INVASIONES DE AIRE DEL SAHARA.	136
8.3.2. LOS FLUJOS DE ELEMENTOS QUÍMICOS	138
8.3.2.1. CURSO DE LOS FLUJOS IÓNICOS	139
<b>8.4. LOS FLUJOS DEL ESCURRIDO CORTICAL. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>139</b>
8.4.1. COMPOSICIÓN QUÍMICA	139
8.4.1.1. PARÁMETROS DE CALIDAD	144
8.4.1.2. EXCESO DE ELEMENTOS	146
8.4.1.3. LAS FLUCTUACIONES TEMPORALES DE LAS CONCENTRACIONES IÓNICAS Y DEL pH. EL INCENDIO FORESTAL Y LAS INVASIONES DE AIRE DEL SAHARA.	148
8.4.2. LOS FLUJOS DE ELEMENTOS QUÍMICOS	151
<b>8.5. CONCLUSIONES.</b>	<b>152</b>
<b>8.6. BIBLIOGRAFÍA.</b>	<b>154</b>

## **CAPÍTULO 9. FLUJOS NETOS BAJO CUBIERTA. LA DEPOSICIÓN ATMOSFÉRICA Y EL LAVADO DE LA CUBIERTA DEL BOSQUE.** **157**

<b>9.1. INTRODUCCIÓN.</b>	<b>157</b>
<b>9.2. MATERIAL Y MÉTODOS.</b>	<b>159</b>
9.2.1. INSTRUMENTOS DE CAMPO Y RECOGIDA DE MUESTRAS	159
9.2.2. ANÁLISIS QUÍMICO	159
9.2.3. ANÁLISIS DE LOS DATOS	159
<b>9.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.</b>	<b>161</b>
9.3.1. FLUJOS NETOS BAJO CUBIERTA	161
9.3.2. BALANCES	166
9.3.3. REGRESIONES	168
9.3.3.1. SIMPLES	168
9.3.3.1.1. PERÍODO SECO ANTECEDENTE ( <i>ADP</i> )	168
9.3.3.1.2. CANTIDAD DE PRECIPITACIÓN ( <i>P</i> )	169
9.3.3.1.3. LA INTENSIDAD MEDIA DE LA LLUVIA ( <i>MRI</i> )	174
9.3.3.1.4. DURACIÓN DEL EVENTO ( <i>ED</i> )	174
9.3.3.1.5. LA EVAPORACIÓN POR INTERCEPTACIÓN DE LA CUBIERTA ( <i>I</i> )	174
9.3.3.2. MULTIPLE	174
<b>9.4. CONCLUSIONES.</b>	<b>175</b>
<b>9.5. BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>177</b>

## **CONCLUSIONES GENERALES** **183**

## GLOSARIO DE TÉRMINOS UTILIZADOS

<i>ADP</i>	Periodo antecedente seco.
<i>APC</i>	Área proyectada por la copa.
<i>As</i>	Área de infiltración del escurrido cortical
<i>b</i>	Constante de la ecuación de drenaje.
<i>BCF</i>	Flujo de nutrientes bajo cubierta
<i>BP</i>	Precipitación completa.
<i>BPF</i>	Flujo de la precipitación completa.
<i>C</i>	Agua sobre la cubierta.
<i>Cl</i>	Aportes de corrientes subsuperficiales.
<i>Cn</i>	Condensación de niebla.
<i>COD</i>	Carbono orgánico disuelto
<i>Cp</i>	Calor específico del aire seco a presión constante.
<i>Cs</i>	Aportes por corrientes superficiales.
<i>d</i>	Desplazamiento del plano cero.
<i>D</i>	Drenaje desde la cubierta (cantidad o tasa).
<i>Dp</i>	Drenaje debido a la precipitación.
<i>Dni</i>	Drenaje debido a la condensación de niebla.
<i>DD</i>	Deposición seca.
<i>DD<sub>1</sub></i>	Deposición seca capturada por un colector estándar de polietileno.
<i>DD<sub>2</sub></i>	Incremento de la deposición seca en la cubierta con respecto a la deposición del colector
<i>DE</i>	Duración semanal de la lluvia.
<i>Dn</i>	Diámetro normal.
<i>Dn<sub>i</sub></i>	Drenaje de niebla.
<i>Dp</i>	Drenaje de precipitación.
<i>Dr</i>	Perdidas por drenaje.
<i>Ds</i>	Tasa de drenaje cuando $C=S$
<i>E</i>	Tasa de evaporación.
<i>e<sub>a</sub>(T)</i>	Presión del vapor del agua a la temperatura del aire.
<i>e<sub>d</sub></i>	Presión del vapor del agua a la temperatura del punto de rocío (tensión de saturación).
<i>Ep</i>	Evaporación potencial (cantidad o tasa).
<i>EC</i>	Escurrido cortical.
<i>f</i>	Producto de $u \cdot r_a$ .
<i>F</i>	Aporte de la capa freática.
<i>Fl</i>	Lavado foliar de la cubierta.
<i>FR</i>	Relación de encauzamiento.
<i>g<sub>a</sub></i>	Conductancia aerodinámica al transporte de agua a través de las superficies de la cubierta
<i>h</i>	Altura total del árbol.
<i>hc</i>	Altura de la copa del árbol.
<i>h<sub>veg</sub></i>	Altura de la parcela.
<i>I</i>	Perdida por interceptación.
<i>IC</i>	Deposición interna o lixiviado de iones de la cubierta.
<i>k</i>	Constante de von Karman, 0,4.
<i>MRI</i>	Intensidad media semanal de la lluvia.

<i>N</i>	Duración de las horas de sol observadas.
<i>n</i>	Duración astronómica del día.
<i>NBCF</i>	Flujo neto de nutrientes bajo cubierta.
<i>p</i>	Coefficiente de precipitación penetrante libre.
<i>pt</i>	proporción de lluvia que se desvía como escurrido cortical.
<i>P</i>	Precipitación (cantidad o tasa).
<i>Pd</i>	Precipitación libre o directa.
<i>Pn</i>	Precipitación neta.
<i>Pp</i>	Precipitación penetrante(cantidad o tasa).
<i>r<sub>a</sub></i>	Resistencia aerodinámica al transporte de agua a través de las superficies de la cubierta.
<i>R</i>	Radiación incidente.
<i>R<sub>N</sub></i>	Radiación neta.
<i>Rb</i>	Radiación emitida de onda larga.
<i>S</i>	Capacidad de almacenamiento de la cubierta.
<i>Sn</i>	Sección normal.
<i>St</i>	capacidad de almacenamiento de agua de la cubierta.
<i>t</i>	Tiempo.
<i>T</i>	Temperatura del aire.
<i>Tr</i>	Transpiración.
<i>u</i>	Velocidad del viento.
<i>UP</i>	Captura de iones por la cubierta.
<i>VC</i>	Volumen de copa.
<i>VWM</i>	Media de la concentración ponderada por el volumen
<i>WD</i>	Deposición húmeda.
<i>z</i>	Altura a la que se midió, $e_d$ , $e_a(T)$ y $u$ .
<i>z<sub>0</sub></i>	Altura de la rugosidad.
<i>a</i>	Coefficiente de reflexión.
<i>b</i>	Angulo del tronco con la horizontal del suelo.
<i>D</i>	Pendiente de la curva de saturación de la presión de vapor.
<i>de</i>	Déficit de presión de vapor.
<i>g</i>	Constante psicrométrica.
<i>l</i>	Calor latente de vaporización del agua.
<i>r</i>	Densidad del aire.
<i>s</i>	Constante de Stefan Boltzmann.

## Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. JUSTIFICACIÓN

A pesar de la gran cantidad de estudios florísticos y fitosociológicos que existían sobre la laurisilva canaria (Sunding, 1972; Ceballos y Ortuño, 1976; Gonzalez-Henríquez *et al.*, 1986; Kunkel, 1987; Bramwell y Bramwell, 1990; Pérez de Paz, 1990; Santos, 1990; Rivas Martínez *et al.*, 1993; Suárez, 1994 y Wilpret y Martín, 1997), se habían realizado pocas investigaciones acerca de aspectos ecológicos hasta la década de los años 90 (Danserau, 1968; Kämmer, 1974; Höllwarth y Küll, 1979; Larcher, 1980; Lösch, 1980 y Höllermann, 1981); esta dinámica empieza a variar, a principios de esa década con la aparición de nuevas publicaciones (Fernandez-Palacios, *et al.* 1991, Larcher *et al.*, 1991, Morales *et al.*, 1991, Fernández-Palacios *et al.*, 1992, Fernández-Palacios y López, 1992, Morales *et al.*, 1992 a y b, Jiménez *et al.*, 1992, González Rodríguez *et al.*, 1993, Morales *et al.*, 1993 y Lösch, 1993), que desembocan finalmente, en cuanto a las investigaciones en materia de ecofisiología, en el establecimiento de un grupo de investigación sobre la laurisilva canaria, formado por diferentes grupos europeos y coordinados por los profesores titulares del Departamento de Biología Vegetal de la Universidad de La Laguna, Dr. Domingo Morales Méndez y la Dra. María Soledad Jiménez Parrondo.

En el contexto de la labor investigadora comenzada en 1993, tomando como punto de referencia prioritario una parcela de investigación establecida a tales efectos en el bosque de Agua García, se han desarrollado diferentes líneas de investigación, enfocadas todas ellas en el estudio ecofisiológico de la vegetación, que ya han dado su fruto en diferentes publicaciones, como se comprueba en la Tabla. 1-1.

Tabla.1-1 Publicaciones de la ecofisiología de la laurisilva desarrolladas principalmente en la parcela del bosque de Agua García.

<b>Materia</b>	<b>Publicación</b>
Estudio de las Relaciones Hídricas, Energéticas y Microclima.	Zohlen, A , González-Rodríguez, A.M., Jiménez, M.S., Lösch, R. & Morales, D. 1995. Transpiración y regulación estomática en árboles de laurisilva canaria medidos en primavera.- <i>Vieraea</i> , 24:91-104.
	Jiménez, M.S. Cermák, J, Kucera, J & Morales, D. 1996. Laurel forest in Tenerife, Canary Islands: the annual course of sap flow in <i>Laurus</i> trees and stand. <i>Journal of Hydrology</i> 183:307-321.
	Aschan, G. Jiménez, M.S. Morales, D. & Losch R. 1994. Aspectos microclimáticos de un bosque de laurisilva en Tenerife. <i>Vieraea</i> 23:125-141.
Estudios Estructurales	Aschan, G. Losch R. Jiménez, M.S. & Morales, D. 1997. Energiebilanz von Waldbeständen in nicht-idealem Gelände-Abschätzungen auf der Grundlage von standörtlicher Klimaerfassung und flankierenden Gaswechselfmessungen am Beispiel eines Lorbeerwaldbestandes auf Teneriffa. <i>EcoSys Suppl.-Bd.</i> 20:145-160.
	Morales, D. Jiménez, M.S. González-Rodríguez, A.M. & Cermák, J. 1996. Laurel forest in Tenerife, Canary Islands: I. The site, stand structure and stand leaf area distribution. <i>Trees</i> 11:34-40.
	Morales, D. Jiménez, M.S. González-Rodríguez, A.M. & Cermák, J. 1996. Laurel forest in Tenerife, Canary Islands: II. Leaf distribution patterns in individual trees. <i>Trees</i> 11:41-46.
Estudios de Nutrición	Morales, D. González-Rodríguez, A.M. Cermák J. & Jiménez M.S.. 1996. Laurel forest in Tenerife, Canary Islands The vertical profiles of leaf characteristics. <i>Phyton</i> 36:251-263.
	Köhl, K. Lösch, R. González-Rodríguez, A.M. Jiménez, M.S. & Morales, D. 1996. Foliar cation contents of laurel trees on the Canary Islands. <i>Flora</i> 191:303-311.
Estudios de Fotosíntesis y Pigmentos	Morales, D. González-Rodríguez, A.M. Tausz, M. Grill, D. & Jiménez, M.S. 1997. Oxygen stress and pigment composition in Canarian Laurel Forest Trees. <i>Phyton</i> , 37(3):181-186.
	González-Rodríguez, A.M. 1998. Caracterización fotosintética de árboles de la laurisilva canaria: <i>L.azorica</i> , <i>P.indica</i> y <i>M.faya</i> . Tesis Doctoral. No Publicada.

Sin embargo quedaban importantes lagunas referentes a las principales líneas de investigación escogidas, que se constituían como necesarias para el desarrollo del estudio global del ecosistema. Así en lo referente a los estudios de relaciones hídricas, el conocimiento de los procesos de evaporación por interceptación de la cubierta y de la posterior redistribución del agua a su paso por la misma se hacían indispensables, para junto con los estudios realizados de transpiración e intercambio gaseoso, establecer un acercamiento al ciclo hídrico del bosque de laurisilva. Así mismo y en estrecha relación a esta línea de investigación, al ser el agua un medio de transporte de nutrientes a través de su paso por la cubierta vegetal, el estudio de los nutrientes disueltos durante un curso anual en los diferentes compartimentos sobre el suelo del bosque, constituía un estudio indispensable para continuar en el proceso de conocimiento del ciclo de nutrientes en el interior de este ecosistema.

## **1.2. MARCO TEÓRICO**

### **1.2.1. LOS FLUJOS HIDROLÓGICOS EN UN BOSQUE**

En la naturaleza el agua está en movimiento perpetuo alternando sin cesar entre la fase vapor y la fase líquida, circulando por los océanos y los continentes. Esta circulación constituye el ciclo hidrológico.

En los ecosistemas forestales, la cobertura arbórea tiene una influencia considerable sobre este ciclo. En ella se intercepta y se evapora hacia la atmósfera una parte del agua de precipitación. El agua no interceptada se infiltra en el suelo o corre por la superficie del mismo. Una parte del agua de infiltración es retenida en el suelo y puede posteriormente llegar hasta la superficie por capilaridad y ser así evaporada. Otra parte es tomada por las raíces de las plantas, la cual es transportada hacia las hojas y transpirada a la atmósfera. Cuando la fracción de agua de lluvia infiltrada en el suelo sobrepasa la capacidad máxima del mismo, el agua percola hasta la capa acuífera, a la cual recarga, pudiendo acceder de nuevo desde allí a la vegetación.

El conocimiento de este proceso a escala regional pasa por el conocimiento del mismo a escala de parcela, por lo que en un territorio insular como el que nos ocupa, donde el agua es un bien escaso y precioso, en el que se están desarrollando infraestructuras millonarias para su optimización (depuradoras) y obtención de otras fuentes (desaladoras), la falta de conocimiento sobre algunas partes de éste ciclo entraña graves problemas. Además, la planificación hidrológica necesita mayor conocimiento que el existente en la actualidad, ya que no percola hacia el acuífero más que una porción del agua que llueve, siendo ésta dependiente de la cubierta. Todo cambio en la cubierta puede causar diferencias en la recogida de agua en cuencas, afectando a la hidrología local en términos de volúmenes y tiempos de escorrentía (Lloyd *et al.*, 1988), siendo de este modo su conocimiento un requisito para la predicción cuantitativa de los efectos de la deforestación (Gash *et al.* 1980). La importancia en escalas regionales y globales de la reducción de la evaporación (por deforestación) es patente al afectar a los patrones de precipitación regional y al clima global (Hutjes *et al.*, 1990). Esta cubierta, debido a diferentes tipos de políticas (conservacionistas o productivistas) se somete a cambios continuos sin que se suela sopesar la influencia de los mismos sobre el recurso agua. En Canarias y más concretamente en Tenerife existen actualmente iniciativas de recuperación de la extensión de los bosques de laurisilva sin que se conozca el efecto que esto pueda suponer para los recursos hídricos de la isla, por lo que este tema es de suma importancia y actualidad.

### 1.2.1.1. LA ECUACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO

Generalmente el estado del balance hídrico de un ecosistema (una parcela forestal), incluyéndose el suelo por donde penetran sus raíces, se expresa por la ecuación del balance de agua como una relación en la que todas las cantidades de agua se expresan en mm de agua (o litros por metro cuadrado de superficie del suelo) del modo siguiente:

$$\text{Entradas} = \text{Fluctuaciones del contenido} + \text{Salidas}$$

Cada uno de los términos de la relación anterior se puede descomponer en una serie de subcomponentes:

#### 1.2.1.1.1. LAS ENTRADAS

Las entradas agrupan todas las fuentes posibles de alimentación hídrica, como son las precipitaciones, las nieblas o neblinas y el rocío, y los aportes ascendentes a partir de la capa acuífera o laterales por flujo subsuperficial de los cauces de agua. No obstante desde el punto de vista de la vegetación no todas estas fuentes llegan al suelo, ya que sólo una parte de las mismas queda disponible para las plantas en el mantenimiento del balance hídrico, que se corresponde con el agua que alcanza y penetra el suelo.

Las precipitaciones ( $P$ ) representan la cantidad total de agua en cualquier estado (nieve o lluvia) que cae sobre la copa de los árboles y que posteriormente sufre una fuerte redistribución debida a la estructura de la cubierta arbórea. La cubierta vegetal intercepta una cierta cantidad, que posteriormente se evapora ( $I$ ) o drena hacia el suelo ( $Dp$ ). La fracción de lluvia que llega al suelo a través de la copa de los árboles se denomina precipitación neta ( $Pn$ ) y se compone de dos porciones diferentes: una parte, la precipitación penetrante ( $Pp^1$ ) que atraviesa la cubierta hacia el suelo y otra parte el escurrido cortical ( $EC^2$ ), el agua que escurre por la superficie de las ramas y troncos hasta llegar al suelo. La precipitación penetrante se divide a su vez en dos componentes que son la penetración directa o libre ( $Pd^3$ ), la parte que llega directamente al suelo sin encontrar obstáculos a lo largo de la travesía por la cubierta, y la parte que se intercepta por la cubierta y posteriormente drena desde la misma ( $Dp$ ). Así la precipitación neta ( $Pn$ ) que llega a la cubierta del suelo es igual a la suma de:

$$Pn = Pp + EC; \text{ siendo } Pp = Pd + Dp$$

Los otros aportes atmosféricos son la condensación de agua como el rocío o las gotas de niebla de pequeño diámetro 0,001-0,5 mm que tienen velocidades de caída por debajo de 0,3 m s<sup>-1</sup>, flotando en el aire y siendo transportadas por el viento horizontalmente, depositándose sobre las plantas del bosque o el suelo desnudo, denominadas usualmente precipitaciones de niebla. No obstante, ya que este concepto, así definido, genera una gran imprecisión en su medida real, Bauer (1963) lo define como las "precipitaciones adicionales, es decir, las que no se pueden medir con el pluviómetro normal", ya que al igual que la interceptación de la precipitación gran parte de estos aportes de agua pueden ser posteriormente evaporados. Por ello deberíamos diferenciar, de acuerdo con Kämmer (1974) entre condensación de niebla, como la deposición de agua en obstáculos bajo la influencia del viento ( $Cn$ ) (que correspondería a la definición usual de precipitación de niebla), de la precipitación de niebla, *sensu estricto*, como el producto medible de la condensación, ya que como señaló Bauer (1963) "de las gotitas de niebla caen al suelo por entre el ramaje de los árboles solo una parte, la otra humedece la masa vegetal y se evapora después", de este modo el producto medible sería parte del anteriormente nombrado drenaje ( $D$ ) pero en este caso sería drenaje de niebla ( $Dni$ ) y se variaría el concepto clásico de

<sup>1</sup> Correspondiente al término anglosajón *Throughfall*, ( $Pp$  o  $T$ ).

<sup>2</sup> Correspondiente al término anglosajón *Stemflow*.

<sup>3</sup> Correspondiente al término anglosajón *Free throughfall* ( $Pd$  o  $p$ ).

precipitación penetrante, ya que en algunos bosques del planeta, en los que es posible que se incluya esta precipitación de niebla, existirían otras fuentes de precipitación penetrante no basadas en la precipitación que incide sobre la cubierta, de modo que el drenaje estaría dividido en el drenaje de la precipitación ( $Dp$ ) y el drenaje de niebla ( $Dn$ ), que sólo se podrían diferenciar en el caso de que se detectase drenaje en ausencia de precipitación.

Se pueden igualmente añadir aportes secundarios ligados a las condiciones locales. Es el caso de la capa freática ( $F$ ) cuando el agua sube por capilaridad poniéndose en contacto, al menos temporalmente con las raíces. Está también el caso de transferencia por corrientes superficiales ( $Cs^4$ ) o subsuperficiales del suelo ( $Cl$ ). Así en ciertas situaciones topográficas favorables a las corrientes los ecosistemas pueden recibir el aumento de aportes de agua provenientes de las precipitaciones de otras zonas. Agrupando todos estos componentes, el primer miembro de la relación se convierte en:

$$Entradas = P + Cn + F + Cs + Cl$$

#### 1.2.1.1.2. EL CONTENIDO DE AGUA

Para largos periodos de tiempo, cuando la situación se promedia para años o décadas, las entradas ( $E$ ) se equiparan a las salidas ( $S$ ). Sin embargo durante cortos periodos de tiempo, la biomasa puede incrementarse (balance positivo de  $+DContenido$ ) o aminorarse (balance negativo  $-DContenido$ ), de forma que ocasionalmente se aporta más agua de la que se pierde, o a veces no hay suficiente aporte hídrico para el requerimiento de las plantas. En la bibliografía sobre hidrología las fluctuaciones de contenido sólo se refieren a las reservas del suelo mientras que desde un punto de vista de la ecología, se deben también incluir la reserva de agua de la fitomasa y del mantillo, ya que más de las tres cuartas partes de la biomasa de las partes verdes y la mitad de la madera, son agua (Larcher, 1995), que varía en ciclos anuales y diarios, y presenta un incremento total cuando la planta aumenta la biomasa.

#### 1.2.1.1.3. LAS SALIDAS

Las salidas agrupan todas las fuentes posibles de pérdidas hídricas, pudiéndose producir en las fases líquidas o de vapor.

Como ya se mencionó anteriormente, el agua de interceptación ( $I$ ) representa la fracción de las precipitaciones ( $P$ ) y condensaciones de niebla ( $Cn$ ) que después de un cierto tiempo vuelven desde la superficie de la vegetación hacia la atmósfera bajo forma de vapor, con la excepción de una pequeña cantidad que podría ser absorbida a nivel de los órganos vegetales aéreos, pero cuya puesta en evidencia es difícil como lo demuestra Rutter (1965) y de acuerdo con Schnock (1970) esta fracción puede ser considerada como despreciable. En regiones templadas, la evaporación del agua interceptada por la cubierta representa una importante parte de la evapotranspiración, y algunas veces la mayor parte (Calder, 1976; 1990; Viville *et al.*, 1993). Se puede evaluar directamente esta pérdida por interceptación, mediante la diferencia entre la lluvia incidente y la precipitación neta ( $Pn$ ) por medio de la relación:

$$I = P - Pn$$

Con relación a la evaporación de una fracción de las condensaciones de niebla, está sería prácticamente imposible de estimar y sólo podría medirse como evaporación de forma directa, sin que exista ninguna investigación al respecto hasta la actualidad.

---

<sup>4</sup> Correspondiente al término anglosajón de *Overlandflow*.

Otras salidas son el agua de escorrentía subsuperficial ( $Cl$ ) y superficial ( $Cs^5$ ), como sucede para las entradas, una parte del agua circulante en la superficie del suelo puede alejarse del ecosistema; el drenaje ( $Dr$ ), es decir la cantidad de agua infiltrada a los niveles situados por debajo de la zona de explotación por las raíces. Si esta fracción hídrica encuentra una capa impermeable, ella puede acumularse temporalmente y desplazarse lateralmente hasta las zonas de sumidero; la evaporación desde el suelo ( $E$ ) y la transpiración de los vegetales ( $Tr$ ). La ecuación de las pérdidas puede entonces escribirse:

$$Salidas = I + Cl + Cs + Dr + E + Tr$$

## 1.2.2. LOS FLUJOS QUÍMICOS ASOCIADOS A LOS HIDROLÓGICOS

Como ya se mencionó anteriormente el agua, en la naturaleza, está en movimiento perpetuo, circulando por los océanos y los continentes; durante esta circulación el agua se carga de elementos químicos, tanto de origen marino como terrestre, que se diluyen en la misma y siguen su ciclo.

En los ecosistemas forestales, la cubierta arbórea tiene una influencia considerable sobre el ciclo hidrológico. En la cubierta se producen procesos de toma y de transferencia de elementos al agua que discurre por ella, pudiendo ser este intercambio positivo o negativo y regido por complejos procesos fisiológicos y químicos. Finalmente, parte de los nutrientes disueltos en el agua llegarán al suelo, provenientes de la cubierta o de los aportes externos, tanto continentales como oceánicos, pudiendo este agua ser arrastrada sobre el suelo al exterior de la parcela o infiltrarse en el mismo, quedando parte de los nutrientes al alcance de la vegetación para reiniciar el ciclo en el interior del bosque, al ser tomados por las raíces de las plantas, transportados hacia las hojas y troncos donde de nuevo podrán ser lavados por el agua. Otra parte de los nutrientes disueltos en el agua percolarán hasta la capa acuífera, y abandonarán el ecosistema.

Esta circulación constituye el ciclo químico asociado al ciclo hidrológico, y para su determinación será necesario recoger muestras de la precipitación completa, del escurrido cortical, de la precipitación penetrante y de la escorrentía superficial en la parcela de estudio y realizar posteriormente su análisis químico.

### 1.2.2.1. LA ECUACIÓN DEL BALANCE DE NUTRIENTES

De modo análogo a la ecuación del balance hídrico de un ecosistema (una parcela forestal, incluyendo el suelo por donde penetran sus raíces) se puede expresar la ecuación del balance de nutrientes como una relación (en la que todas las cantidades de cada elemento químico se expresa usualmente en  $kg\ ha^{-1}$ ) para cada ion, del modo siguiente:

$$Entradas = Fluctuaciones\ del\ contenido + Salidas$$

No obstante la complejidad de la misma es mucho mayor que en el caso de los aportes de agua, ya que la gran mayoría de la masa de nutrientes de un ecosistema se halla en el sustrato del mismo, el suelo, siendo objeto de investigaciones que quedan fuera del alcance de la presente tesis; el resto de la mayoría de la masa se encontraría bien como biomasa o bien como necromasa. Como ya se mencionó en la justificación de esta tesis, ya han sido realizados trabajos sobre los contenidos catiónicos de la biomasa foliar (Köhl, 1996), por lo cual en el presente estudio existe el ánimo de seguir completando el balance de nutrientes, pero únicamente en lo relativo a los flujos químicos ligados a los flujos hidrológicos.

<sup>5</sup> Se corresponde igualmente al término anglosajón de *Overlandflow*.

Cada uno de los términos de la relación anterior se puede descomponer en una serie de subcomponentes, no obstante, a continuación sólo se hará una somera referencia a los que son objeto del presente estudio, siendo cada uno de los cuales tratado en detalle en su correspondiente capítulo:

#### 1.2.2.1.1. LAS ENTRADAS

Los aportes de la deposición atmosférica están determinados por la composición de la precipitación completa<sup>6</sup> (*BP*), es decir la lluvia (deposición húmeda<sup>7</sup> *WD*) más la deposición seca<sup>8</sup> recogida por un embudo o recipiente que está permanentemente abierto (*DD<sub>1</sub>*) (Veneklaas, 1990, Lovett, 1994). La recogida de precipitación completa es usada por la simplicidad y el bajo coste del método (Lovett, 1994).

$$BP = DD_1 + WD$$

Sin embargo, para obtener los aportes totales de la deposición seca a un ecosistema, a esta porción de deposición seca incluida en la deposición completa (*DD<sub>1</sub>*), habría que añadirle el efecto diferencial de la superficie boscosa en la captación de partículas atmosféricas, aerosoles y gases (*DD<sub>2</sub>*) respecto a los colectores estándar de deposición completa, ya que esta superficie boscosa es más eficiente en la captación que los colectores utilizados para la precipitación completa. Tal incremento de la deposición atmosférica (*DD<sub>2</sub>*) tiene un significativo efecto sobre los ecosistemas, infraestimado los aportes si sólo se tiene en cuenta la *DD<sub>1</sub>*.

$$DD = DD_1 + DD_2$$

Algunos de los elementos depositados sobre la cubierta boscosa desde la atmósfera tienen un origen natural, pero el gran incremento de sustancias contaminantes, sobre todo en las recientes décadas, ha significado un importante cambio en la química de la atmósfera (Mesanza y Casado, 1994). En algunos lugares, el efecto de los aportes atmosféricos de origen antrópico sobre los bosques, como la lluvia ácida y la deposición seca de contaminantes, ha sido tratado entre otros autores por Kloeti *et al.* (1989) y Neary y Gizyn (1994), pero la existencia de estos aportes antropogénicos sobre cubiertas vegetales no ha sido tratada para la isla de Tenerife.

#### 1.2.2.1.2. LA CIRCULACIÓN INTERNA

Bajo la cubierta del bosque, la precipitación puede recargar el suelo mediante las siguientes fracciones: escurrido cortical (*EC*) y precipitación penetrante (*Pp*). Así los flujos bajo la cubierta (*BCF*<sup>9</sup>) se pueden expresar a través de la siguiente ecuación:

$$BCF = Pp + EC$$

Las cubiertas forestales son una importante fuente de elementos minerales lavados de los tejidos de las plantas, exudados y productos de descomposición (Kozłowski y Pallardy 1997) denominados deposición interna (o lavado de iones *IC*) y las cubiertas vegetales tienen así mismo la capacidad de tomar esos elementos del agua (Ulrich, 1983, captura de iones de la precipitación *UP*). La relación entre estos parámetros se encuentra en la siguiente expresión (Ferm y Hultberg, 1995):

---

<sup>6</sup> Procedente del término anglosajón “*Bulk deposition*” o “*Bulk precipitation*”

<sup>7</sup> Procedente del término anglosajón “*Wet deposition*”

<sup>8</sup> Procedente del término anglosajón “*Dry deposition*”

<sup>9</sup> Procedente del término anglosajón “*Below Canopy Fluxes*”

$$BCF = Pp + EC = WD + DD + IC - UP$$

El término lavado foliar (*FL*) incluye el lavado de la deposición seca, ya que la mayoría de los iones están presentes del mismo modo dentro del árbol y en las partículas atmosféricas que pueden ser depositadas sobre las superficies de la hoja y lavadas posteriormente (Dewalle y Swistock, 1994). De este modo no es usado aquí este término en el sentido de Tukey (1970) como "la remoción de partes de la planta por soluciones externas", sino que sería empleado de esta forma:

$$FL = DD_2 + IC$$

Y finalmente que los flujos netos bajo cubierta, que en definitiva son el objeto de la presente tesis equivaldrían a:

$$NBCF = FL - UP$$

### 1.2.2.1.3. SALIDAS

Como salidas únicamente serán contabilizadas las debidas a la escorrentía superficial, ya que, fue la única salida para la que se estudió el flujo hidrológico. No obstante, en ausencia de retirada de biomasa, necromasa y suelo, las otras salidas posibles serían las ya mencionadas percolación al acuífero o las escorrentías subsuperficiales, que a objeto de este estudio no serán tenidas en cuenta por las dificultades técnicas que engendra su medición, además de acuerdo con Ferm y Hultberg (1995), los flujos de iones desde el ecosistema forestal están regidos por la escorrentía.

## 1.3. ANTECEDENTES

Los estudios sobre el balance hídrico de los bosques canarios, a pesar de su evidente importancia, han sido pocos y de escasa entidad; así hasta el momento sólo se han realizado los de Kämmer (1974), Michaeli (1973) y los experimentos del Patrimonio Forestal del Estado entre 1968-1973 e ICONA, cuyos resultados elaboró Santana (1986 y 1990). En estos trabajos sólo se han estudiado parcialmente algunas variables de las ecuaciones de dicho balance. Así mismo y a la luz de los conocimientos actuales, la metodología utilizada se puede considerar incompleta ya que los resultados obtenidos no han sido válidos para la definición y modelización de la ecuación del balance hídrico en ningún bosque del archipiélago canario.

Del mismo modo el ciclo de nutrientes aparejado a este ciclo hídrico es de vital importancia para el funcionamiento del bosque, y de momento no se ha realizado ningún acercamiento a este ciclo para ningún ecosistema en el ámbito insular canario.

## 1.4. OBJETIVOS

Para dar respuestas a las carencias expuestas en la justificación de la presente tesis doctoral, se propuso la consecución de una serie de objetivos, divididos en dos grandes apartados:

I.- Determinación del flujo hidrológico de un bosque de laurisilva:

- (a) Determinación del porcentaje de escurrido cortical, causas de su variación entre especies y su variación con diferentes tipos de eventos de lluvia.

- (b) Determinación del porcentaje de precipitación penetrante, y su variación con diferentes tipos de eventos de lluvia y de la metodología idónea para su medida.
- (c) Determinación del porcentaje de escorrentía superficial.
- (d) Determinación del porcentaje de evaporación por interceptación.
- (e) Determinación de la saturación de cubierta.
- (f) Determinación del porcentaje de precipitación directa que atraviesa la cubierta sin ser interceptada.
- (g) Cálculo de los parámetros del modelo de Rutter *et al.* (1971) y del modelo de Gash (1979), y posterior aplicación para comprobar su grado de ajuste de los mismos en el cálculo de la evaporación por interceptación (*I*) en el área de estudio.

II.- Análisis del flujo de elementos químicos ligado al flujo hidrológico para un bosque de Laurisilva.

- (h) Determinación de los aportes al bosque existentes en la precipitación incidente más la deposición seca y el origen de los mismos.
- (i) Estudio de las diferencias entre el flujo de nutrientes en los escurridos corticales de las diferentes especies, y posibles causas de variación.
- (j) Estudio del papel de la cubierta en la alteración de la composición química de los aportes de la precipitación completa.

## 1.5. BIBLIOGRAFÍA

- Bauer, E. 1963. Nuevo método para medir las precipitaciones horizontales (provinientes de las niebla). *Montes* 112:323-325.
- Bramwell, D. & Bramwell, Z. I. 1990. Flores Silvestres de las Islas canarias. I. Tenerife. 149 pp. Editorial Rueda. Madrid.
- Calder, I.R. 1976. The measurement of water losses from a forested area using a “natural” lysimeter, *J. Hydrol.* 30:311-325.
- Calder, I.R. 1990. *Evaporation of Uplands*, John Wiley & Sons, Chichester, England, 144pp.
- Ceballos, L & Ortuño, F. 1976. *Vegetación y flora forestal de las canarias Occidentales*. Cabildo Insular de Santa Cruz de Tenerife.
- Danserau, P. 1968. Macaronesian studies. II. Structure and functions of the laurel forest in the canaries. *Collect. Bot. (Barc.)*7:227-280.
- Dewalle, D.R. & Swistock, B.R.. 1994. Differences in Oxygen-18 content of throughfall and rainfall in hardwood and coniferous forest. *Hydrol. Process.* 8:75-82
- Ferm, M & Hultberg, H. 1995. Method to estimate atmospheric deposition of base cations in coniferus throughfall. *Water Air Soil Poll.* 85:2229-2234.
- Fernández-Palcios, J.M. García Esteban, J.J. López, R.J. & Luzardo, M.C. 1991. Aproximación a la estima de la biomasa y producción primaria neta aéreas en una estación de la Laurisilva tinerfeña. *Vieraea* 20:11-20.
- Fernández-Palcios, J.M. López, R.J. Luzardo, M.C. & García Esteban, J.J. 1992. Descripción ecológica y evaluación de la producción primaria de cuatro estaciones representativas de los ecosistemas más característicos de Tenerife (Islas Canarias). *Studia Oecologica* IX:105-124.
- Fernández-Palcios & J.M. López, R.J. 1992. Evaluación del mantillo en los ecosistemas tinerfeños más característicos. *Rev. Acad.Canar. Cienc.*IV(nº3 y 4):65-78.

- Gash, J.H.C. 1979. An analytical model of rainfall interception by forest. *Quart. J. R. Met. Soc.* 105:43-55.
- Gash, J.H.C., Wright, I.R. & Lloyd, C.R. 1980. Comparative estimates of interception loss from three coniferous forests in Great Britain, *J. Hydrol.* 48:89-105.
- González Henríquez, M.N., Rodrigo Pérez, J.D. & Suárez Rodríguez, C. 1986. Flora y Vegetación del archipiélago canario. Ed. Las Palmas de Gran Canaria. pp.335.
- González-Rodríguez, A.M. Morales, D. & Jiménez, M.S. 1993. Efecto de la temperatura en el aparato fotosintético y supervivencia de las hojas de *Laurus azorica* (Seub.) Franco. X Reunión Nacional de la SEFV, III Congreso Hispano-Luso de Fisiología Vegetal. Pamplona.
- Höllermann, P. 1981. Microenvironmental studies in Laurel forest of Canary islands. *Mountain Research and Development.* 1:193-207.
- Höllwarth, M. & Küll, U. 1979. Einige ökologische Untersuchungen auf Tenerife (Kanarischen Inseln). *Botanisches Jahrbuch Systematik* 100, 4:518-535.
- Hutjes, R.W. Wierda, A & Venn, A.W. 1990. Rainfall interception in the Tai forest, Ivory Coast: Application of two simulation Models to Humid Tropical System, *J. Hydrol.* 114(3-4):259-275.
- Jiménez, M.S. González-Rodríguez, A.M. & Morales D. 1992. Effect of desiccation on chlorophyll fluorescence in leaves of *Persea indica* (L.) Spreng. 8th Congress of FESPP, Antwerpen (Bélgica).
- Kämmer, F. 1974. Klima und vegetation auf Tenerife besonders in Hinblick auf Nebelniederschlag. *Scripta Geobotanica.* Vol. 7 Edit Erich Goltze KG. Göttingen.
- Kloeti, P. Keller, H.M. & Guecheva, M. 1989. Effects of canopy on throughfall precipitation chemistry. *Atmospheric Deposition (Proceedings of the Baltimore Symposium), IAHS Publ. N° 179:* 203-209.
- Köhl, K. Lösch, R. González-Rodríguez, A.M. Jiménez, M.S. & Morales, D. 1996. Foliar cation contents of laurel trees on the Canary Islands. *Flora* 191:303-311.
- Kozłowski, T.T. & Pallardy, S.G. 1997. *Physiology of woody plants.* 2º Ed. Academic Press. San Diego.
- Kunkel, G. 1987. *Die Kanarischen Inseln und ihre Pflanzenwelt.* 2. Aufl. Ulmer, Stuttgart.
- Larcher, W. 1980. La posizione delle piante sempreverdi mediterranea nella evoluzione della resistenza al freddo. *Atti dell'Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti* 138:103-111.
- Larcher, W. Wagner, J. Neuer, G. Méndez, M. Jiménez, M.S. & Morales, D. 1991. Thermal limits of photosynthetic function and variability of leaves of *Persea indica* and *Persea americana*. *Acta Oecologica*, 12:529-541.
- Larcher, W. 1995. Water economy in plant communities In Larcher W. (ed.) *Physiological Plant Ecology.* 3º Edition. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo.
- Lloyd, C.D. Gash, J.H.C. Shuttleworth, W.J. & Marques, F. 1988. The measurement and modelling of rainfall interception by amazonian rain forest. *Agr. Forest Meteorol.* 43:277-294.
- Lösch, R. 1980. Die Hitzeresistenz der pflanzen des kanarischen Lorbeerwaldes. *Flora* 170:456-465.
- Lösch, R. 1993. Water relations of Canarian laurel forest trees. In Borghetti, M., Grace, J. & Raschi, A. (eds.). *Water transport in plants under climatic stress.* Cambr. Univ. Press, Cambridge:243-246.
- Lovett, G.M. 1994. Atmospheric deposition of nutrients and pollutants in North America: An ecological perspective. *Ecol. Appl.* 4(4):629-650.
- Mesanza, J.M. & Casado H. 1994. Atmospheric deposition at *Pinus radiata* sites in the Spanish Basque country. *J. Environ. Sci. Health A29(4):*729-744.
- Michaeli, A. 1973. Fog condensation, dew and evaporation reduction in the Canary islands. MOP/UNESCO Project SPA-15. *Scientific Studies of the Water Resources of the Canary Islands.* 36pp.

- Morales, D. Jiménez, M.S. & Caballero, M. 1991. Morphological and Gas exchange Response of *Canarina canariensis* (L.) Vatke to sun and shade. *Photosynthetica* 25:481-487.
- Morales, D. Jiménez, M.S., Wagner, J. & Larcher, W. 1992a. Caracterización morfológica e histológica de las hojas de sol y de sombra de *Persea indica* (L.) Spreng. Y *Persea americana* Mill. *Vieraea* 21:61-76.
- Morales, D. Jiménez, M.S. Wagner, J. & Larcher, W. 1992b. Morphological and functional features on sun and shade leaves of two species of *Persea* genus. 8th Congress of FESPP, Antwerpen (Bélgica).
- Morales, D. González-Rodríguez, A.M. & Jiménez, M-S. 1993. Estudio de la fotosíntesis en condiciones naturales en tres árboles de laurisilva. X Reunión Nacional de la SEFV, III Congreso Hispano-Luso de Fisiología Vegetal. Pamplona.
- Neary, A.J. & Gizyn, W.I. 1994. Throughfall and stemflow chemistry under deciduous and coniferous forest canopies in south-central Ontario. *Can. J. For. Res.* 24: 1089-1100.
- Pérez de Paz, P.L. 1990. Parque Nacional de Garajonay, Patrimonio Mundial. Excmo. Cabildo Insular de la Gomera, ICONA. 360 pp.
- Rivas-Martínez, S. Wilpret, W. Del Arco, M. Rodríguez, O. Perrez de Paz, P.L. García Gallo, A. Acebes, J.R. Díaz, T.E. & Fernández Gonzalez, F. 1993. Las Comunidades Vegetales de la Isla de Tenerife (Islas Canarias). *Itinera Geobotánica*, 7, 169-374.
- Rutter, A.J. 1965. Studies on the water relations of *Pinus sylvestris* in plantation conditions. III. A comparaisón of soil water changes and stimat of total evaporation on four afforested and grass coverd site. *J appl. ecol.* 2:197-209.
- Rutter, A.J. Kershaw, K.A. Robins, P.C. & Morton, A.J. 1971. A predictive model of interception loss in forest. I. Derivation of the model from observation in a plantation of corsican pine. *Agr. Meteorol.* 9: 367-374.
- Santana, L. (1986), Estudio de la precipitación de niebla en Tenerife. ICONA. 97pp.
- Santana, L. (1990), La importancia hidrológica de las nieblas en las cumbres del Parque Nacional de Garajonay, en P.L. Pérez de Paz (Ed.) "Parque Nacional de Garajonay, Patrimonio Mundial". Excmo. Cabildo Insular de la Gomera, ICONA. pp. 66-71.
- Santos, A. 1990. Evergreen forest in Macaronesian region. Council of Europe, Strasburg, 79pp.
- Schnock, G. 1970. Le bilan d'eau et ses principales composantes dans une chanaie mélangée calcicole de haule Belgique, (Buis de Virelles Blaimont). Thèse, Univ. Libre de Bruxelles, 352 pp. (Belgique)
- Sunding,, P. 1972. A botanical bibliography of the canry Islands. Oslo. Mimeographed manuscript. 2nd edn. Botanical Garden. University of Oslo. Oslo.
- Suarez, C. 1994. Estudios de los relictos actuales de monteverde en Gran Canaria. Ediciones del Cabildo Insular de Gran Canaria 617 pp.
- Tukey,H.B. 1970. The leaching of substances from plants. *Annu. Rev. Plant Phys.* 21:305-329
- Ulrich, B. 1983. Interaction of forest canopies with atmospheric constituents: SO<sub>2</sub>, alkali and earth alkali cations and chloride. In *Effects of accumulation of air pollutants in forest ecosystems* Ulrich, B. Pankrath & J. Reidel, D. (Edits.), Dordrecht, The Netherlands. pp. 33-45.
- Veneklass, E.J. 1990. Nutrient fluxes in bulk precipitation and throughfall in two Montane Tropical rain forest. Colombia. *J. Ecol.* 78: 974-992.
- Viville, D. Biron, P. Granier, A. Dambrine, E. & Probst, A. 1993. Interception in a mountainous declining spruce stand in the Strenbach catchment (Voges, France). *J. Hydrol.* 144:273-282.
- Wilpret, W. & Martín, V.E. 1997. Laurel forest in the Canary Islands: Biodiversity, historical Use and Conservation. *Tropics* 6(4):371-381.

## Capítulo 2. EL LUGAR DE INVESTIGACIÓN

### 2.1. LA LAURISILVA

El lugar de investigación se halla en una parcela experimental en el Monte Madre del Agua de Agua García (Tacoronte), que es una formación boscosa de laurisilva. En razón a una ubicación general de este tipo de bioma que facilite, en las posteriores discusiones, crear analogías entre bosques afines se expone una reseña introductoria sobre la laurisilva.

Bajo multitud de nombres que se refieren a un grupo de bosques con afinidades florísticas y parecidas características ecológicas, se engloban bosques pertenecientes a distintas partes del planeta; cuya denominación ha variado desde el siglo anterior, tomando la denominación de laurisilva propuesta por Brockmann-Jerosch y Rübél (1912) aunque en una reciente revisión sobre la denominación de estos ecosistemas efectuada por Tawaga (1997) se elige el nombre de Bosques lucidófilos siempreverdes de robles y laureles para aglutinar a estas masas forestales.

Algunas de las características de esta vegetación de bosques lluviosos y templados ya fueron mencionadas por Schimper (1898) como bosques de árboles perennes higrofilos con hojas enteras, glabras, coriáceas, gruesas y de cutículas desarrolladas.

La composición florística suele estar dominada por árboles de las familias *Fagaceae* (predominan los géneros *Quercus*, *Castanopsis*, *Lithocarpus*, etc.), *Lauraceae* (predominan los géneros *Laurus*, *Persea*, *Ocotea*, *Nectandra*, etc.), *Theaceae* (predominan los géneros *Camelia*, etc.), y *Hamamelidaceae*. Se caracterizan estructuralmente por ser cubiertas multiestratificadas de alturas de 20 a 30 m, con un estrato herbáceo escasamente representado y gran cantidad de trepadoras, índices de área foliar (LAI) comprendidos entre 7 y 8 m<sup>2</sup>m<sup>-2</sup>, más de 1.500 árboles por hectárea con área basimétrica entre 16 a 39 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup> y diámetros normales de hasta 100 cm Gutiérrez (1998).

Estos bosques se distribuyen a lo largo de todo el planeta encontrándose entre las latitudes comprendidas entre los 9°S a los 40°34'N, en un amplio rango altitudinal de 0 a 3.000 m s.n.m. Con unas condiciones ambientales (Gutiérrez, 1998) dominadas por las temperaturas medias anuales comprendidas entre los 2,5 y 20°C, precipitaciones comprendidas entre los 1.000 a 2.500 mm repartidos a lo largo del año y humedades relativas mayores al 70% con nieblas continuas. Estos bosques están repartidos del siguiente modo de acuerdo con Tawaga (1997), ordenados por continentes:

- I. Asia: Himalaya (Nepal, Sikkim y Bután), Corea, Japón, China, Taiwan, India, Sri Lanka, Myanmar, Tailandia, Vietnam, Malaysia e Islas del sudeste asiático (Sumatra, Filipinas, Mindanao, Célebes, Borneo, Java, Indonesia, etc.).
- II. Oceanía: Nueva Guinea e islas asociadas, Nueva Zelanda, noreste de Australia.
- III. África: Macaronesia.
- IV. América: sureste de Norteamérica (golfo de Florida), Centroamérica (Méjico, Guatemala, Panama, etc) y Sudamérica (Guyana, Venezuela, Argentina, Bolivia, Chile, etc).

En la actualidad la laurisilva macaronésica está restringida a algunas zonas de las fachadas norte de los archipiélagos de Canarias, Madeira y a Azores (Ceballos y Ortuño, 1976 y Kunkel, 1987). La Macaronesia fue ocupada por ésta vegetación hace 20 millones de años (Ciferri,

1962; Santos, 1990), procedente de la región mediterránea, que en el Mioceno superior era un borde del mar de Thetys. Posteriormente tras el cierre del mar de Thethys mediante la conexión de África con Eurasia, la vegetación de esta zona mediterránea desapareció, debido a las bajas temperaturas y las condiciones xéricas imperantes de la última era glacial del terciario (Bramwell y Bramwell, 1990), permaneciendo únicamente restos en algunas regiones costeras del Mar Negro y el Mar Caspio. Pero en Macaronesia, en donde islas como Tenerife ya habían emergido hacía 6 millones de años (Anchoeta *et al.*, 1990), las temperaturas sólo descendieron entre 4 y 5°C (Gutiérrez, 1998), y las lluvias eran más abundantes y regulares (Font Tullot, 1988), este bosque se conservó con la estructura florística y fisionómica de los ya nombrados bosques terciarios del sur de Europa y el norte de África (Axelrod, 1975). Debido a que Laurasia ya fue en épocas remotas separada de América (en el Cretácico) no existen muchas relaciones entre la vegetación macaronésica y la americana (Tawaga, 1997), existiendo sin embargo afinidades florísticas entre esta laurisilva y las asiáticas (Gutiérrez, 1998).

La vegetación de la laurisilva macaronésica se encuentra compuesta por una exuberante combinación de árboles, arbustos, plantas trepadoras y herbáceas, helechos, musgos, líquenes y hongos. Los árboles reúnen unas veinte especies pertenecientes a diversas familias entre las que predominan las *Lauraceae* y las *Aquifoliaceae*, que en su mayoría son endemismos macaronésicos. No obstante la biodiversidad es baja comparada con otras laurisilvas como la misionera<sup>10</sup> o las asiáticas.

Actualmente la existencia de esta formación en la zona seca del hemisferio norte, al igual que el resto de laurisilvas del mundo, se produce gracias a un clima que se caracteriza por la poca oscilación de temperaturas, consecuencia de la oceanidad, y alta humedad a lo largo del año (Gonzalez-Henríquez *et al.*, 1986). Es éste último factor, el constante aporte de humedad por el Alisio que se concreta en la formación del mar de nubes, el determinante de su ubicación (Marzol *et al.*, 1988)<sup>11</sup>, dándole al bosque la típica apariencia de un bosque de nubes (Hollermann, 1981). No obstante la cercanía al continente africano influye fuertemente en el clima de las islas.

En Tenerife se estima que la extensión actual de la laurisilva sólo representa un 10% (unas 2.700 ha) de la superficie original de este bosque en la isla (Santos, 1990), restringiéndose con base a lo explicitado anteriormente a la zona afectada por el mar de nubes, la zona norte de la isla, en pendientes de barlovento principalmente en altitudes medias. La causa de la regresión del bosque ha sido principalmente la ocupación de su zona potencial por tierras de cultivos y la explotación de su madera como combustible y para la construcción.

Así el bosque de laurisilva canario constituye un relicto del terciario de gran valor e interés, tanto por su composición específica como por su singularidad estructural. La importancia de esta vegetación boscosa estriba en el hecho de que debido a su localización en la zona del subtropical árido de la costa oeste de África y a sus características, constituye una relación entre los bosques tropicales (Hübl, 1988; Lösch y Fischer, 1994) y los bosques extratropicales (Meusel, 1965), principalmente con la vegetación esclerófila mediterránea (Goodall, 1983).

## **2.2. LA LAURISILVA DEL BOSQUE DE MADRE DEL AGUA EN AGUA GARCÍA. TENERIFE.**

El bosque de Madre del Agua de Agua García se halla en la vertiente norte de la isla de Tenerife (28°27'32"N, 16°24'20"O), en el barrio de Agua García perteneciente al término

---

<sup>10</sup> Localizada en el Estado de Misiones (Argentina)

<sup>11</sup> La humedad relativa es el parámetro de mayor nivel de significación ecológica, constituyendo el elemento climático que, casi exclusivamente, determina las condiciones ambientales necesarias para el desarrollo y mantenimiento de la laurisilva (Marzol *et al.*, 1988).

Municipal de Tacoronte (Figura 2-1), entre los 750 y 1000 m s.n.m. ocupando una superficie cercana a las 20 ha. Actualmente está delimitado por carreteras, construcciones y campos de cultivo, estando atravesado por diversas pistas forestales. Tiene su eje en dos barrancos, el mayor de ellos, barranco Toledo y el menor barranco del Salto Blanco, en los que en ocasiones sigue fluyendo el agua, y siendo en estos barrancos donde aún se conservan las mejores muestras de laurisilva, ya que la mayoría de la vegetación del monte ha sido sustituida por causas de la actividad humana.

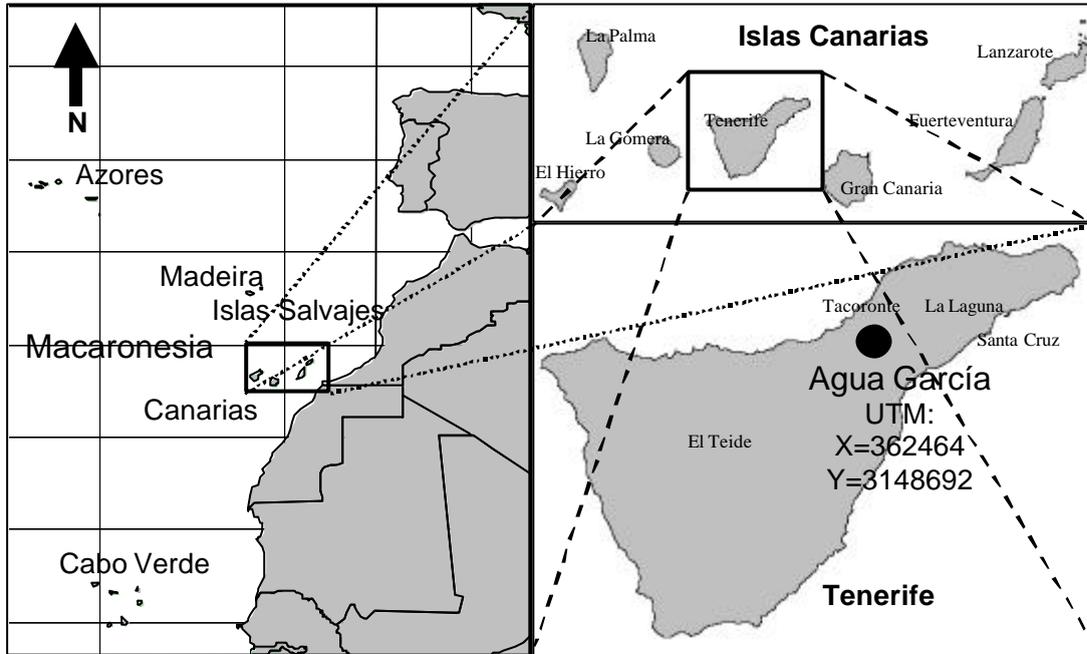


Fig. 2-1 Localización del archipiélago macaronésico, de las Islas Canarias, de Tenerife y de Agua García.

Ya desde la primera mitad del siglo pasado este bosque ha sido digno de mención por los naturalistas que recorrieron la geografía insular, así Webb y Berthelot (1836-1842), que encontraron el bosque casi intacto, mostrando una vegetación en todo su esplendor, describen su flora y vegetación. Otros naturalistas siguieron nombrando el bosque entre los que destacan Schenck (1907) y Pitard y Proust (1908) a principios de este siglo. Este bosque ha sido descrito recientemente desde el punto de vista general y botánico por García y Wilpret (1990), calificándolo como uno de los más importantes relictos boscosos de la vertiente septentrional de la isla.

## 2.3. LA PARCELA DE INVESTIGACIÓN

### 2.3.1. SITUACIÓN, ESTRUCTURA Y EDAFOLOGÍA.

La Parcela Experimental de Investigación ubicada en el Monte de Agua García de Tenerife se encuentra en la Hoya de la Falla Gorda (UTM X=362464; Y=3148692), a 820-830 m de altura, entre los Barrancos Toledo y de Salto Blanco, posee una extensión de 3.390 m<sup>2</sup> y la pendiente de la parcela oscila entre 8° y 12°. La parcela se ha descrito de forma detallada en artículos previos (Morales *et al.*, 1996a,b). No obstante se efectúa un breve resumen, de las características de la misma en 1993:

La vegetación corresponde a un bosque de laurisilva en el que se está regenerando la vegetación potencial desde que se taló en la década de los años cuarenta. La altura media de los árboles fue de aproximadamente 13,1 m, formándose la parte superior del dosel entorno a

los 15,5 m. El diámetro normal (Dn) mínimo inventariable fue 0,06 m, lo que supone para la masa de la parcela un área basimétrica de 33,7 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup> y una densidad de 1.693 árboles ha<sup>-1</sup>, representando 6 especies de árboles, que en orden decreciente de área basimétrica son: *Myrica faya* Ait., *Laurus azorica* (Seub.) Franco, *Persea indica* (L.) Spreng, *Erica arborea* L., *Ilex plathyphylla* Webb y Amarra, e *Ilex canariensis* Poivet. El índice de área foliar fue 7,8 m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup> (Morales *et al.*, 1996a). La densidad de árboles por hectárea fue de *Laurus* 637, *Erica* 461, *Myrica* 286, *Persea* 236, e *Ilex* 73. Los árboles oscilaron en un rango de 0,06 a 0,46 m de Dn.

Entre las especies que no alcanzan porte arbóreo y se hallan en el sotobosque cabe destacar *Viburnum tinus* L. ssp. *rigidum* (Vent.) P. Silva, *Asplenium onopteris* L., *Hedera helix* L., *Smilax aspera* L. *Ranunculus cortusifolius* Willd y *Smilax canariensis* Willd. En algunas zonas de la parcela se observa un verdadero tapiz de plantulas de *Laurus azorica*, que presenta la mayor regeneración sexual de todas las especies de la parcela.

En el aspecto fitosociológico la parcela podría corresponder a la asociación *Lauro-Perseetum indicae* Oberd. 1965, perteneciente a la alianza *Ixantho-Perseion indicae* Santos 1976, orden *Pruno-Lauretalia azoricae* Oberd. 1965, a la clase *Pruno-Lauretea azoricae* Oberd. (1960) 1965.

Los suelos de la parcela derivan de piroclastos basálticos de la serie III y pueden clasificarse dentro del Orden de los Andisoles ya que presentan una densidad aparente inferior a 0,85<sup>12</sup>, retención de fosfato superior al 85% y la suma de aluminio y hierro extraídos con oxalato amónico (pH 3) es superior al 2% (Soil Survey Staff, 1996).

### 2.3.2. CLIMA

Para la caracterización del clima de la parcela se ha escogido debido a su cercanía (a 550 m) la Estación Meteorológica de Tacoronte - Agua García C.F., que ha sido estudiada por García y Wilpret (1990), aunque en la actualidad al disponer de mayores series de registro que estos autores (utilizaron de 1968 a 1975), se realiza de nuevo la caracterización<sup>13</sup>.

Las temperaturas medias mensuales varían como valores medios para el periodo de registro entre 10,5°C para el mes de febrero y 18,6°C para el mes de agosto; así el intervalo anual de temperatura o amplitud térmica media es de 8,1°C lo que refleja un bajo rigor del régimen térmico. La temperatura media anual tiene un valor medio de 14,0°C, fluctuando entre 11,7°C para 1993 y 16,0°C para 1987. Las temperaturas medias mensuales de las máximas varían con valores medios para el periodo de registro entre 13,9°C para el mes de enero y 22,7°C para el mes de agosto, siendo la temperatura anual media de las máximas de 17,7°C. La temperatura media mensual de las mínimas varían con valores medios para el periodo de registro entre 7,0°C para el mes de febrero y 14,7°C para el mes de agosto; siendo la temperatura anual media de las mínimas de 10,7°C. El intervalo anual de temperatura o amplitud térmica extrema es de 15,7°C. La máxima absoluta registrada durante el tiempo de medida ha sido de 39,0° C en los meses de julio y agosto de 1988 y la mínima absoluta registrada en el mismo periodo fue de 0,2°C en febrero de 1993.

Las humedades medias mensuales varían como valores medios para el periodo de registro entre 86% para el mes de junio y 71% para el mes de julio, con una gran homogeneidad a

---

<sup>12</sup> La metodología y resultados del análisis del suelo se detalla posteriormente en el capítulo 9.

<sup>13</sup> La recogida de datos climatológicos de esta estación ha sido llevada a cabo en un primer periodo de 1967 a 1975 por el Patrimonio Nacional Forestal y el ICONA continuándose posteriormente la recogida de datos por el Instituto Nacional de Meteorología (I.N.M.), así la estación presenta un registro de precipitación de 23 años completos, durante el periodo de 1967 a 1997, existiendo 28 años con registros completos de lluvia para meses y 16 años completos de registros de temperatura y humedad, durante el periodo de 1969 a 1997, aunque para algunos meses hay registros durante 21 años.

lo largo del año, mayor que en el caso de las temperaturas. La humedad media anual tiene un valor medio de 80% fluctuando entre el 73% para 1994 y el 87% para diversos años. Las humedades medias mensuales de las máximas varían con valores medios para el periodo de registro entre 88% para el mes de noviembre y 97% para el mes de abril, mostrando así una baja variabilidad. Las humedades medias mensuales de las mínimas varían con valores medios para el periodo de registro entre 58% para el mes de julio y 67% para el mes de septiembre. La máxima absoluta registrada durante el tiempo de medida ha sido de 100% en todos los meses de todos los años y la mínima absoluta registrada en el mismo periodo fue de 11% en junio de 1995.

Los valores extremos mensuales máximos y mínimos de los módulos pluviométricos fueron 608,1 mm en enero del año 1979 y 0 mm repetidamente; y los valores extremos mensuales máximos y mínimos de los módulos pluviométricos anuales fueron 1.076,8 mm en 1989 y 465 en 1994 respectivamente. El coeficiente de variación anual es de 20,7%, mientras que homológamente los coeficientes de variación mensual llegaron a tomar valores extremos en julio, agosto y junio de 156,5, 123,4 y 112,7 respectivamente, lo que significa, que a pesar de no existir una gran variación interanual, existe esta variación en la repartición de la lluvia a lo largo del año, aumentando el coeficiente de variación en los meses que coinciden con el final de la estación húmeda, que se acorta o alarga en los diferentes años, haciendo que este coeficiente cobre valores altos. El número de días de lluvia anual medio es de 74 fluctuando entre 115 en 1971 y 26 en 1973. La precipitación máxima registrada en veinticuatro horas fue el 13 de febrero de 1971 con 120,8 mm de agua. Respecto a la contribución estacional la mayoría de la lluvia acontece durante el otoño y el invierno, pudiéndose casi considerar dos estaciones otoño-invierno, la lluviosa y primavera-verano, la seca.

Una información de gran interés ecológico se obtiene al definir el régimen ombrotérmico de la estación, a través de la representación conjunta de la temperatura y precipitación en la misma gráfica, según los climodiagramas de Walth y Lieth (1960) (Figura. 2-2)<sup>14</sup>. Se puede comprobar la existencia de una época relativamente árida que se

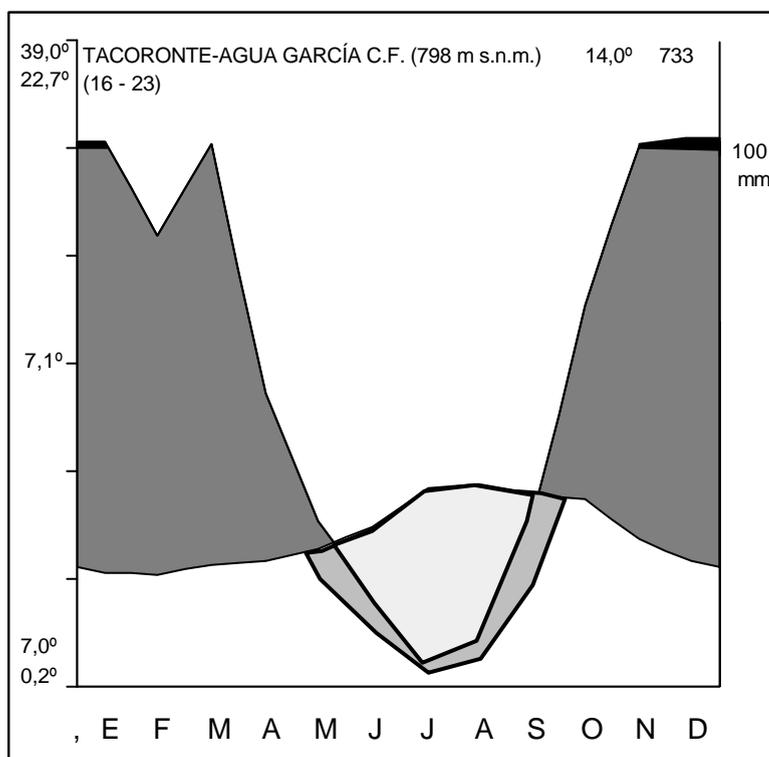


Fig. 2-2 Climodiagrama de Walter y Lieth para la estación meteorológica de Tacoronte – Agua García Casa Forestal (C.F.)

<sup>14</sup> Se representa en abscisas los meses, en ordenadas una división = 10°C o 20 mm de lluvia. Fuera del eje de ordenadas de arriba abajo: temperatura máxima registrada, máxima diaria media del mes más caluroso, oscilación diaria media de la temperatura, mínima diaria del mes más frío y temperatura mínima registrada. Sobre el gráfico de izquierda a derecha: localidad, altura sobre el nivel del mar, la media anual de temperatura (°C) y la precipitación media anual (mm), debajo número de años de observación de la temperatura y de la precipitación. Las dos curvas se corresponden a la de la temperatura media mensual y la precipitación media mensual. Rayado vertical: estación relativamente húmeda, en negro: lluvias medias mensuales > 100mm (escala reducida 1/10), punteado espaciado: sequía extrema, punteado concentrado: sequía relativa (10°C = 30 mm).

correspondería a los meses de mayo a septiembre, mientras que el resto del año correspondería a una época relativamente húmeda sin que se supere más que en cuatro meses los 100 mm por mes. Es de resaltar la ausencia de un invierno frío y la no existencia de heladas. La estación relativamente árida lo es en comparación a una húmeda, pero hay que recordar que se utilizan los datos de temperatura como datos de evaporación potencial, que en un clima como éste, no de tipo árido, ha de ser tomada como no excesivamente seca.

Mediante la aplicación del método y clasificación de Thornthwaite y Mather (1955) para el cálculo de la evapotranspiración, se llega al mismo resultado que el obtenido por García y Wilpret (1990) que utilizaron una serie menor de años.

- En función el índice de humedad: Subhúmedo (C2).
- En función de la eficacia térmica: Mesotérmico I (B'1).
- En función de la variación estacional de la humedad: falta de agua moderada en verano (s).
- En función de la concentración estival de la eficacia térmica: un 38% en verano (a').

### 2.3.3. CONDICIONES METEOROLÓGICAS DURANTE EL AÑO DE ESTUDIO

#### 2.3.3.1. APARATOS DE MEDIDA

Una estación meteorológica automatizada estándar se ubicó 2 m por encima de la cubierta vegetal (sobre una torre de madera de 19 m de altura construida sobre la parcela experimental (Fotografía 3). La precipitación se midió con un pluviómetro automático (modelo Skye, Inst. Llandridod, U.K.), y con un pluviómetro manual estándar. La humedad relativa y la temperatura del aire se midieron con un sensor combinado (modelo RHA1, Delta-T de Devices Ltd, Cambridge, U.K.), y la radiación con un piranómetro (modelo SKS 1110, Skye, Inst. Llandridod, U.K.). Para proveer datos de la velocidad del viento se instaló también un anemómetro (modelo Skye, Inst. Llandridod, U.K.) en la torre (Fotografías 1 y 2). Todos los datos meteorológicos se registraron en un registrador de datos automático (Data Logger DL2, Delta-T de Devices Ltd, Cambridge, U.K.). Los datos fueron tomados cada minuto y se registraron los promedios cada 30 minutos.



Fotografía. 1 Estación meteorológica, con varios sensores de radiación, temperatura del aire y velocidad del viento.



Fotografía. 2 De izquierda a derecha sensores de temperatura y humedad y pluviómetro



Fotografía. 3 Torre de investigación.

### 2.3.3.2. CONDICIONES METEOROLÓGICAS MEDIDAS EN LA PARCELA Y SU COMPARACIÓN CON LA ESTACIÓN DEL I.N.M.

Con los datos obtenidos en la estación meteorológica sobre la torre para el año de estudio (1995) la media anual fue de  $14,7^{\circ}\text{C}$ <sup>15</sup>, que aunque no es del todo comparable a la de la estación del I.N.M., ni en cuanto a su localización (distan unos 550 m) ni a su ubicación, una en una caseta y otra sobre el dosel vegetal, ni a su modo de cálculo, no son sensiblemente diferentes, ya que podemos recordar que la media anual de la estación de Tacoronte – Agua García C.F. era de  $14,0^{\circ}\text{C}$ . La temperatura media de las máximas fue de  $18,1^{\circ}\text{C}$  la temperatura media de las mínimas fue de  $11,8^{\circ}\text{C}$ . La máxima absoluta registrada durante el año de medición fue de  $35,0^{\circ}\text{C}$  mientras que la mínima absoluta fue de  $4,7^{\circ}\text{C}$ , siendo todas estas variables sensiblemente parecidas a las descritas para la estación del I.N.M. que respectivamente fueron  $17,7^{\circ}\text{C}$ ,  $10,7^{\circ}\text{C}$ ,  $39^{\circ}\text{C}$  y  $0,2^{\circ}\text{C}$ . La media anual de la humedad relativa fue de  $83\%$ <sup>16</sup>, que aunque no es del todo comparable a la de la estación del I.N.M., por los mismos motivos que la temperatura, no son sensiblemente diferentes, ya que podemos recordar que la media anual de la estación de Tacoronte – Agua García C.F. era de  $80\%$ . La humedad media de las máximas fue de  $94\%$  la humedad media de las mínimas fue de  $66\%$ . La máxima absoluta registrada durante el año de medición fue de  $100\%$  mientras que la mínima absoluta fue de  $7\%$ , siendo todas estas variables sensiblemente parecidas a las descritas para la estación del I.N.M. que respectivamente fueron  $93\%$ ,  $62\%$ ,  $100\%$  y  $11\%$ . La racha máxima de viento durante media hora fue de  $5,47\text{ ms}^{-1}$ , la media anual de las velocidades máximas diarias fue de  $1,76\text{ ms}^{-1}$ , la media anual fue de  $0,91\text{ ms}^{-1}$ , la media anual de las velocidades mínimas diarias fue de  $0,21\text{ ms}^{-1}$  y finalmente la mínima absoluta fue de calmas repetidas veces. El viento<sup>17</sup> dominante en cuanto a la frecuencia de las direcciones por cuadrantes fue el proveniente entre los  $270\text{-}360^{\circ}$  que sopló durante el  $67\%$  del año, seguido de la dirección  $180\text{-}270^{\circ}$  con un  $14\%$ ,  $90\text{-}180^{\circ}$  con un  $12\%$ , entre  $0\text{-}90^{\circ}$  con un  $3\%$  y las calmas un  $4\%$ . La radiación global incidente media para el año de estudio fue de  $15,5\text{ MJ m}^{-2}\text{ día}$ , con una variación máxima entre los meses de enero con  $10\text{ MJ m}^{-2}\text{ día}$  y mayo con  $23\text{ MJ m}^{-2}\text{ día}$ . La visibilidad<sup>7</sup> media durante el año de mediciones fue de  $1.400\text{ m}$ , con una visibilidad máxima repetida varias veces de  $3.000\text{ m}$  una media anual de las visibilidades máximas diarias de  $1.700\text{ m}$ , una media anual de las visibilidades mínimas diarias de  $1.100\text{ m}$ , y una visibilidad mínima absoluta repetida varias veces de  $0\text{ m}$ .

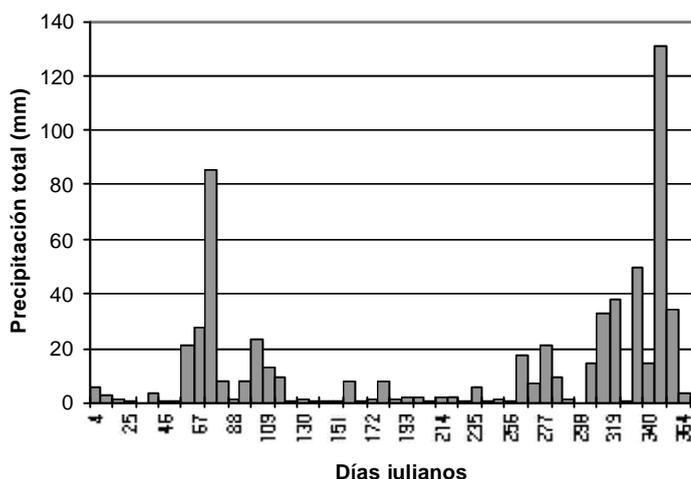


Fig. 2-3. Precipitación total semanal (mm) a lo largo del año 1995, respecto a los días julianos correspondientes a los días de recogida semanal de la precipitación.

<sup>15</sup> La media aritmética de los 48 registros diarios, que a su vez integran un media continua de registros, acercándose de este modo más al valor real de la temperatura media atmosférica del lugar de estudio.

<sup>16</sup> La media aritmética de los 48 registros diarios, al igual que la temperatura.

<sup>17</sup> Para los datos de dirección del viento y visibilidad se recurrió a la estación meteorológica del Aeropuerto de los Rodeos. Con respecto de la dirección del viento debido a las diferencias topográficas entre ambos puntos sólo se consideraron cuatro cuadrantes con el fin de no introducir errores debido a los diferentes mesoclimas de ambas estaciones.

La precipitación anual para el año de medida fue de 626 mm, repartidos de manera muy desigual lo que originó un coeficiente variación de 112% entre los diferentes meses del año obteniéndose un valor máximo para el mes de diciembre con 181 mm, seguido de otro pico en marzo de 130 mm, con un mínimo en mayo con 3,4 mm. Si comparamos estos registros con los registros medios de la estación observamos como en los primeros meses de invierno es donde se observa la mayor variación entre los módulos pluviométricos, ocasionando un invierno relativamente seco, no obstante la variabilidad que existe en todos los años en cuanto a la precipitación hace que este año no sea demasiado atípico, aunque los datos obtenidos por el I.N.M. difieren de los de la parcela ya que la cantidad de precipitación para el año 1995 es de 531 mm transformándolo en un año relativamente seco, a pesar de que en algunos meses haya sido un año normal o hasta húmedo. No obstante esto ocasiona una gran variabilidad de condiciones que para los efectos del estudio que se realizó era lo idóneo al contarse en este periodo de tiempo con diferentes condiciones meteorológicas. El 59,62% de la precipitación se produjo en otoño (de septiembre a diciembre), 22,92% en marzo y el 17,46% restante esparcida a lo largo del resto de los meses como lluvias de baja intensidad. El número de días de lluvia fue de 104.

En cuanto a las cantidades semanales y características de la precipitación, el registro semanal de precipitación máxima fue de 131,2 mm, hubo 29 semanas con menos de 5 mm de lluvia y el resto de las semanas tuvieron valores intermedios (Figura. 2-3.). La cantidad de lluvia máxima diaria fue de 30,8 mm. A lo largo del año durante el día se registraron 274,2 mm y 351,8 mm durante la noche. La intensidad media fue de 0,8 mm h<sup>-1</sup>, oscilando entre 11,6 mm h<sup>-1</sup> y 0,2 mm h<sup>-1</sup>. La temperatura media mientras llovió fue de 15,0°C y la velocidad media del viento fue 1,10 ms<sup>-1</sup>.

## **2.5.BIBLIOGRAFÍA**

- Anchoeta, E. Fuster, J.M. Ibarrola, E. Cendrero, A. Coello, J. Hernan, F. Cantagrel, J.M. & Jamond, C. 1990. Volcanic evolution of the island of Tenerife (Canary Islands) in the light of new K-Ar data. *J. Volcanol. Geoth. Res.* 44:231-249.
- Axelrod, D.I. 1975. Evolution and biogeography of Madrean-Tethyan sclerophyll vegetation. *Ann. of the Missouri Botanical Garden* 62:280-334.
- Bramwell, D. & Bramwell, Z. I. 1990. Flores Silvestres de las Islas canarias. I. Tenerife. 149 pp. Editorial Rueda. Madrid.
- Brockmann-Jerosch, H & Rübél, E. 1912. Die Einteilung der Pflanzengesellschaften nach ökologisch-physiognomischen Gesichtspunkten. Leipzig.
- Ceballos, L & Ortuño, F. 1976. Vegetación y flora forestal de las canarias Occidentales. Cabildo Insular de Santa Cruz de Tenerife.
- Ciferri, R. 1962. La laurisilva canaria: una paleoflora viviente. *Ricerca sci. (Roma)* 2:111-134.
- Font Tullot, I. 1988 Historia del Clima en España. Cambios climáticos y sus causas. Instituto Nacional de Meteorología (Ed.) Ministerio de Transportes, Turismo y comunicaciones. 298pp.
- García, A & Wilpret, W. 1990. Estudio Florístico del Bosque de Madre del Agua en Agua García (Tenerife) en Homenaje al Profesor Telesforo Bravo. I. Editado por La Universidad de La Laguna. 307-347.
- González Henríquez, M.N., Rodrigo Pérez, J.D. & Suárez Rodríguez, C. 1986. Flora y Vegetación del archipiélago canario. Ed.EDIRCA. Las Palmas de Gran Canaria, 335pp.
- Goodwall, D.W., ed. (1983) *Ecosystem of the world. 10: Terrestrial ecosystems: Temperate broad-leaved evergreen forest.* Amsterdam.

- Gutierrez, E. 1998. Las selvas Templadas. Enciclopedia Catalana. Capítulo 6. (En Prensa).
- Höllermann, P. 1981. Microenviromental studies in Laurel forest of Canary islands. Mountain Research and Development. 1:193-207.
- Hübl, E. 1988. Lorbeerwälder und Hartlaubwälder (Ostasien, Mediterraneis und Makaronesien). Düsseldorf Geobot. Koll. 5:3-26.
- Kunkel, G. 1987. Die Kanarischen inseln und ihre Pflanzenwelt. 2. Aufl. Ulmer, Stuttgart.
- Lösch, R. & Fischer, E. 1994. Vikariierende Heidebuschwälder und ihre kontakgesellschaften in Makaronesien und Zentralafrika. Phytocoenologia 24:695-720.
- Marzol, M. V. Rodriguez, J. Arozena, M. E. & Luis, M. 1988. Rapport entre la dynamique de le mer de nauges et la vegetation au nord de Tenerife (Iles Canaries). Publications de l'Association Internationale de Climatologie 1:273-283.
- Meusel, H. 1965. Die relikvetation der Kanarischen Inseln in ihren Beziehungen zur süd- und mitteleuropäischen flora. In Gersch (ed.). Gesammelte Vorträge moderner Probl. Abatammungslehre 1 (Jena):117-136.
- Morales, D. Jiménez M.S. González-Rodríguez, A.M. & Cermák, J. 1996a. Laurel forest in Tenerife, Canary Islands: I. The site, stand structure and stand leaf area distribution. Trees 11:34-40.
- Morales, D. Jiménez, M.S. González-Rodríguez, A.M. & Cermák, J. 1996b. Laurel forest in Tenerife, Canary Islands: II. Leaf distribution patterns in individual trees. Trees 11:41-46.
- Pitard, J & Proust, L. 1908. Les Iles Canaries. Flore de L'archipel. 205 pp. Librerie des Sciencies Naturelles. Paul Klincksieck. Paris.
- Santos, A. 1990. Evergreen forest in Macaronesian region. Council of Europe, Strasburg, 79pp.
- Schenck, H. 1907. Beiträge zur Kenntnis der Vegetation der Canarischen Inseln. 3:406. Darmstadt.
- Soil Survey Staff. 1996. Soil taxonomy. A basic system of Soil Classification for making an por interpreting soil surveys. USDA Soil Conservation Service. Agric.
- Schimper, A.F.W. 1898. Pflanzen Geographie auf Physiologischer Grundlage. 878 pp., Gustav Fischer, Jena.
- Tawaga, H. 1997. World-wide distribution of Evergreen Lucidophyll Oak-laurel forest. Tropics, 6(4):295-316.
- Thornthwaite, C.W. & Mather, J.R. 1955. The water budget and its use in irrigation. USDA Yearbook of Agriculture, USDA, Washington, pp. 346-358.
- Walter, H. & Lieth, H. 1960. Klimadiagramm Weltatlas. Fischer Verlag, Jena.
- Webb, P.B. & Berthelot, S. 1836-1842. Histoire Naturelle des Iles Canaries. Geographie Botanique. 3 (1):181. Paris.



## Capítulo 3. ESCURRIDO CORTICAL. CURSO ANUAL Y CAUSAS DE LA VARIACION ENTRE LAS ESPECIES

### 3.1. INTRODUCCIÓN

El escurrido cortical (*EC*) es la fracción de precipitación que contacta con la cubierta y fluye hacia abajo por las ramas y los troncos, alcanzando el suelo circundante a la base de estos. Sólo esta fracción debe ser considerada como escurrido cortical, no incluyendo el agua que tras ser encauzada a veces gotea desde el tronco, debido a su inclinación o a otros impedimentos, sin llegar a la base del mismo (debiéndose contabilizar como precipitación penetrante (Crockford y Richardson, 1983).

El escurrido cortical suele ser pequeño desde un punto de vista de volúmenes y porcentajes, quizás sea ésta una de las razones de la poca atención que se le ha prestado (Taniguchi *et al.*, 1996). Sin embargo en algunas ocasiones se han registrado grandes cantidades (Herwitz, 1986; Lloyd y Marques, 1988) o altos porcentajes de escurrido cortical respecto de la precipitación total, con un valor extremo de 42% (Slatyer, 1965).

Independientemente de su magnitud, el escurrido cortical tiene gran importancia desde el punto de vista ecológico:

- a) Es un componente indispensable en la ecuación del balance hídrico (Lloyd y Marques, 1988).
- b) Es un término importante en la ecuación del balance de nutrientes aportando una porción importante de éstos al suelo (Gesper y Holowaychuck, 1970, 1971; Crockford y Richardson, 1990a; Neal *et al.*, 1990, 1993; Haworth y McPherson, 1995), incrementando en ocasiones su acidez (Haworth y McPherson, 1995), o modificando su química cuando se produce lluvia ácida (Rampazzo y Blum, 1992).
- c) Concentra el agua alrededor de los troncos aumentando su flujo que drena rápidamente (Hewirtz, 1982, 1986; Crabtree y Trudgill, 1985 Tanaka *et al.*, 1996; Taniguchi *et al.* 1996) y las tasas de recarga, habiéndose encontrado que el porcentaje entre la tasa de recarga por escurrido cortical respecto a la tasa de recarga total varió entre 10,9 al 19% en un bosque de pinos (con menos de un 2% de escurrido cortical), según Taniguchi *et al.* (1996), constituyendo una fuente importante de humedad edáfica para el crecimiento de los árboles, tal y como se ha descrito en ecosistemas áridos y semiáridos (Spetch, 1957; Glover *et al.*, 1962; Pressland, 1976; Tromble, 1987; Navar, 1993; Martínez -Meza y Whitford, 1996).
- d) Aumenta la escorrentía (flujo de Horton) cuando las intensidades de precipitación son mayores a la capacidad de infiltración del suelo (Herwitz, 1986 y Tanaka *et al.*, 1991).

Las cantidades de escurrido cortical dependen de algunas características estructurales de la vegetación, así como de la precipitación en sí misma y otros factores climáticos, siendo muy importante el tipo de evento de lluvia.

Algunas características de la estructura de los árboles parecen tener una correlación directa con el escurrido cortical, tales como el diámetro normal (*D<sub>n</sub>*) y la sección normal (*S<sub>n</sub>*) (Whicht, 1941; Rutter, 1963; Reynolds y Henderson, 1967; Crockford y Richardson, 1987, 1990a) aunque no todos los autores encuentran esta correlación, en algunos casos debido a la arquitectura de árboles (Ibrahin, 1979), a la alta densidad de árboles o a que algunos de ellos son dominantes, encontrándose a veces la correlación por encima de un cierto valor de precipitación (Sinun *et al.*, 1992). Otras características relacionadas son la altura de árbol (Hoover *et al.*, 1953; Clements, 1971), el volumen de la copa (Martínez-Meza y Whitford, 1996)

el área de la copa (Martínez-Meza y Whitford, 1996; Peterson y Rolfe, 1982; Feller, 1981), la orientación y forma de la hoja y de los brotes (Rowe, 1948; Ovington, 1954; Leonard, 1961; Slatyer, 1965; Pressland, 1973; Hewirtz, 1986; Crockford y Richardson, 1987 y 1990a; Navar, 1993), el ángulo de la rama (Busgen, 1929; Hoover *et al.*, 1953; Voigt, 1960; Eschner, 1967; Reynolds y Henderson, 1967; Ibrahim, 1979; Hewirtz, 1986; Crockford y Richardson, 1987, 1990a), el número de ramas y su posición en la cubierta (Navar, 1993) y la inclinación del tronco (Hoover *et al.* 1953; Crockford y Richardson, 1987, 1990a; Martínez-Meza y Whitford, 1996).

Asimismo se relaciona con algunas características de la corteza como la permeabilidad (Schnok y Galoux, 1967; Ibrahim, 1979; Crockford y Richardson, 1987, 1990a, 1990b), superficie y aspereza (Schnok y Galoux, 1967; Ibrahim, 1979; Crockford y Richardson, 1987, 1990a; Navar, 1993), espesor y obstrucciones en la trayectoria de flujo (Crockford y Richardson, 1987, 1990a) y la interacción con árboles vecinos de la misma o de diferentes especies (Jordan, 1968; Crockford y Richardson, 1983, 1987, 1990a; Lloyd y Marques, 1988; Sinun *et al.* 1992).

Otras características del clima y de la precipitación tienen importancia en el escurrido cortical, tales como la estacionalidad, la continuidad de eventos de precipitación y el ángulo de la lluvia (Crockford y Richardson, 1983, 1987, 1990a), la intensidad de la precipitación (Crockford y Richardson, 1987, 1990a y Hewirtz, 1986) y la cantidad de lluvia (Crockford y Richardson, 1987, 1990a; Navar 1993; Haworth y McPherson, 1995; Martínez-Meza y Whitford, 1996).

En la laurisilva no se han realizado investigaciones en este sentido, la única referencia encontrada fue Kämmer (1974) que estimó el escurrido cortical como insignificante para bosques de laurisilva canaria.

Los objetivos de este capítulo son:

- i. Cuantificar las cantidades de escurrido cortical de los árboles muestra de las seis especies que crecen en la parcela de estudio y que difieren en características funcionales y estructurales (Morales *et al.*, 1996 a, b y c y Jiménez *et al.*, 1996).
- ii. Explicar las causas de la variación (parámetros de la cubierta y meteorológicos) del escurrido cortical.
- iii. Elección del método de cálculo a aplicar para la extrapolación a la parcela.
- iv. Determinar la variación en escurrido cortical entre especies y las posibles causas.
- v. Estimar la redistribución del agua en el área de infiltración de los aportes del escurrido cortical al suelo del bosque.

## **3.2. MATERIAL Y MÉTODOS**

### **3.2.1. ELECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS ÁRBOLES MUESTRA.**

Para medir el escurrido cortical se seleccionaron 30 árboles, 5 de cada una de las especies que crecen en la parcela. Se eligieron dividiendo el intervalo de diámetro normal de cada especie entre 5, obteniendo de este modo cinco clases de diámetro para cada especie, eligiendo entonces un único árbol al azar por cada clase diamétrica, representando así los distintos tamaños de la distribución de cada especie dentro de la parcela.

Los árboles muestra fueron caracterizados por sus diámetros normales ( $D_n$ ), secciones normales ( $S_n$ ), alturas totales ( $h$ ), inclinaciones del tronco ( $b$ ), las áreas de la proyecciones de la copa ( $APC$ ) y los volúmenes de copa ( $VC$ ) (Figura 3-1). El área de la proyección de la copa ( $APC$ ) se estimó midiendo los diámetros de copa este-oeste y norte-sur en la parte más ancha de la misma y aplicando la ecuación del área de un elipsoide. El

volumen de copa se calculó mediante la fórmula de un esferoide, usando como tercer diámetro la altura de copa ( $hc$ ), que se midió desde la parte alta de ésta hasta el lugar donde la primera rama sale desde el tronco.

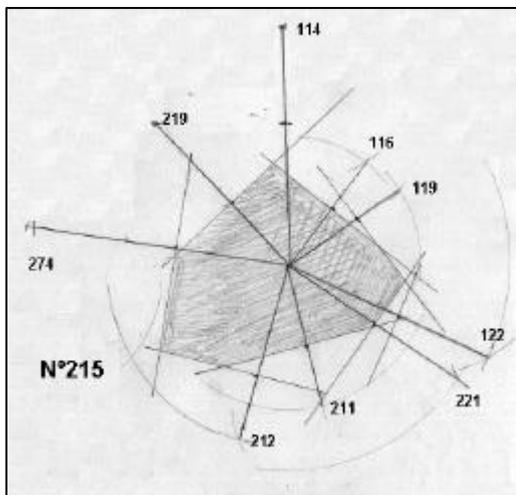


Fig. 3-2 A la derecha el esquema del cálculo del Índice de Adlar para el árbol 215.

Para examinar la interacción entre árboles debida a la competición se calculó el Índice de Competición de Adlar (1974) para cada árbol, que estima la proyección horizontal del espacio disponible para el crecimiento, definida como el polígono cuyos vértices son las intersecciones con las mediatrices de los segmentos que unen el árbol competido con sus competidores vecinos más próximos, trazadas a distancias inversamente proporcionales a las secciones normales (Figura. 3-2). Por otro lado se sumó la altura de la copa de los árboles vecinos que sobresale por encima de la altura de cada árbol medido.

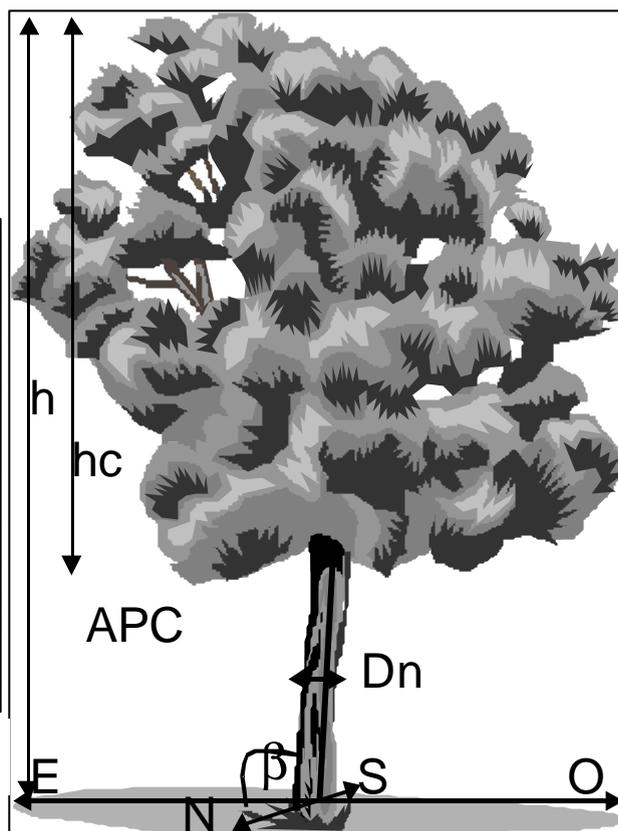


Fig. 3-1 Esquema de los parámetros empleados en la caracterización de los árboles muestra.

Tabla. 3-1 Valores medios de los parámetros que se indican para los cinco árboles muestra de cada especie.

Especies	<i>Erica arborea</i>	<i>Ilex canariensis</i>	<i>Ilex platyphylla</i>	<i>Laurus azorica</i>	<i>Myrica faya</i>	<i>Persea indica</i>
Diámetro normal (cm)	13,6	11,9	11,4	15,9	32,6	19,7
Sección normal (cm <sup>2</sup> /árbol)	149,9	116,6	117,2	224,6	905,2	334,3
Altura total (m)	11,1	11,8	12,3	14,3	15,5	14,0
Altura de la copa (m)	8,7	8,5	8,1	9,3	10,7	10,8
Área de proyección copa (m <sup>2</sup> )	6,9	8,5	6,0	11,4	45,0	26,5
Volumen copa (m <sup>3</sup> )	11,5	20,8	20	39,7	156,6	79,7
Ángulo inclinación tronco (°)	7,0	7,9	5,3	4,3	0,0	3,5
Σ de la altura de los vecinos sobre la altura del árbol muestra (m)	11.1	9.4	9.3	3.6	2.1	2.4
Índice competición Adlar (m <sup>2</sup> )	6,2	6,3	3,8	4,8	24,5	11,2
Índice de rugosidad (cm/cm)	1,3	1,1	1,0	1,1	1,5	1,1

Se desarrolló un Índice de rugosidad de la corteza, basado en la relación entre la longitud del contorno externo e interno de la corteza, para ello de cada árbol muestra se tomaron cuatro muestras a diferentes alturas, éstas consistían en un rectángulo de 5x1 cm de la corteza, cortada con un bisturí y separada cuidadosamente del resto de los tejidos del tronco, cuyo perfil fue impreso con tinta sobre papel por los lados mayores del rectángulo, sobre el dibujo obtenido que fue ampliado x10, se midió el contorno de la superficie externa con un planímetro y se relaciono con el contorno de la superficie interna, tal y como se aprecia en la Figura 3-3. El promedio de cada parámetro para los cinco árboles muestra de cada especie aparece en la Tabla. 3-1.

### 3.2.2. MEDIDA DEL ESCURRIDO CORTICAL

En el periodo de diciembre de 1994 a diciembre 1995 se midió el escurrido cortical por el método estándar de los collares de caucho alrededor de los troncos (ancho aprox. 1cm), sellados con goma, que recogen el agua que fluye por los mismos hacia abajo, este agua fue conducida por tubos de polietileno a bolsas colectoras de polietileno de 36 l de capacidad (Fotografía 4). En las especies con la corteza rugosa, ésta fue lijada con el fin de mejorar el ajuste del collar al tronco, teniendo cuidado de no dañar el floema.

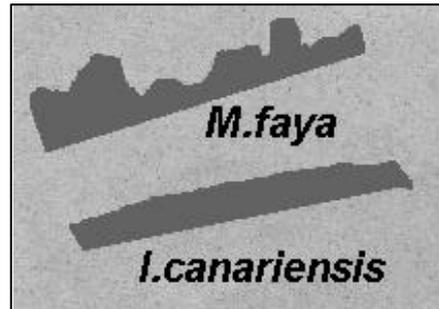


Fig. 3-3 Impresiones de dos de las muestras para dos de las especies.

El escurrido cortical se determinó con intervalos semanales, no obstante y siguiendo a Crockford y Johnson (1983) que sugieren ser cautos, ya que los errores de medición para eventos de gran tamaño pueden ser significativos, cuando llovió intensamente, con el fin de minimizar las perdidas de agua, se recogió ésta al final de cada evento ya que la capacidad de los depósitos era sobrepasada en ciertos árboles.

### 3.2.3. ANÁLISIS DEL ESCURRIDO CORTICAL

Se han empleado y comparado diferentes métodos para calcular el escurrido cortical de nuestra parcela. Todos ellos calculan el escurrido cortical como volumen y como porcentaje de precipitación total. Ya que uno de los objetivos del presente capítulo es la comparación y evaluación de los métodos cada uno de los mismos es descrito y aplicado en la correspondiente sección de resultados y discusión.

El radio del área de infiltración, se calculó según la relación empírica dada por Tanaka *et al.* (1991), para árboles de diferentes especies, algunos de ellos (*Camelia japonica*) muy similar en las características morfológicas a las especies del bosque de laurisilva:

$$Y=25,07 \ln X - 34,92$$

Donde  $X$  es el diámetro de la base del árbol (cm) e  $Y$  es el radio del área de infiltración de los aportes de escurrido cortical desde del centro al tronco (cm).

Y para calcular el área de infiltración ( $A_s$ ) del aporte de escurrido cortical como un anillo, se uso la relación dada por Tanaka *et al.* (1996):

$$A_s = P [ Y^2 - (X/2)^2 ]$$



Fotografía 4. Medida del escurrido cortical mediante un collar de caucho.

Donde  $X$  e  $Y$  son las mismas variables de la relación anterior.

### 3.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.3.1. EL ESCURRIDO CORTICAL POR ÁRBOL MUESTRA.

El escurrido cortical de cada árbol muestra, medido semanalmente, se sumó para conocer el volumen anual recogido, el cual osciló entre 30 l para un árbol de *I.perado* y 1.658 l para un árbol de *P.indica*. Estos volúmenes son pequeños comparados con la magnitud de los volúmenes obtenidos por Hewirtz (1986) en un bosque tropical con lluvias ciclónicas, que en dos períodos de menos de un año obtuvo la alta cantidad de 50.000 l para un árbol. El volumen total anual de escurrido cortical recogido para los 30 árboles muestra fue de 13.580 l, repartido entre las diferentes especies del siguiente modo: *E. arborea* 1.020,4 l, *I.canariensis* 1.940,6 l, *I.perado* 579,1 l, *L.azorica* 2.293,8 l, *M.faya* 3.503,3 l y *P.indica* 4.243,0 l.

El porcentaje máximo de contribución para un árbol fue 12,2% de todos los árboles muestra, este valor es mucho más bajo que el 56% registrado por Lloyd *et al.* (1988) en un bosque lluvioso amazónico o el 29,9% registrado por Sinun *et al.* (1992) en el bosque lluvioso de Malaysia. Este hecho indica menor variabilidad entre árboles en éste bosque de laurisilva que en los bosques tropicales, posiblemente debido a una mayor homogeneidad estructural y un menor número de especies.

##### 3.3.1.1. EFECTO DE LOS PARÁMETROS DE LA CUBIERTA ARBÓREA SOBRE LA VARIACIÓN DE ESCURRIDO CORTICAL ENTRE LOS ÁRBOLES MUESTRA. MODELOS MÚLTIPLES LINEALES (VALORES ANUALES).

Para explicar las causas que ocasionan las variaciones de escurrido cortical entre los individuos de las diferentes especies y con propósitos de pronóstico, se desarrollaron modelos múltiples. Se analizó el efecto de los parámetros de la cubierta sobre los volúmenes anuales de escurrido cortical en los 30 árboles muestra, ya que no se encontraron diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ ) para los volúmenes recogidos a lo largo del año al agruparlos por especies. Se realizaron regresiones simples entre los volúmenes y las variables: altura de copa, área de la proyección de la copa, volumen de la copa, índice de rugosidad, ángulo de inclinación del tronco, suma de la altura de vecinos sobre el árbol muestra e índice de competición de Adler; y entre las variables entre sí con el fin de evitar colinealidad. En el análisis de regresión múltiple sólo se incluyeron las variables que tenían una significación para una  $p \leq 0,05$ , como se puede observar en la Tabla 3-2. No hubo relaciones significativas con las variables volumen de copa, altura de copa, índice de competición de Adler y ángulo de inclinación del tronco, esta última posiblemente debido a los bajos valores.

Tabla 3-2. Modelo lineal desarrollados para el volumen de escurrido cortical anual (donde el escurrido cortical esta en l, el área de la proyección de la copa en  $m^2$  y el  $\Sigma$  de la altura vecinos sobre árbol muestra en m).

Variables	$R^2$	SEE	Coeficientes		Coef. Típico	Sign F
			a	b		
Área proyección copa	0,66	275,20	1.124,739	16,480	0,727	0,0000
$\Sigma$ de la altura vecinos sobre árbol muestra				-23,980	-0,316	
Índice de rugosidad				-677,46	-0,294	

Los resultados muestran que las causas de la variación del escurrido cortical entre árboles se deben a diferencias en parámetros morfológicos. El modelo contó con el área de la proyección de la copa, la suma de la altura de los vecinos sobre el árbol muestra y el índice de rugosidad que absorbió el 66% de la variación ( $R^2 = 0,66$ ). Los coeficientes típicos explican la importancia de cada variable en el modelo, así el área de la proyección de la copa absorbió 2,3 veces más variación que la suma de las alturas de los vecinos sobre el árbol muestra y 2,5 veces más variación que el índice de rugosidad. Martínez-Meza y Whitford (1996) encontraron para *Prosopis glandulosa* y *Flourensia cernua* un modelo lineal para el área de proyección de la copa que es la que en este caso absorbe mayor variabilidad. El modelo se puede interpretar como que los árboles que tienen el área de la proyección de la copa más grande, que no es dominada por los vecinos y que tienen el menor índice de rugosidad del tronco, recogen las mayores cantidades de escurrido cortical, porque tanto la suma de las alturas de los vecinos sobre el árbol muestra, así como el índice de rugosidad, se correlacionan negativamente con el escurrido cortical.

El área proyectada por la copa es de gran importancia porque posibilita la redistribución de la precipitación a través del tronco, como fue sugerido por Herwitz (1986). La rugosidad de la corteza debe explicar algunas de las variaciones interespecíficas del escurrido cortical (Navar, 1993), éste parámetro no tiene gran variación intraespecífica, pero si la tiene interespecífica, por lo que será importante para encontrar diferencias en la recogida y redistribución del agua entre las diferentes especies. El área de la proyección de la copa sugiere que el efecto de la ramificación, y más concretamente de los brotes terminales incluidos en el área de la proyección de la copa pueden ser más importante que las hojas en la producción de escurrido cortical (Martínez-Meza y Whitford, 1996), nuestros resultados confirman esta afirmación ya que en el modelo se han introducido especies con tamaño de hoja muy diferente tales como *E.arborea* con una media de aprox.  $0,08 \text{ cm}^2$  (Ruiz de la Torre, 1979), con otras de mayor tamaño como, *I.canariensis*  $22,95 \text{ cm}^2$ , *I.perado*  $54,20 \text{ cm}^2$  (Bañares y Barquín, 1982) y *M.faya*  $17,19 \text{ cm}^2$  y *L.azorica*  $27,04 \text{ cm}^2$  y *P.indica*  $\text{cm}^2$  (Morales *et al.* 1996c).

Por lo tanto hay un efecto positivo sobre la redistribución del agua de lluvia cuando el tamaño de los árboles aumenta, y un efecto negativo cuando la competencia se incrementa, como fue encontrado por Martínez-Meza y Whitford (1996) en otro tipo de formación vegetal. Gras (1993) al referirse a plantaciones de *E.globulus* afirma que en igualdad de superficie de copa la altura es el factor que crea las diferencias, y que por lo tanto los árboles que consiguen alguna ventaja en cuanto a la altura, tendrán a partir de entonces otra ventaja por mayores aportes de agua vía escurrido cortical. Esto conducirá a que los árboles dominantes y grandes al tener volúmenes mayores de agua alrededor de ellos, tendrán un crecimiento adicional y una mayor estabilidad bajo condiciones ambientales de estrés tales como la sequía, permitiendo que cada vez sean más dominantes.

### 3.3.2. ESCURRIDO CORTICAL ANUAL A NIVEL DE PARCELA. CÁLCULO Y EVALUACIÓN DE LOS DIFERENTES MÉTODOS EMPLEADOS.

Se han encontrado en la bibliografía distintos métodos para evaluar el escurrido cortical a nivel de parcela relacionando los volúmenes medidos por árbol con alguna característica fácilmente medible (Crockford y Richardson 1987,1990a). A continuación se describen éstos y se aplican para calcular los valores en nuestra parcela.

#### 3.3.2.1. EXTRAPOLACIÓN CON BASE EN EL CÁLCULO DEL ESCURRIDO CORTICAL POR ÁREA DE LA PROYECCIÓN DE LA COPA (APC).

El volumen de escurrido cortical anual para cada árbol muestra se expresó por unidad de área proyectada por la copa. Los valores obtenidos oscilaron desde de  $7,51 \text{ l m}^{-2}$  para un individuo de *I.perado* a  $85,32 \text{ l m}^{-2}$  para un individuo de *I.canariensis*, con un promedio de  $28,75 \text{ l m}^{-2}$  para todos los árboles muestra. Estos valores también se expresaron en porcentaje de la precipitación

total anual, el promedio osciló desde 2,66 % para los 5 ejemplares de *M.faya* a 6,49 % de los 5 árboles de *E.arborea* (Tabla 3-3). Para todos los árboles muestra el promedio fue de 4,54%.

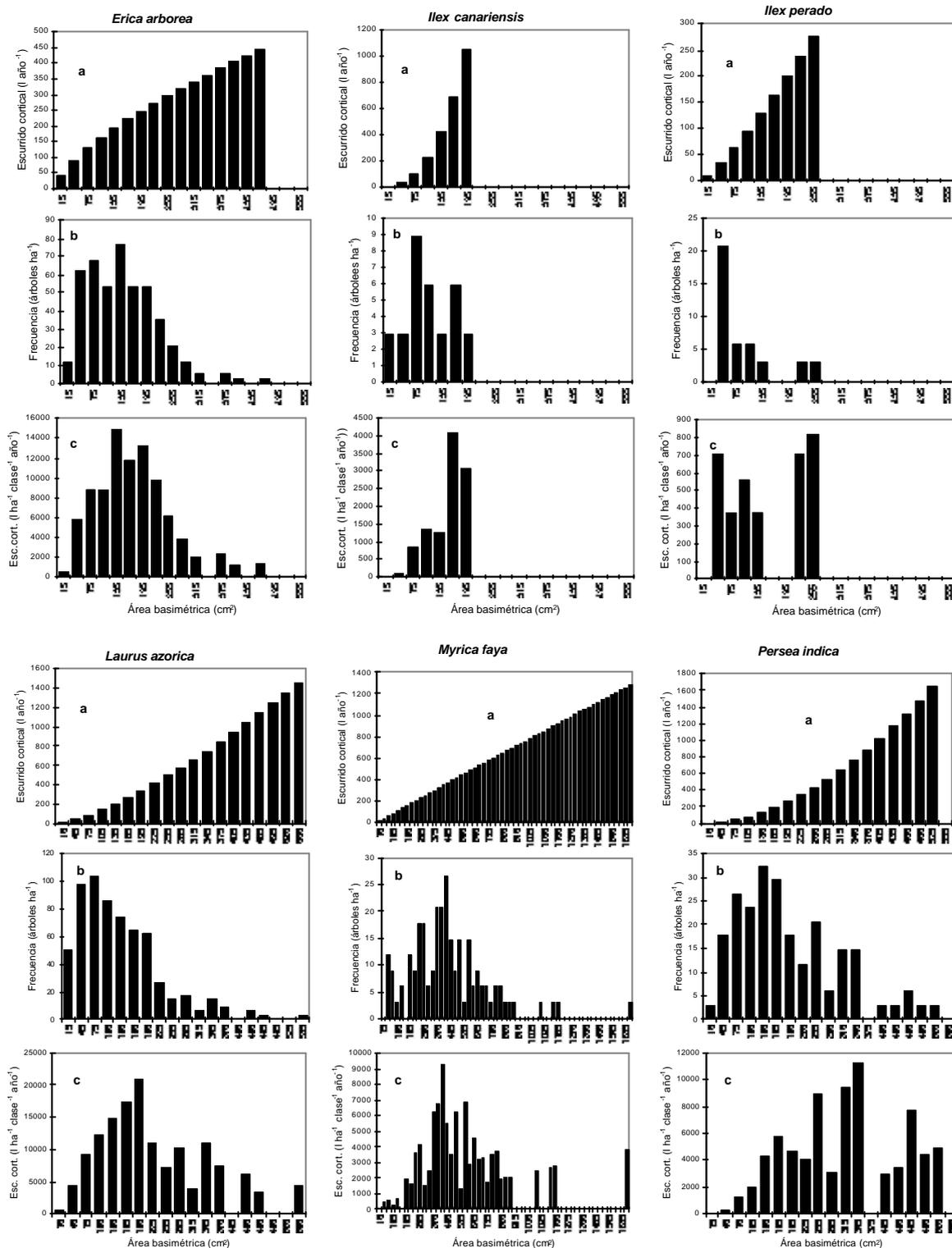


Fig. 3-4 Diagrama aplicado para llevar el escurrido cortical de árboles muestra de diferentes clases de *Sn* a los valores de la parcela. a) volumen anual de los árboles medios de las clases de *Sn* calculado para la curva de extrapolación. b) Número de árboles en las clases de *Sn*. c) Volumen anual de escurrido cortical de todos los árboles de de cada clase. Nótese la diferencia de escalas de los ejes.

Tabla 3-3 Media, máximo y mínimo de escurrido cortical anual por APC para cada especie y media para toda la parcela ( $l\ m^{-2}$ ) y media, máximo y mínimo de escurrido cortical anual como porcentaje de la precipitación total anual (%). La precipitación anual fue de 626 mm.

	<i>E.arborea</i>			<i>I.canariensis</i>			<i>I.perado</i>			<i>L.azorica</i>			<i>M.faya</i>			<i>P.indica</i>			<i>Parc</i>	
	Med	Max.	Min.	Med.	Max.	Min.	Med.	Max.	Min.	Med.	Max.	Min.	Med.	Max.	Min.	Med.	Max.	Min.	Med.	Max.
$l\ m^{-2}$	40,63	65,86	17,34	38,56	85,32	13,02	20,78	29,74	7,51	24,98	8,89	41,19	16,65	11,27	29,67	30,92	58,34	7,76	28,75	
%	6,49	10,52	2,77	6,16	13,63	2,08	3,32	4,75	1,20	3,99	1,42	6,58	2,66	1,80	4,74	4,94	9,32	1,24	4,59	

### 3.3.2.2. EXTRAPOLACIÓN CON BASE EN EL CÁLCULO DEL ESCURRIDO CORTICAL POR SECCIÓN NORMAL ( $S_n$ ).

Puesto que el diámetro normal ( $D_n$ ) es el parámetro más fácil de medir, y por tanto la sección normal calculada a partir de éste, se pensó en ambos parámetros para la evaluación del escurrido cortical. Con el fin de optar por uno de ellos, se calcularon los correspondientes coeficientes de correlación para el escurrido cortical para todas las especies y para todas las semanas. Los valores presentados en la Tabla 3-4 son las medias de los de los coeficientes de correlación calculados para las 25 semanas en las que se recogió escurrido cortical.

Tabla. 3-4. Media de los valores de r para las correlaciones de los volúmenes semanales de escurrido cortical (EC) versus diámetro normal ( $D_n$ ) y sección normal ( $S_n$ ).

Relación	Coeficiente de correlación medio					
	<i>E.arborea</i>	<i>I.canariensis</i>	<i>I.perado</i>	<i>L.azorica</i>	<i>M.faya</i>	<i>P.indica</i>
EC v $D_n$	0,66	0,86	0,91	0,85	0,84	0,77
EC v $S_n$	0,64	0,87	0,92	0,87	0,84	0,80

Los valores están en consonancia con los presentados por Crockford y Richardson (1987,1990a), quienes registraron coeficientes de correlación para eventos de lluvia que variaban entre 0,96-0,66 para la sección normal y 0,96-0,61 para diámetro normal. La correlación del escurrido cortical versus sección normal fue, en la mayoría de los casos, mejor que la correlación del escurrido cortical versus diámetro normal. Por esto se usó la sección normal para calcular la cantidad de escurrido cortical con base espacial a nivel de parcela, aunque el coeficiente de correlación para *E.arborea* ( $r = 0,64$ ) fue considerablemente menor que el de las otras especies.

#### 3.3.2.2.1. SIGUIENDO EL MÉTODO DE CROCKFORD Y RICHARDSON.

De acuerdo con Crockford y Richardson (1987, 1990a), la conversión del volumen de escurrido cortical al área de la parcela se hace mediante la extrapolación de los volúmenes de escurrido cortical de los árboles muestra al de todos los árboles, usando las secciones normales de los árboles muestra y la suma de las secciones de todos los árboles. Se hizo para cada especie.

Tabla. 3-5 Volumen anual de escurrido cortical por área de parcela y contribución de cada especie a éste ( $l\ m^{-2}$ ), y escurrido cortical como porcentaje de la precipitación total (%).

	<i>E.arborea</i>	<i>I.canariensis</i>	<i>I.perado</i>	<i>L.azorica</i>	<i>M.faya</i>	<i>P.indica</i>	Parcela
$l\ m^{-2}$	9,55	1,22	0,42	20,24	10,85	13,73	56,02
%	1,53	0,20	0,07	3,23	1,73	2,19	8,95

El resultado se expresó como la contribución en milímetros de escurrido cortical de cada especie y su suma para toda la parcela, resultando que la especie que más contribuyó al escurrido cortical total fue *L.azorica* (20,24 l m<sup>-2</sup>) y las que menos las dos del género *Ilex* (1,22 y 0,42 l m<sup>-2</sup>). De este modo la cantidad de escurrido cortical en porcentaje de la precipitación total oscilo entre el 3,23% para *L.azorica* y el 0,07% para *I.perado*. El total de escurrido cortical para la parcela en porcentaje de la precipitación fue de 8,95%, como podemos ver en la Tabla. 3-5.

### 3.3.2.2.2. SIGUIENDO EL MÉTODO UTILIZADO POR LA ASOCIACIÓN ALEMANA PARA LAS CIENCIAS HIDROLÓGICAS Y LA AGRICULTURA (D.V.W.K.).

El escurrido cortical se estimó también por otro método utilizado por la Asociación Alemana para las Ciencias Hidrológicas y la Agricultura (D.V.W.K. 1992), en el que se hace una extrapolación del volumen del escurrido cortical de cada uno de los árboles muestra al volumen de todos los árboles de la parcela, usando la sección normal de cada árbol muestra y la suma de secciones de los árboles de la parcela; en la Tabla. 3-6 se presenta el promedio para toda la parcela basado en las determinaciones del promedio de cada especie. El resultado fue expresado, igualmente, como una estimación en milímetros para toda la parcela, y como porcentaje de la precipitación total anual.

Tabla 3-6 Media anual del escurrido cortical por parcela suponiendo que todos los árboles en la parcela fueran la misma especie (la que se indica); y media total (parcela) basada en las medias anteriores (l m<sup>-2</sup>). Idem como porcentaje de la precipitación total (%).

	<i>E.arborea</i>	<i>I.canariensis</i>	<i>I.perado</i>	<i>L.azorica</i>	<i>M.faya</i>	<i>P.indica</i>	Parcela
l m <sup>-2</sup>	53,25	99,07	33,06	66,57	29,63	79,59	60,20
%	8,51	15,83	5,28	10,63	4,73	12,71	9,62

### 3.3.2.2.3. APLICANDO LAS REGRESIONES ANUALES ENTRE LA SECCIÓN NORMAL Y EL ESCURRIDO CORTICAL.

Teniendo en cuenta que un árbol de sección normal grande puede coger más o menos agua que un conjunto de árboles de sección normal menor pero que sume el mismo valor, se aplica la misma metodología empleada por Jiménez *et al.* (1996) para el cálculo de la transpiración en la misma parcela.

Para ello se calculó la relación entre los volúmenes anuales del escurrido cortical (y) de los árboles muestra y la sección normal de los mismos (x), para cada especie, mostrando relaciones curvilíneas, que se adaptaron mejor a los modelos potenciales de la forma  $y = a \cdot x^b$ , seleccionados desde el punto de vista de la máxima  $R^2$ , después de haber probado varios modelos, los resultados se pueden observar en la Tabla. 3-7.

Tabla. 3-7. Valores de los coeficientes calculados para la relación entre el volumen de escurrido cortical anual (l) y la sección normal (cm<sup>2</sup>) para cada especie así como el valor del coeficiente de correlación.

	<i>E.arborea</i>	<i>I.canariensis</i>	<i>I.perado</i>	<i>L.azorica</i>	<i>M.faya</i>	<i>P.indica</i>
a	7,0830	0,0022	0,3448	0,2152	0,9523	0,0150
b	0,6739	2,4796	1,2055	1,3953	0,9708	1,8535
R <sup>2</sup>	0,94	0,99	0,99	0,91	0,92	0,92

Posteriormente se aplicaron las correspondientes relaciones a todos los árboles de las diferentes especies de la parcela siguiendo el procedimiento explicado en la Figura. 3-4,

obteniéndose los resultados resumen de la Tabla. 3-8. Se puede comprobar como un aumento en sección normal no guarda la misma relación que el mismo aumento proporcional de volumen anual de escurrido cortical para las diferentes especies; así por ejemplo un aumento de 10 veces en sección normal (de 40 a 400 cm<sup>2</sup>) equivale a un aumento de volumen de escurrido cortical de 4,7 veces para *E.arborea*, 301,7 veces para *I.canariensis*, de 16,1 veces para *I.perado*, de 24,8 veces para *L.azorica*, de 9,3 veces para *M.faya* y de 71,9 veces para *P.indica*. Como se puede observar hay especies en las que el aumento de escurrido cortical en relación con el aumento de sección normal es menor como el caso de *E.arborea* o muchísimo mayor como el caso de *I.canariensis*.

Tabla. 3-8. Volumen anual de escurrido cortical por área de parcela y contribución de cada especie a éste (l m<sup>-2</sup>), y escurrido cortical como porcentaje de la precipitación total (%).

	<i>E.arborea</i>	<i>I.canariensis</i>	<i>I.perado</i>	<i>L.azorica</i>	<i>M.faya</i>	<i>P.indica</i>	Parcela
l m <sup>-2</sup>	9,00	1,05	0,36	14,32	10,26	7,87	42,86
%	1,44	0,17	0,06	2,29	1,64	1,26	6,85

### 3.3.2.3. EXTRAPOLACIÓN CON BASE EN EL CÁLCULO DE LOS COEFICIENTES DE ESCURRIDO CORTICAL.

Para cada uno de los árboles muestra, de las especies de la parcela, se calculó el coeficiente de escurrido cortical como el coeficiente de regresión (mm l<sup>-1</sup>) entre la precipitación total semanal (*x*) y el escurrido cortical semanal (*y*) de acuerdo con Navar (1993) mediante un modelo lineal. Las estadísticas para los coeficientes del escurrido cortical se muestran en la Tabla 3-9. Podemos observar altos valores para los coeficientes de correlación, con una baja desviación típica, lo que indica que los cinco árboles muestra de cada especie tuvieron buenos ajustes. El escurrido cortical anual para toda la parcela fue de 126,75 l m<sup>-2</sup>, calculado al aplicar estos coeficientes y se obtuvo al sumar el calculado para cada especie, como se puede observar en la Tabla 3-9, donde también se representan los porcentajes de escurrido cortical respecto de la precipitación anual total. Los coeficientes son más altos que los obtenidos por Navar que oscilaron entre 0,087 y 0,305 para los eventos de precipitación natural. Los coeficientes de escurrido cortical se sometieron también al análisis de varianza sin obtener diferencias significativas (*p* ≤ 0,05), como se observa en la Tabla 3-9 producido por las grandes desviaciones típicas encontradas para los coeficientes de escurrido, posiblemente debido a la alta variabilidad intraespecífica del diámetro normal de los árboles muestra.

Tabla. 3-9 Estadísticas para los coeficientes de escurrido cortical (CEC), coeficientes de correlación (*R*<sup>2</sup>), y errores estándares de los coeficientes de escurrido cortical (CEC ES); y volúmenes de escurrido cortical (l m<sup>-2</sup>) calculado por unidad de área y especie y EC como porcentaje de la precipitación total (%).

		<i>E.arborea</i>	<i>I.canariensis</i>	<i>I.perado</i>	<i>L.azorica</i>	<i>M.faya</i>	<i>P.indica</i>	Parcela
CEC	Media	0,447	0,975	0,334	1,129	1,860	2,189	
	<i>d</i> <sup>n-1</sup>	0,120	0,884	0,333	0,904	0,895	1,682	
<i>R</i> <sup>2</sup>	Media	0,924	0,873	0,886	0,867	0,858	0,880	
	<i>d</i> <sup>n-1</sup>	0,033	0,018	0,020	0,019	0,035	0,028	
CEC ES	Media	0,018	0,052	0,018	0,057	0,097	0,116	
	<i>d</i> <sup>n-1</sup>	0,009	0,048	0,019	0,045	0,039	0,098	
l m <sup>-2</sup>		12,90	2,50	0,67	45,04	33,31	32,34	126,75
%		2,06	0,40	0,11	7,19	5,32	5,17	20,25

### 3.3.2.3. EVALUACIÓN DE LOS MÉTODOS UTILIZADOS Y COMPARACIÓN CON OTRAS CUBIERTAS.

A la hora de comparar, se debe de prestar atención a la referencia espacial del escurrido cortical, bien, en el primer método el área de proyección de la copa y en el resto el área de la parcela. Para la laurisilva de Agua García, se da una gran superposición de copas debida a su alta densidad arbórea y alto LAI por lo que utilizando el primer método los valores están infraestimados.

Al comparar los otros tres métodos utilizados, observamos que los volúmenes anuales de escurrido cortical calculados mediante el uso de los coeficientes de escurrido cortical son los más altos, esto puede ser debido a que dichos coeficientes, además de estar relacionados con la especie, lo están con el diámetro normal del árbol muestra y los árboles elegidos no representan la distribución de clases dentro de la parcela, estando representados los diámetros normales más frecuentes del mismo modo que los menos frecuentes (árboles con grandes  $D_n$  en nuestro caso); de este modo si estimamos el volumen de escurrido cortical anual con base en estos coeficientes medios, obtenemos un valor sobrestimado por el coeficiente de los árboles mayores, en cuanto a diámetro normal.

La diferencia entre los métodos de Crockford y Richardson (1987, 1990a) y del método utilizado por el D.V.W.K. (1992) es menor del 7,5%, la diferencia que existe entre estos dos métodos estriba en que el primero de ellos incluye la proporción específica de área basimétrica dentro de la parcela. Así debido al muestreo utilizado, a las características estructurales de la parcela estudiada y al conocimiento de la proporción específica de las áreas basimétricas, es preferible la utilización del método empleado por Crockford y Richardson (1987, 1990a). No obstante hemos podido comprobar el tipo de relación existente entre las secciones normales y los volúmenes de escurrido cortical, por lo que el método anteriormente citado puede infraestimar o sobrestimar volúmenes con relación a como se halle repartida esta área basimétrica entre los efectivos de una especie; es por ello por lo que nos decantamos por el método de las regresiones anuales entre la sección normal y el escurrido cortical, que da como resultado  $42,9 \text{ l m}^{-2}$  representando un 6,85% de la precipitación total anual, disminuyendo de este modo el valor de los otros dos métodos de cálculo basados en las secciones normales.

Los valores encontrados en la bibliografía para diferentes bosques del mundo se pueden observar en la Tabla 3-10, para los bosques tropicales el porcentaje de escurrido cortical sobre la precipitación toma los valores en una amplia gama 0,1-12,2%, pero comúnmente no son mayores que 3%. En los árboles y arbustos de desierto el escurrido cortical como porcentaje de precipitación toma, igualmente, una amplia gama de valores, que varía entre 0,76-10,6%, siendo, sin embargo, la mayoría de ellos mayores del 5%. En los bosques templados el escurrido cortical se ha registrado para la mayoría de las cubiertas de coníferas, donde la gama de valores fluctúa entre 0,5-10%, con la excepción para parcelas de *Picea sitchensis*, donde el porcentaje de escurrido cortical puede alcanzar 33%, y una parcela de *P.nigra* con 12,3%; finalmente el porcentaje medio de escurrido cortical es alto en las cubiertas de frondosas, donde los valores oscilan entre 3-7%.

A la hora de la comparación de los valores se plantean grandes inconvenientes ya que en algunos trabajos no se reseña la metodología utilizada para el cálculo del escurrido cortical. La variabilidad existente en los valores de escurrido cortical toma un amplio rango, aún tratándose del mismo tipo de bosque o incluso de especie. Esta variabilidad es producida tanto por las diferencias en los valores de precipitación anual como por la morfología de las especies, la estructura del bosque y la posición topográfica del mismo. A pesar de esta variabilidad podemos observar que en términos relativos la laurisilva de Agua García se encuentra en el rango de las formaciones boscosas estudiadas, con un valor relativamente alto y asemejándose a los bosques de nieblas y los bosques templados de frondosas, si bien en ellos las precipitaciones fueron mucho más altas. Dada la variabilidad que existe para los

diferentes bosques del mundo, es de esperar que esta variabilidad también se encuentre para las diferentes formaciones de laurisilva canaria que divergen en composición de especies, estructura y condiciones topográficas, por lo que no se puede tomar este valor como representativo de la laurisilva canaria, mientras no se realicen este tipo de estudios en otras zonas donde se desarrolla esta formación boscosa.

Tabla. 3-10 Porcentaje de escurrido cortical, precipitación total anual, lugar y tipo de vegetación para algunos tipos de cubiertas boscosas del mundo. (1) Media de tres años. (2) 2 sitios diferentes. (3) Valor calculado a partir de las diferentes especies. (4) EC por APC (5) Media anual de precipitación. (6) Media de dos años. (7) % para cada arbusto estudiado. (8) Observaciones de 8 meses extrapoladas al total anual. (9) observaciones de 163 días. (10) Observaciones de 18 meses. (11) Observaciones de dos periodos de menos de 9 meses. (a) Referencias citadas por Lima (1987).

Autor	Vegetación	Lugar	Prec. mm	% EC de la Prec.
Jackson (1971)	Bosque tropical	Tanzania	1340	0,9
Edwards (1982)	Bosque tropical	Nueva Guinea	3800	<1
Mamanteo y Veracion (1985)	Bosque tropical	Filipinas	3945	12,2
Hewirtz (1986)	Bosque tropical	Australia	7787	13,6 (4)
Lloyd y Marques (1988)	Bosque tropical	Brasil	2721	3,3
Sinun <i>et al.</i> (1992)	Bosque tropical	Malasia	3103	1,85
Strigel <i>et al.</i> (1994)	Bosque tropical secundario	Indonesia	2465	1,0
Strigel <i>et al.</i> (1994)	Bosque tropical secundario	Indonesia	2030	0,6
Veneklaas y van Ek (1994)	Bosque tropical	Colombia	1453	0,1
Weaver (1972) (8)	Bosque de nieblas	Puerto Rico	5400	5,1
Weaver (1972) (8)	Bosque de nieblas	Puerto Rico	4800	9,6
Weaver (1972) (8)	Bosque de nieblas	Puerto Rico	6000	2,8
Steinhard (1979)	Bosque de nieblas	Venezuela	1575	1,0
Martínez-Meza (1996)	arbustos de desierto	México	230 (5)	5,4-10-11 (7,4)
Navar (1993)	arbustos y árboles semiáridos	México	720 (5)	0,8-1,0-5,1 (7)
Gash y Stewart (1977)	Bosque de <i>Pinus pinaster</i>	Reino Unido	595	1,5
Ford y Deans (1978)	Bosque de <i>Picea sitchensis</i>	Reino Unido	1639	27
Ibrahim (1979) (1)	Bosque de <i>Pinus pinea</i>	Francia	769 (1)	2,6 (1)
Andersson y Pyatt (1986)	Bosque de <i>Picea sitchensis</i>	Reino Unido	1037	13
Andersson y Pyatt (1986)	Bosque de pino Lodgpole	Reino Unido	1037	10
Andersson y Pyatt (1986)	Bosque de <i>Picea sitchensis</i>	Reino Unido	997	1
Wheather <i>et al.</i> (1987)	Bosque de <i>Picea abies</i>	Reino Unido	30	6,7
Wheather <i>et al.</i> (1987)	Bosque de <i>Picea abies</i>	Reino Unido	155	7,8
Crockford y Richardson (1990a)	Plantación de <i>Pinus radiata</i>	Australia	679 (1)	11,2
Johnson (1990)	Bosque de <i>Picea sitchensis</i>	Reino Unido	2200 (5)	3
Teklehaimanot & Jarvis (1991)	Bosque de <i>Picea sitchensis</i>	Reino Unido		9-15-24-33
Kelliher <i>et al.</i> (1992)	Plantación de <i>Pinus radiata</i>	Nueva Zelanda	1154 (9)	6
Loustau <i>et al.</i> (1992)	Plantación de <i>Pinus radiata</i>	Francia	1354 (10)	1-6
Neary y Gizyn (1994)	Bosque de coníferas	Canada	1047 (6)	2
Domingo <i>et al.</i> (1994)	Plantaciones de <i>Pinus sp.pl.</i>	España	650	11,8 (3)
Viville <i>et al.</i> (1993)	Bosque de <i>Picea abies</i>	Francia	1400 (5)	1
Taniguchi <i>et al.</i> (1996) (2)	Bosque de <i>Pinus densiflora</i>	Japón	1290,5	0,5-1,2
Brookes y Turner (1964) (a)	Bosque <i>Eucalyptus regnans</i>	Australia		2,5
Smith (1974) (a)	Bosque de Eucaliptos	Australia		0,4
Lima (1976) (a)	Plant. <i>Eucalyptus saligna</i>	Brasil		4,2
Duncan <i>et al.</i> (1978) (a)	Bosque <i>Eucalyptus regnans</i>	Australia		4,3
Duncan <i>et al.</i> (1978) (a)	Bosque <i>Eucalyptus regnans</i>	Australia		5,3
Duncan <i>et al.</i> (1978) (a)	Bosque de Eucaliptos	Australia		1,3
Westman (1978) (a)	Bosque <i>Eucalyptus signata</i>	Australia		13
Westman (1978) (a)	Bosque <i>Eucalyptus umbra</i>	Australia		3
Gosh <i>et al.</i> (1978)	Plant. <i>Eucalyptus tereticornis</i>	India		7,7
Feller (1981)	Bosque <i>Eucalyptus regnans</i>	Australia		7
Feller (1981)	Bosque <i>Eucalyptus obliqua</i>	Australia		0,5
Dunin <i>et al.</i> (1988)	Bosque de Eucaliptos	Australia	971	2,5
Crockford y Richardson (1990a)	Bosque de Eucaliptos	Australia	679 (1)	4,8
Gras (1993)	Plant. <i>Eucalyptus globulus</i>	España		6,7
Aussenac (1968)	Bosque de <i>Fagus sylvatica</i>	Francia		7
Neal <i>et al.</i> (1993)	Bosque de <i>Fagus sylvatica</i>	Reino Unido	63,6	3,9
Durocher (1990)	Bosque de <i>Quercus rubra</i>	EE.UU:	24	2,5
Neary y Gizyn (1993)	Bosque de frondosas	Canada	1047 (6)	3

### 3.3.3. EL ESCURRIDO CORTICAL Y LA CANTIDAD DE PRECIPITACIÓN SEMANAL.

#### 3.3.3.1. CORRELACIONES SEMANALES

Es posible establecer una relación entre la cantidad semanal de esgurrado cortical para la toda la parcela ( $y$ ) y la precipitación total semanal ( $x$ ). Ésta relación siguió un modelo lineal con un valor para la pendiente de 0,113, como podemos ver en la Figura. 3-5. Este valor es mayor que el encontrado por Ibrahim (1979) en el bosque de *Pinus pinea* (0,032).

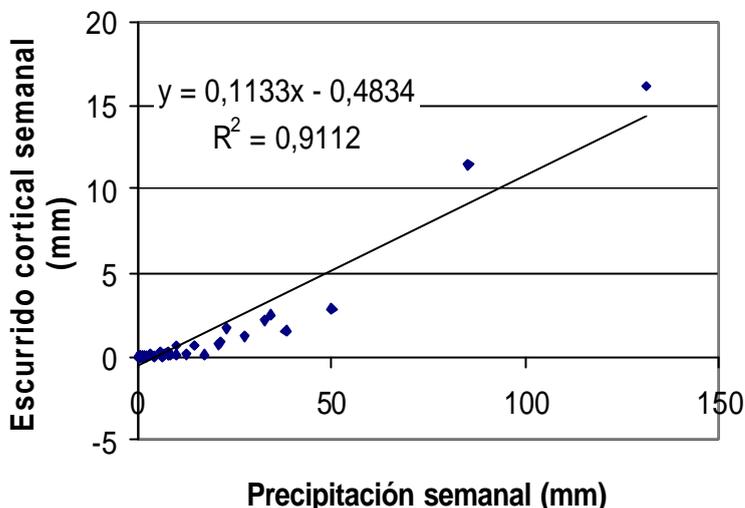


Fig. 3-5 Relación entre la precipitación total semanal (mm) y el esgurrado cortical para la parcela (mm) durante el año de medida, obtenido mediante las regresiones semanales de la sección normal y el esgurrado cortical.

Se calculó para cada semana el esgurrado cortical para la parcela como porcentaje de la precipitación total, estos valores se representaron respecto de la precipitación total, mostrando relaciones curvilíneas, que se adaptaron mejor a los modelos logarítmicos, seleccionados desde el punto de vista de la máxima  $R^2$ , después de haber probado varios modelos. Estas repuestas son curvilíneas desde el inicio, el máximo esgurrado cortical ocurre sólo después de que la cubierta ha llegado a ser saturada, como fue descrito por Crockford y Richardson (1990a), la curva se aproxima a su nivel de saturación después de un umbral de precipitación en el que el esgurrado cortical comienza a ser canalizado. El umbral fue diferente para cada especie (Figura. 3-6), no llegando éstas curvas a ser asintóticas, adquiriendo una suave pendiente para el esgurrado cortical aproximadamente en los siguientes valores: para *E.arborea* 1,6%, para *I.canariensis* 0,2%, para *I.perado* 0,06%, para *L.azorica* 2,8%, para *M.faya* 1,6% y para *P.indica* 2,0%. Para todo el bosque de laurel (datos acumulativos de cada especie) se aproxima al nivel de saturación en el 9%. Este valor es comparable al registrado por Crockford y Richardson (1990a) en que ocurría para un valor del 11,0% para *Pinus radiata*, estos mismos autores encontraron curvas con una asíntota a 5,5% para un bosque de eucaliptos.

Analizando en mayor detalle los datos de la Figura. 3-6, observamos que la producción de esgurrado cortical por los árboles de cada especie requiere de una cierta cantidad de precipitación previa, suficiente para que moje las copas de los árboles de cada especie. Para los árboles muestra de *E.arborea* se produjo esgurrado cortical después de 1,2 mm de precipitación semanal, *I.canariensis* 1,3 mm, *I.perado* 1,0 mm, *L.azorica* 1,4 mm, *M.faya* 1,1 mm y para *P.indica* 1,1 mm. Datos en consonancia con el 1,8 mm registrado por Sinun *et al.* (1992) en un bosque lluvioso de Malaysia, el 1,3-1,8 mm registrado por Martínez-Meza y Whitford (1996) para tres de arbustos *Larrea tridentata*, *Prosopis glandulosa* y *Flourensia cernua* en el desierto de Chihuahua en México, el 1,5 por Pressland (1973) para *Acacia neura* en la zona suroccidental de Queensland en Australia o con el 1-2 mm registrado por Enright (1987) para *Rhopalostylis sapida* en el sur de Nueva Zelanda. No obstante este cálculo no representa la capacidad de saturación del esgurrado cortical  $S_t$ , que será calculada en el

capítulo 6, debido a que su cálculo no se basa en conversiones logarítmicas y requiere de datos diarios o basados en eventos y estos datos se basan en recogidas semanales.

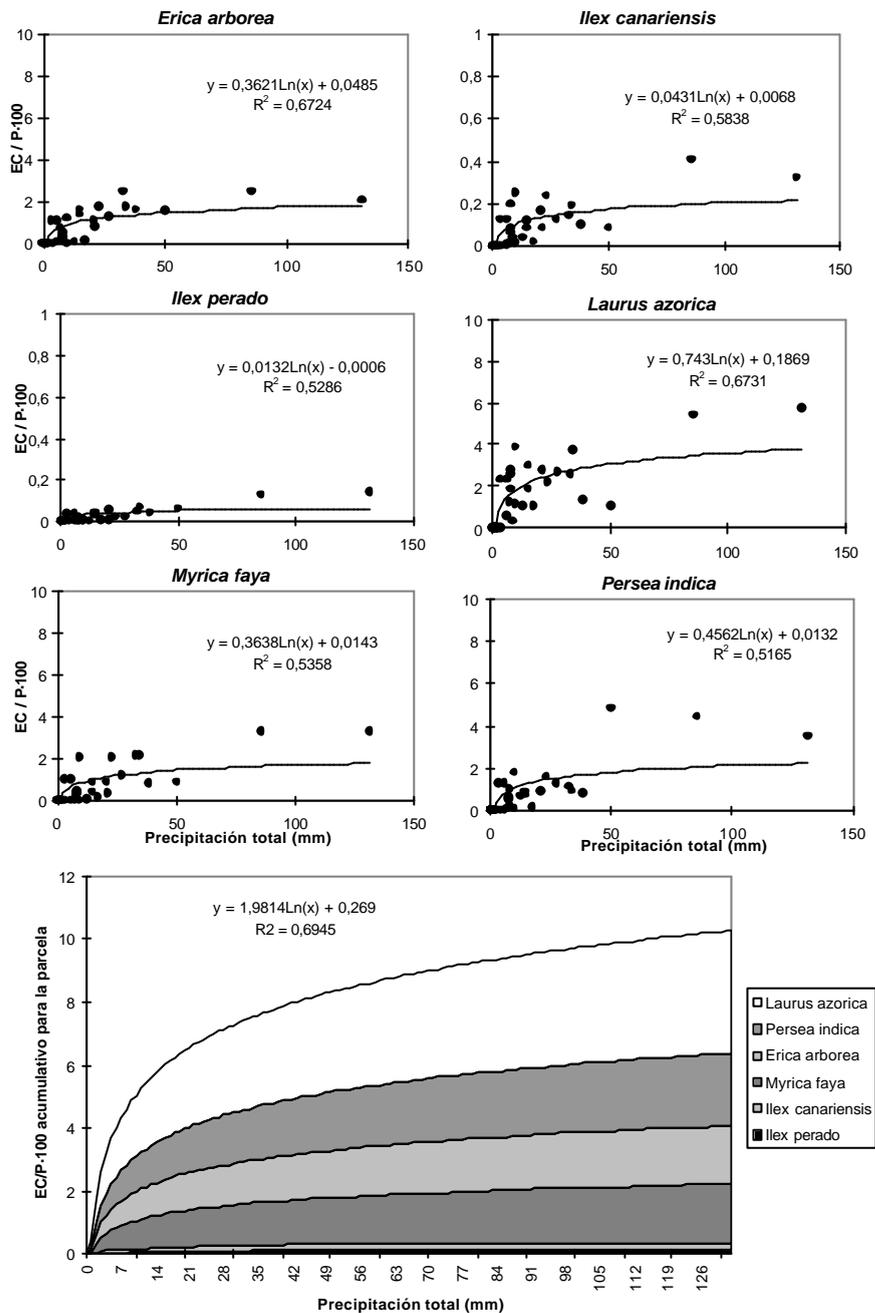


Fig. 3-6 Relación semanal entre el escurrido cortical como porcentaje de la precipitación (EC/P-100) y la precipitación total (mm) para las seis especies estudiadas y el valor acumulativo para la parcela, con sus respectivas ecuaciones de ajuste y coeficientes de correlación para cada especie.

### 3.3.4. VARIACIÓN DEL ESCURRIDO CORTICAL ENTRE ESPECIES

Se proponen dos formas para comparar los volúmenes de escurrido cortical entre especies, la primera de ellas basada en la estandarización por el área de proyección de la copa, y la segunda por la estandarización de la sección normal.

### 3.3.4.1. BASADAS EN LA ESTANDARIZACIÓN DEL ÁREA DE PROYECCIÓN DE LA COPA.

Para la relación semanal entre la precipitación total ( $x$ ) y el esgurrido cortical por la proyección del área de la copa para cada especie ( $y$ ), durante el año estudiado, se obtuvieron las siguientes líneas de regresión para cada especie, basado en los árboles muestra (Figura. 3-7). Estos resultados fueron similares a los registrados por Taniguchi *et al.* (1996) para dos parcelas de *Pinus densiflora*, en las que se encontró la misma relación; sus ecuaciones tenían pendientes entre 0,0136 y 0,0061, menores que las encontradas en la parcela del bosque de laurisilva que osciló entre 0,0455 y 0,0962.

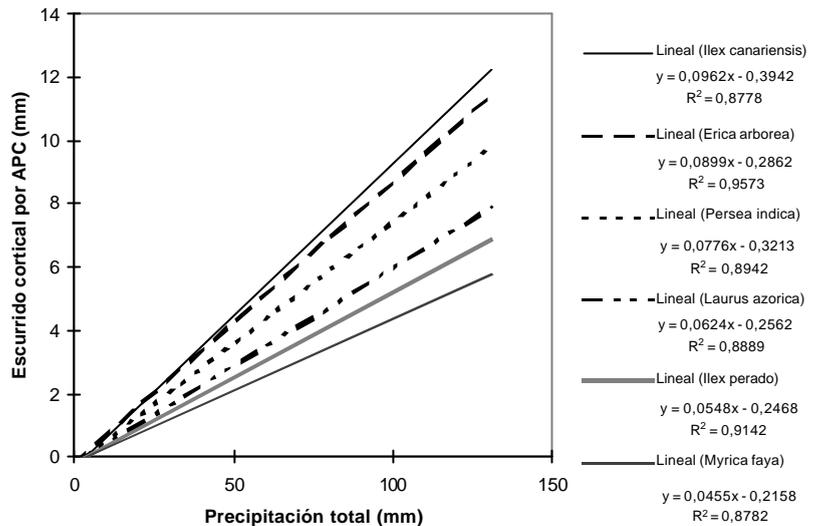


Fig. 3-7 Relación semanal entre el volúmen de esgurrido cortical por APC (mm) y la precipitación total (mm) para las seis especies estudiadas, con sus respectivas ecuaciones de ajuste y coeficientes de correlación para cada especie

Se calculó el esgurrido cortical por APC como el porcentaje de precipitación total para cada semana, estos valores se representaron respecto a la precipitación total de cada semana, mostró relaciones curvilíneas, que se adaptaron mejor a los modelos logarítmicos, seleccionados con base en el máximo  $R^2$ , tras probar su ajuste a varios modelos de regresión. Estas relaciones fueron curvilíneas desde el inicio, ya que el máximo esgurrido cortical ocurre sólo después de que la cubierta ha llegado a ser saturada, como ha sido descrito por Enright (1987) y Martínez-Meza y Whitford (1996) (Figura. 3-8), de nuevo las curvas no llegaron a ser asintóticas adquiriendo una suave pendiente para los valores aproximados siguientes: para *E.arborea* 7,4%, para *I.canariensis* 6,8%, para *I.perado* 3,4%, para *L.azorica* 4,6%, para *M.faya* 2,6% y para *P.indica* 5,2%. Estos valores son comparables a los registrados por Martínez-Meza y Whitford (1996) para tres arbustos de desierto para los cuales la curva se hacía asintótica en 9,5% para *Larrea tridentata*, en 5% *Prosopis glandulosa* y en 10,2% para *Flourensia cernua*. Estos valores porcentuales de esgurrido cortical por PAC se corresponden con valores muy diferentes de precipitación total entre los 8 mm para *M.faya* y los 20 mm para *E.arborea*. Según Pressland (1973) esta tendencia puede atribuirse, en parte, al goteo desde el tronco y las hojas. Esta tendencia fue descrita igualmente por Martínez-Meza y Withford (1996), quienes encontraron la asintota para los arbustos de desierto a partir de 6 mm, estos autores sugirieron que una vez las ramas y la corteza están mojadas, algunas gotitas de agua caen directamente al terreno en vez de ser encauzadas a la base de los árboles.

Al observar la gráfica global de la Figura. 3-8 podemos concluir que para un área proyectada y una misma precipitación total la cantidad de esgurrido cortical es diferente según la especie existiendo una gradación de valores de mayores a menores: *E.arborea* > *I.canariensis* > *P.indica* > *L.azorica* > *I.perado* > *M.faya*. Lógicamente ésto se puede explicar por la morfología de las especies, como se discutirá más adelante.

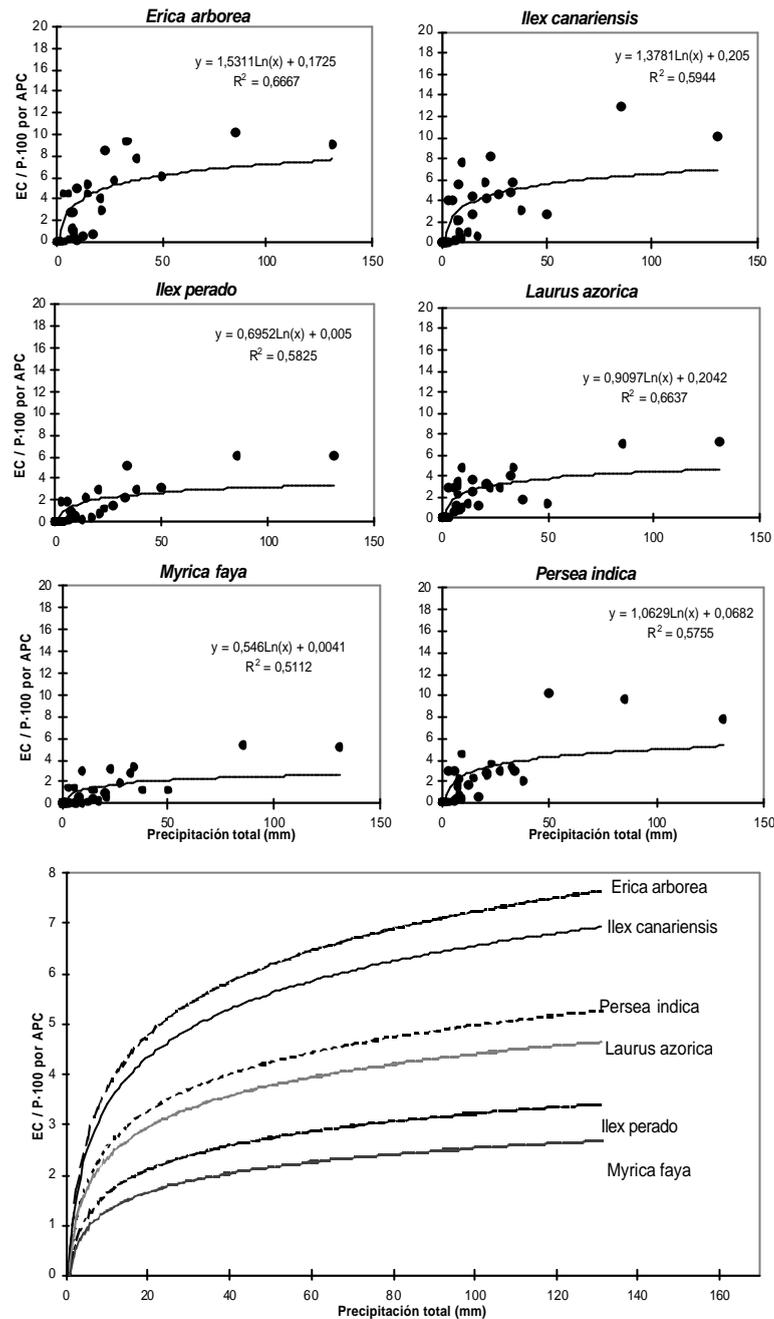


Fig. 3-8 Relación semanal, entre el escurrido cortical por APC como porcentaje de la precipitación total (EC/P:100 por APC) y precipitación total (mm) para las seis especies estudiadas, con sus respectivas ecuaciones de ajuste y coeficientes de correlación para cada especie, y la gráfica global con las curvas de las seis especies.

### 3.3.4.2. BASADO EN LA ESTANDARIZACIÓN DE LA SECCIÓN NORMAL.

Otra forma conveniente para comparar los volúmenes de escurrido cortical entre especies es el cálculo de la relación de encauzamiento ("*funneling ratio*") mediante la relación dada por Herwitz (1986), que es el mismo índice que el llamado factor de escurrido cortical dado por Crockford y Richardson (1987):

$$FR = EC / Sn P$$

donde  $FR$  es la relación de encauzamiento (adimensional),  $EC$  es el volumen de escurrido cortical (l),  $Sn$  es la sección normal ( $m^2$ ) y  $P$  es la cantidad de precipitación incidente (mm). Esta relación explica, que cuando las secciones normales se incluyen, la cantidad de escurrido cortical producida desde el punto de vista de la sección normal, está determinada por los parámetros morfológicos y meteorológicos mencionados en la introducción, y alguno de los analizados con anterioridad. La consideración de estos parámetros permitió la evaluación razonable de la potencialidad de la relación de encauzamiento de los árboles, como ha sido sugerido por Crockford y Richardson (1987,1990a) y Navar (1993).

Cuando el escurrido cortical excede al volumen de agua de lluvia que incide sobre la parte de la copa que se encuentra directamente por encima de la sección normal del tronco, significa que partes circundantes de la copa deben de contribuir con volúmenes de agua (Herwirt, 1986). Es posible aplicar esta relación a los árboles muestra, ya que para la sección normal se encontró mejor correlación que con el diámetro normal para la recogida de escurrido cortical, como se demostró con anterioridad.

En la Tabla. 3-11 se pueden observar los promedios y rangos de las relaciones de encauzamiento calculadas para el año estudiado para las seis especies de la parcela.

Tabla. 3-11 Relaciones de encauzamiento medias y rangos para las seis especies de la parcela

Especie	<i>E.arborea</i>	<i>I.canariensis</i>	<i>I.perado</i>	<i>L.azorica</i>	<i>M.faya</i>	<i>P.indica</i>
Media	22,83	42,47	14,18	28,54	12,70	34,12
Rango	18,66-26,43	13,65-70,70	11,00-17,40	10,80-37,81	10,62-15,74	7,6-49,4

Como se puede observar en la tabla esta relación es muy variable entre las diferentes especies, así por ejemplo, los valores de encauzamiento de *I.canariensis* son tres veces mayores que los de *M.faya*. Asimismo las relaciones de encauzamiento muestran diferencias significativas al aplicar una ANOVA de una vía, creandose dos grupos diferenciados tras la posterior aplicación de un test "ad hoc" (Tuckey HSD), estando el primero formado por *I.canariensis*, *L.azorica*, *P.indica* y *E.arborea* y el segundo por *M. faya*, *E.arborea* e *I.perado* ( $P \leq 0.05$ ), siendo estas diferencias atribuibles a las diferencias morfológicas entre estas especies. Estos valores son similares a los registrados por Crockford y Richardson (1987,1990a): 21,7 para *Eucalyptus rossii*, 4,7 para *Eucalyptus macrorhyncha*, 10,7 para *Eucalyptus mannifera*, 19,9 para el *Eucalyptus melliodora*, y 32,6 para una plantación de *Pinus radiata* y menores que las registrados por Herwitz (1986): 7-112 para *Balanops australiana*, 11 para *Cardwellia sublimis*, 20-33-100 para *Ceratopetalum virchowii*, 50 para *Elaeocarpus foveolatus* y 9 para *Elaeocarpus sp.*, o los registrados por Navar (1993): 58 para *Diopyrus texana* o 32 para *Prosopis laevigata* y *Acacia farnesiana*.

La Figura. 3-9 muestra la dinámica del comportamiento entre las relaciones de encauzamiento medidas como una función de la precipitación total semanal. El modelo logarítmico se eligió por tener el máximo valor de  $R^2$  de los modelos probados, la respuesta curvilínea es debida probablemente a que la cantidad de precipitación necesaria para mojar la cubierta permanece constante. Herwitz (1986) sugirió que la redistribución de agua (la relación de encauzamiento) es debida a la proyección del área de la copa, este hecho está de acuerdo con los resultados obtenidos para el modelo múltiple lineal desarrollado en este trabajo.

Pressland (1973) afirmó que los componentes de la cubierta, con características diferentes para cada especie, tienen que ser mojados antes de que ocurra la producción de escurrido cortical. La rugosidad de las cortezas podría explicar parte de las diferencias interespecíficas en el escurrido cortical, su influencia está explicada implícitamente por la relación de encauzamiento (Navar, 1993). De manera que especies con bajas relaciones de encauzamiento como sucede con *M.faya* y *E.arborea* que tienen el índice de rugosidad más alto, promediando 1,5 y 1,3 respectivamente, indican la presencia de una corteza áspera y gruesa. El resto de las especies estudiadas tienen la corteza delgada y lisa con índices de rugosidad menores de 1,1 por lo que tienen la relación de encauzamiento mayor.

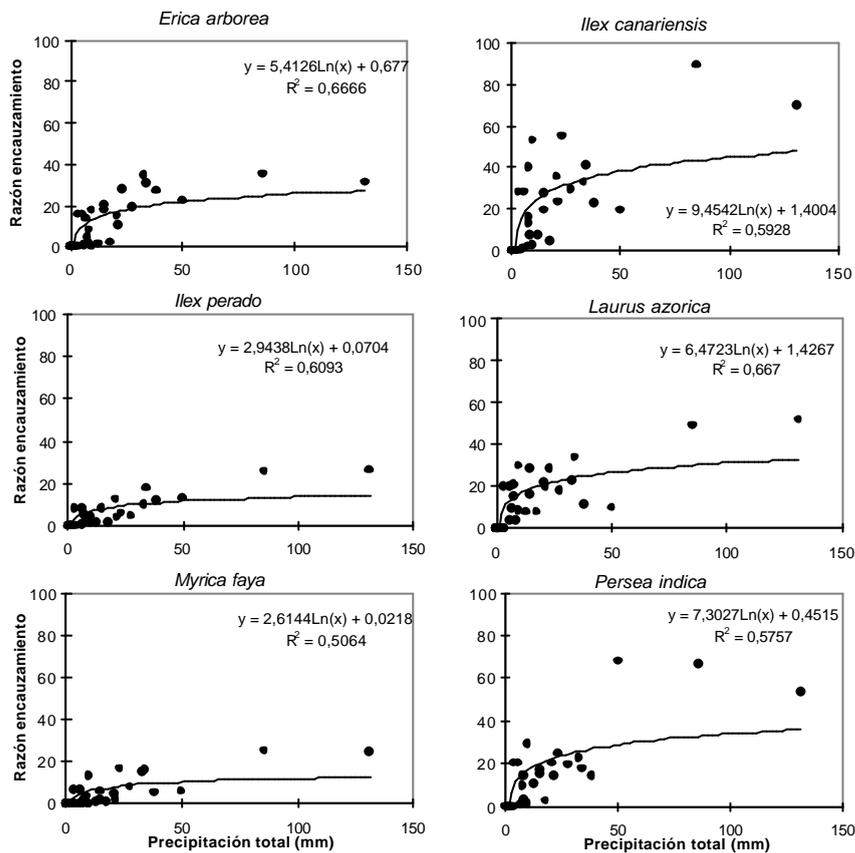


Fig. 3-9 Relación semanal entre la razón de encauzamiento (F.R.) y la precipitación total semanal (mm) para las seis especies estudiadas, con sus respectivas ecuaciones de ajuste y coeficientes de correlación para cada especie.

*M.faya* genera muy poco escurrido cortical para sucesos menores de 30 mm, debido a que tiene la corteza áspera corchosa, que absorbe mucha agua sin producir escurrido cortical hasta que se satura; no obstante para grandes cantidades de precipitación los escurridos corticales se acercan a los de otras especies. Un suceso análogo fue descrito por Crockford y Richardson (1987, 1990a) para *Eucalyptus macrorhyncha*, y por Mulchanov (1963) que observó que la variación interespecífica de escurrido cortical entre especies de diferente rugosidad de la corteza llega a ser menor con un aumento de cantidad de precipitación. La explicación fue dada por Navar (1993) que afirmó que el goteo de las ramas disminuye con un aumento de la cantidad de precipitación, ya que cuando las ramas llegan a estar mojadas aumenta la adherencia favoreciendo el flujo. Realmente, esto sugiere que después de un umbral de precipitación, también las ramas con corteza áspera encauzarían el flujo por las mismas de manera eficiente.

Para *I.perado*, es posible que el gran ángulo que forma el tronco con las ramas, que sitúan prácticamente en la horizontal (cerca de 90°, incluso 100°) sea el factor principal para su bajo valor de la relación de encauzamiento, de acuerdo con lo estipulado por Crockford y Richardson (1987,1990a), Navar (1993) y Martínez-Meza (1996) que sugirieron que los volúmenes

de escurrido cortical recogidos eran mayores en plantas con ramas orientadas hacia arriba que con las ramas orientadas horizontalmente. Otras especies de acuerdo con Morales *et al.* (1996b) como *P.indica* y *L.azorica* tienen ángulos usualmente de 20-30° y de 50° mientras que en *E.arborea* tiene ángulos cercanos a 30°.

Comparando los valores obtenidos por ambos métodos de estandarización, observamos que mientras para cinco de las especies se manifiesta un orden y proporciones similares, en el caso de *E.arborea* este hecho no ocurre. Esto nos hace suponer que las relaciones entre la proyección del área de la copa y el diámetro normal se mantienen más o menos constantes, excepto para la *E.arborea* a la que pequeñas proyecciones de área de copa le corresponden grandes diámetros normales, sugiriendo que las características morfológicas de esas copas favorecen la captación y canalización del escurrido cortical. Entre estas características destaca al tener unas hojas muy pequeñas en comparación con las otras especies y el consiguiente aumento de la ramificación terminal (Morales *et al.*, 1996b), así como el alto ángulo con la horizontal de sus ramas principales.

### 3.3.4.3. EFECTO DE LOS PARÁMETROS METEOROLÓGICOS SOBRE LAS RELACIONES DE ENCAUZAMIENTO.

Como podemos ver cuando examinamos la relación entre el escurrido cortical y la cantidad de precipitación total, diferentes cantidades semanales de precipitación total pueden generar cantidades similares de escurrido cortical semanal y viceversa.

Los modelos lineales múltiples se desarrollaron para examinar los efectos de parámetros meteorológicos sobre las relaciones de encauzamiento. Los modelos tienen valor para pronósticos y para explicar desde el punto de vista de los parámetros meteorológicos la causa de variación de la relación de encauzamiento. Ya que fueron encontradas diferencias significativas para las relaciones de encauzamiento entre el conjunto de especies anteriormente descrito formado por *E.arborea* (*E.a*), *I.canariensis* (*I.c*), *L.azorica* (*L.a*) y *P.indica* (*P.i*) y el conjunto formado por *E.arborea* (*E.a*), *M.faya* (*M.f*) e *I.perado* (*I.p*), se analizaron ambos conjuntos de modo individual.

Las variables introducidas en el análisis fueron tomadas semanalmente durante el año de investigación, y fueron las siguientes: lluvia media, max. y min. diaria; temperatura media, max. y min. durante la lluvia y durante la semana; nº de horas de lluvia durante la semana, intensidad de la lluvia media, max. y min.; radiación media, max. y min. durante la lluvia y durante la semana; humedad media, max. y min. durante la lluvia y durante la semana; y por último velocidad del viento media, max. y min. durante la lluvia y durante la semana. El procedimiento fue efectuar regresiones simples con todas las variables y entre las mismas (para evitar la colinealidad), estas variables para ser incluidas en el modelo tenían que ser significativas para una  $p \leq 0,05$ , las relaciones estadísticas que surgieron se pueden observar en la Tabla. 3-12. Los errores estándares de la estimación tuvieron una gama de valores, entre 4,73 y 9,68, grandes desviaciones estándar significan un amplio rango para una variable.

Tabla. 3-12 Algunos modelos lineales desarrollados para las relaciones de encauzamiento y los parámetros meteorológicos (Intensidad media en mm/hora).

Modelo	Variables	$R^2$	SEE	Coeficientes		Coef. Típico	Sign F
				a	b		
<i>E.a+I.p+M.f</i>	Intensidad media hor.	0,59	4,73	-1,249	2,251	0,766	0,0005
<i>E.a+I.c+L.a+P.i</i>	Intensidad media hor.	0,57	9,68	0,818	4,373	0,750	0,0008

El mejor modelo lineal para la razón de encauzamiento en ambos conjuntos citados anteriormente, fue el de intensidad media de la lluvia que absorbió el 59% de la variación ( $R^2 =$

0,59), para *E.arborea*, *M.faya* e *I.perado* y 57% de la variación ( $R^2 = 0,57$ ) para *I.canariensis*, *L.azorica*, *P.indica* y *E.arborea*.

El modelo explica que cuanto más alta sea la intensidad media horaria de la lluvia durante la semana, más alta será la cantidad de agua encauzada por el tronco de todas las especies, probablemente debido a que se llegue al nivel de saturación anteriormente descrito, ya que en el caso contrario, es decir, el de baja intensidad media horaria, el nivel de saturación no se alcance en cada evento, o ni siquiera se alcance en cada evento la cantidad de lluvia previa anteriormente descrita. Esto está en consonancia con Crockford y Richardson (1987, 1990a) que enunciaron que cuando la lluvia era continua e intensa la cantidad recogida de escurrido cortical aumentaba. El mismo comportamiento fue descrito por Navar (1993) para *Diospyrus texana* la cual presentaba una adaptación a súbitos eventos de lluvia de corta duración, propios del desierto, presentando un encauzamiento para este tipo de lluvia mejor que para precipitaciones largas de baja intensidad.

Estos resultados muestran que la velocidad del viento no influye significativamente en la variación de la relación de encauzamiento semanal, a pesar de que este parámetro influye en el ángulo de la lluvia que es un factor importante en la variación del escurrido cortical según Crockford y Richardson (1987, 1990a) sobre el tipo de evento de lluvia.

### 3.3.5. DISTRIBUCIÓN DEL ESCURRIDO CORTICAL ALREDEDOR DEL TRONCO (ÁREA DE INFILTRACIÓN).

Como ya se mencionó existe una capacidad para cada especie de hacer una redistribución de la precipitación al recoger grandes volúmenes de agua que se concentran en el área adyacente al tronco. Este área aumenta logarítmicamente respecto al diámetro de tronco según Tanaka *et al.* (1991), el radio del área de infiltración, se calculó según la relación empírica dada por estos autores, los resultado de este cálculo se muestran en la Tabla. 3-13.

Tabla. 3-13. Áreas de infiltración de los árboles muestra y cantidades anuales de EC estimadas totales para la zona circundante a los troncos para los árboles muestra.

	Área de infiltración de la muestra (cm <sup>2</sup> )	Cantidad de EC estimado alrededor del tronco (l/m <sup>2</sup> ) muestra
<i>E.arborea</i>	3.446,9	2.960,3
<i>I.canariensis</i>	2.770,7	7.003,8
<i>I.perado</i>	2.487,3	2.328,2
<i>L.azorica</i>	4.122,2	5.564,3
<i>M.faya</i>	7.223,9	4.849,6
<i>P.indica</i>	5.320,4	7.975,0

Estos resultados nos permiten comparar la magnitud de esta redistribución, que permite concentrar los 624 mm anuales de precipitación sobre la parcela en valores tan altos como los 7.975 mm alrededor de los árboles muestra de *P.indica*, lo que supone un factor de concentración de 12,8 veces, mostrando de este modo el efecto de embudo que se produce en las copas de los árboles.

## 3.4. CONCLUSIONES.

- El parámetro de la cubierta más determinante en las cantidades de escurrido cortical anual es la área de proyección de la copa, además se crea una competencia entre distintos árboles, haciendo que el árbol dominante capte mayores volúmenes de agua.
- El método de cálculo de escurrido cortical para la parcela que más se adapta al bosque estudiado es el de las regresiones anuales entre la sección normal y el escurrido cortical.

- Existe un valor para la saturación de la cubierta respecto al escurrido cortical que varía entre especies, así mismo existe un valor de precipitación previa necesaria para la producción de escurrido cortical que varía igualmente entre las especies.
- Se encuentran diferencias entre los volúmenes de escurrido cortical entre especies, producidos por diferencias morfológicas como la rugosidad del tronco y ramas o el ángulo de las ramas respecto a la horizontal, lo que se traduce en diferentes relaciones de encauzamiento con valores medios de *E.arborea* 22,8, *I.canariensis* 42,5, *I.perado* 14,2, *L.azorica* 28,5, *M.faya* 12,7 y *P.indica* 34,1.
- La intensidad media de la precipitación es un factor determinante en la cantidad de escurrido cortical recogido
- Existe una alta magnitud de concentración de la precipitación por medio del escurrido cortical que llega a superar el valor de 13 veces.
- El orden de las especies para las cantidades anuales de escurrido cortical al nivel de parcela son las mismas que para el área basimétrica a excepción de *M.faya*, esto se puede explicar por la igualdad en la capacidad de encauzar agua del resto de las especies observada con la ANOVA de las relaciones de encauzamiento, de forma que si no hay diferencias entre especies la cantidad de agua que aportan depende del área basimétrica.

### 3.5. BIBLIOGRAFÍA

- Adlar, P.G. 1974. Delopment of an empirical competition model for individual trees within a stand. Gowth Models for tree and stand simulation. IUFRO working party, S4.01-4. Proceedings of meetings in 1973. Ed. J. Fries, Stockholm, 22-37.
- Anderson, A.R. & Pyatt, D.G., 1986. Interception of precipitation, by pole-stage, Sitka spruce and lodgepole pine and mature Sitka spruce at Kielder forest, Northumberland. *Forestry*, 59(1):29-38.
- Aussenac, G. 1968. Interception des précipitations par le couvert forestier. *Ann. Sci. Forest.* 25(3):135-156.
- Bañares, A. & Barquín, E. 1982. Arboles y arbustos de la laurisilva gomera. Goya Ediciones S/C de Tenerife.
- Busgen, M. 1929. The structure and Life of the forest Trees, 3rd revised and enlarged edn. (Translation into english by Thompson) John Wiley, New York.
- Clements, J.R. 1971. Evaluating summer rainfall through a multi-storied largetooth aspen community. *Can J. For. Res.* 1:165-184.
- Crabtree, R.E. & Trudgill, S.T. 1985. Hillslope hydrochemistry and stream response on wooded, permeable bedrock: the role of stemflow. *J. Hydrol.* 80:161-178.
- Crockford, R.H. & Johnson M.E. 1983. Some errors in the measurement of precipitation, throughfall and stemflow and the implications for estimation of interception. *Hydrology and water Resources Symposium*, 1983, Hobart, 8-10 November.
- Crockford, R.H. & Richardson D.P. 1983. Some hydrological influences on vegetation. Technical Memorandum 83/18 September 1983. CSIRO Institute of Natural Resources and Environment, division of water resources research. Camberra.
- Crockford, R.H. & Richardson D.P. 1987. Factors affecting the stemflow yield of a dry sclerophyll eucalypt forest, a *Pinus radiata* plantation and individuals trees within a forests. Technical Memorandum 87/11 September 1987. CSIRO Institute of Natural Resources and Environment, division of water resources research. Camberra.
- Crockford, R.H. & Richardson D.P. 1990a. Partioning of rainfall in a eucalypt forest and pine plantation in south-easter Australia: II, Stemflow and factors affecting stemflow in a dry sclerophyll eucalypt forest and *Pinus radiata* plantation. *Hydrol. Process.* 4:145-155.
- Crockford, R.H. & Richardson D.P. 1990b. Partioning of rainfall in a eucalypt forest and pine plantation in south-easter Australia: III, Determination of the canopy storage capacity of a dry sclerophyll eucalypt forest. *Hydrol. Process.* 4:157-167.

- Domingo, F. Puigdefabregas, J. Moro, M.J. & Bellot J. 1994. Role of vegetation cover in the biogeochemical balances of a small afforested catchment in southeastern Spain. *J. Hydrol.* 159: 275-289.
- Dunin, F.X. O'Loughlin, E.M. & Reyenga, W. 1988. Interception loss from eucalypt forest: lysimeter determination hourly rates for long term evaluation. *Hydrol. Process.* 2:315:329.
- Durocher, M.G. 1990. Monitoring spatial variability of forest interception. *Hydrol. Process.* 4:215-229.
- DVWK (Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau), 1992. Determination of interception loss in forest stands during rain. Guidelines for water management N° 304.
- Edwards, P.J. 1982. Studies of mineral cycling in a montane rain forest in New Guinea. V. Rates of cycling in throughfall and litterfall. *J. Ecol.* 70:807-827.
- Enright, N.J. 1987. Stemflow as a nutrient source for nikau palm (*Rhopalostylis sapida*) in a New Zealand forest. *Aust. J. Ecol.* 12:17-24.
- Eschner, A.R. 1967. Interception and soil moisture distribution. In: *Forest Hydrology*, Sopper, W.E. and Lull, H.W. (Editors), Proceedings of the international Symposium, University Park, Pennsylvania, Aug-Sept 1965, Pergamon Press, Oxford /London /Edinburgh /New York /Toronto /Sydney/ Paris /Braunschweig, pp.191-200.
- Feller, M.C. 1981. Water balances in *Eucalyptus regnans*, *E.oblicua* and *Pinus radiata* forests in Victoria. *Aust. For.* 44: 153-161.
- Ford E.D: & Deans, J.D. , 1978. The effects of canopy structure on stemflow, throughfall and interception loss in a young Sitka spruce plantation. *J. Appl. Ecol.* 15(3): 905-917.
- Gash, J.H.C. & Stewart, J.B. 1977. The evaporation from Thetford forest during, 1975, *J. Hydrol.* 35:385-396.
- Gesper, P.L. & Holowaychuck, N. 1970. Effect of stemflow water on a Miami soil under beech tree:I. Morphological and Physical properties. *Soil Sci. Soc. Am. P.* 779-786.
- Gesper, P.L. & Holowaychuck, N. 1971. Some effects of stemflow from forest canopy trees on chemical properties of soils. *Ecology*, 52:691-702.
- Glover, P.E. Glover, J. & Gwynne, M.D. 1962. Light rainfall and plant survival in E.Africa. II Dry grassland vegetation. *J. Ecol.* 50:199-206.
- Gosh, R.C. Kaul, O.N. & Subba Rao, B.K. 1978. Some aspects of water relations and nutrition in Eucalyptus plantations. *Indian Forester*.
- Gras, J.M. 1993. Investigación sobre las relaciones hídricas en las plantaciones de *Eucalyptus globulus* en Galicia. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Superior de ingenieros de Montes. No publicada. 150 pp.
- Haworth, K. & McPherson, G.R. 1995. Effects of *Quercus emoryi* trees on precipitation distribution and microclimate in a semi-arid savana. *J. Arid Environ.* 31:153-170.
- Hewirtz, S.T. 1982. Tropical Rainforest influences on Rainwater Flux, Thesis (Ph.D.), Australian National University, Canberra, Australia, 263 pp.
- Hewirtz, S.T. 1986. Infiltration-excess caused by stemflow in a cyclone-prone tropical rainforest. *Earth Surf. Process. Landforms* 11: 401-412
- Hoover, M.D. Pison, D.F: & Greene, E.G. 1953. Soil moisture under a lonolly pine plantation. *Soil Sci. Soc. Am. P.* 17:147-150.
- Ibrahim M.M.1979 Recherche sur la dynamique et le bilan de l'eau d'un écosystème a pin pignon (*Pinus pinea* L.) sur sable dunaire Thèse présentée à l'Université des Sciences et Techniques du Languedoc pour obtenir le grade de Docteur d'état (Mention Sciences).
- Jackson, I.J. 1971. Measurement of rainfall and interception by tropical highland forest. In *Rôle de l'hydrologie et de l'hydrométéorologie dans le développement économique de l'Afrique*. Plub. OMM. Vol. II, n° 301. Genève.
- Jiménez, M.S. Cermák, J. Kucera, J. & Morales, D. 1996. Laurel forests in Tenerife, Canary Islands: the annual course of sap flow in *Laurus* trees and stand. *J. Hydrol.* 183:307-321.
- Johnson, R. 1990. The interception, throughfall and stemflow in a forest in highland Scotland and the comparison with other Uplands forest in the U.K. *J. Hydrol.* 118:281-287.

- Jordan, C.F. 1968. Stem flow in the tropical rain forest. In: Puerto Rico Nuclear Center Rain Forest Project Annual Report, PRNC-119, Rio Piedras, Puerto Rico, pp. 35-40.
- Kämer, F. 1974 Klima und vegetation auf Tenerife besonders in Hiblick auf Nebelniederschlag. Scripta Geobotanica. Vol. 7 Edit Erich Goltze KG. Göttingen.
- Kelliher, F.M. Whitehead, D. & Pollock, D.S. 1992. Rainfall interception by trees and slash in a young *Pinus radiata* D. Don stand. J. Hydrol. 131:187-204.
- Leonard, R.E. 1961. Net precipitation in northern hardwood forest. J. Geophys. Res. 66: 2417-2421.
- Lima, W.P. 1987. O reflorestamento com Eucalipto e seus impactos ambientais. Sao Paulo. Artpress.
- Lloyd, C.R. & Marques F, A. de O. 1988. Spatial variability of throughfall and stemflow measurements in Amazonian rain forest Agr. Forest Meteorol. 42: 63-73.
- Loustau, D. Berbigier, P. & Granier, A. 1992. Interception loss, throughfall and stemflow in a maritime pine stand. I, Variability of throughfall and stemflow beneath the pine canopy, J. Hydrol. 138:449-467.
- Mamanteo, B.P. & Veración, V.P. 1985. Measurements of fogdrip, throughfall and stemflow in the mossy and Benguet Pine (*Pinus kesiya* Royle ex Gordon) forest in the Upper Agno River Basin. Sylvatrop. Philipp. For. Res. J. 10:271-282.
- Martínez-Meza, E. & Whitford, W.G. 1996. Stemflow, throughfall and channelization of stemflow by roots in three Chihuahuan desert shrubs. J. Arid Environ. 32: 271-287.
- Morales, D. Jiménez, M.S. Gonzalez-Rodriguez, A.M. & Cermak, J. 1996a. Laurel forests in Tenerife, Canary Islands: I. The site, stand structure and stand leaf area distribution. Trees 11: 34-40.
- Morales, D. Jiménez, M.S. Gonzalez-Rodríguez, & A.M. Cermak, J. 1996b. Laurel forests in Tenerife, Canary Islands: II. Leaf distribution patterns in individual trees. Trees 11: 41-46.
- Morales, D. Gonzalez-Rodríguez, A.M. Cermak, J. & Jiménez, M.S. 1996c. Laurel forest in Tenerife, Canary Islands: the vertical profiles of leaf characteristics. Phytos 36: 251-263.
- Mulchanov, A.A. 1963. The hydrological Role of Forests. Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem, 407 pp.
- Návar, J. 1993. The causes of stemflow variation in three semi-arid growing species of northeastern Mexico J. Hydrol. 145: 175-190
- Neal, C. Smith, C.J. Walls, J. Billingham, P. Hill, S. & Neal, M. 1990. Comments on the Hydrochemical regulation of the halogen elements in rainfall, stemflow, throughfall and stream waters at the acidic forested area in mid-Wales. Sci. Total. Environ., 91:1-11.
- Neal, C. Robson, A.J. Bharwaj, C.L. Conway, T. Jeffery, H.A., Neal, M. Ryland, G.P. Smith, C.J. & Walls, J. 1993. Relationships between precipitation, stemflow and throughfall for a lowland beech plantation, black Wood; Hampshire, southern England: findings on interception at a forest edge and effect of storm damage" J. Hydrol. 146:221-233.
- Neary, A.J. & Gizyn W.I. 1994. Throughfall and stemflow chemistry under deciduous and coniferous forest canopies in south-central Ontario. Can. J. For. Res. 24: 1089-1100.
- Ovington, J.D. 1954. A comparison of rainfall in different woodlands. Forestry, 27: 41-53
- Peterson, D.L. & Rolfe, G.L. 1982. Precipitation components as nutrient pathways in floodplain and upland forest of Central Illinois. Forest. Sci. 28:321-332.
- Pressland, A.J. 1973. Rainfall partitioning by an arid woodland (*Acacia aneura* F.Muell.) in south-western Queensland. Aust. J. Bot. 21:235-245.
- Pressland, A.J. 1976. Soil moisture redistribution affected by throughfall and stemflow in an arid zone shrubs community. Aust. J. Bot. 42:641-649.
- Rampazzo, N. & Blum, W.E.H. 1992. Changes in chemistry and mineralogy of forest soils by acid rain. Water Air Soil Poll. 61:209-220.
- Reynolds, E.C.R. & Henderson, C. 1967. Rainfall interception by beech, larch and norway spruce. J. For., 40(2): 165-184.
- Rowe, P.B. 1948. Influence of Woodland Chaparral on Water and soil in Central California. U.S. Forest Service and California Division of Forestry, 70 pp.
- Ruiz de la Torre, J. 1979. Árboles y arbustos de la la España peninsular. E.T.S.I.M. Fundación Conde del Valle de Salazar (ed.). 512pp.

- Rutter, A.J., 1963. Studies in the water relations of *Pinus sylvestris* in plantation conditions. II. The annual cycle of soil moisture change and derived estimates of evaporation. J. Appl. Ecol., 18: 521-527.
- Sinun, W. Meng, W.W. Douglas, I. & Spencer, T. 1992 Throughfall, stemflow, overland flow and throughflow in the Ulu Segama rain forest, Sabah, Malaysia Phil.Trans. R. Soc. Lond. B. 335, 389-395.
- Schnock, G. & Goloux, A. 1967. La chênaie mélangée calcicole de Virelles-Blaimont. Réception del précipitations et égouttement. Bull. Inst. Roy. Sci. Nat. Belg. 43(33):1-17.
- Slatyer, R.O. 1965. Measurement of precipitation, interception by arid plant community (*Acacia aneura* F.Muell). Arid zone research, 25: 181-192.
- Specht, R.L. 1957. Dark Island heat (ninety miles plain South Australia) IV Soil moisture patterns produced by rainfall interception and stemflow. Aust. J. Bot. 5:137-150.
- Steinhard, U. 1979. Unterschgen über den Wasser- und Nährstoffhaushalt eines andinen Wolkenwaldes in Venezuela. Göttinger Bodenkundliche Berichte. 56:1-185.
- Strigel, G. Ruhiyat, D. Prayitno, D. & Sarmina, S. 1994. Nutrient input by rainfall into secondary forests in East Kalimantan, Indonesia Journal of Tropical Ecology 10:285-288.
- Tanaka, T. Tsujimura & M. Taniguchi, M. 1991. Infiltration area of stemflow water. Ann. Rep. Geosci., Univ. Tsukuba, 17, 30-32.
- Tanaka, T. Taniguchi, M. & Tsujimura, M. 1996. Significance of stemflow in groundwater recharge. 2: A cylindrical infiltration model for evaluating the stemflow contribution to groundwater recharge. Hydrol. Process. 10, 81-88 (1996).
- Taniguchi, M. Tsujimura & M. Tanaka, T. 1996. Significance of stemflow in groundwater recharge. 1: Evaluation of the stemflow contribution to recharge using a mass balance approach. Hydrol. Process. 10, 71-80.
- Teklehaimanot, Z & Jarvis, P.G. 1991. Direct measurement of evaporation of intercepted water from forest canopies. J. Appl. Ecol. 28:603-618.
- Tromble, J.M. 1987. Water interception by two arid land shrubs. J. Arid Environ. 15:65-70.
- Veneklaas, E. & Van Ek, R. 1994. Rainfall interception in two tropical montane rain forests, Colombia Hydrol. Process. in press. In Doctoral Dissertation.
- Viville, D. Biron, P. Granier, A. Dambrine, E. & Probst, A. 1993. Interception in a mountainous declining spruce stand in the Strenbach catchment (Voges, France). Journal of Hydrology 144:273-282.
- Voigt, G.K. 1960. Distribution of rainfall under forest stands. Aust. For. 190-197.
- Weaver, P.L. 1972. Cloud Moisture interception in the Luquillo Mountains of Puerto Rico. Carib. Journal os Sciencies 12:129-144.
- Wheeler, H.S. Langan, S.J. Miller, D.J. & Ferrier, R.C. 1987. The determination of hydrological flow paths and associated hydrogeochemistry in forested catchments in central Scotland, IAHS Plub. 167:433-449.
- Wicht, C.L. 1941. An approach to the study of rainfall interception by forest canopies. J.S. Afr. For. Assoc. 6:54-70.

## Capítulo 4. PRECIPITACIÓN PENETRANTE. EL MÉTODO DE MEDIDA.

### 4.1. INTRODUCCIÓN

La precipitación penetrante es la fracción de la precipitación que incide sobre el bosque y que llega al suelo a través de la cubierta, bien como precipitación directa o bien como drenaje tras contactar con la cubierta y escurrir desde ésta.

La medida de la precipitación penetrante se realiza empleando diferentes tipos de colectores que captan la misma. Existe discrepancia acerca de cuál debe de ser el método empleado para la recogida de la precipitación penetrante, ya que diferentes autores han registrado resultados contradictorios acerca de cuál debe de ser el tipo y número de colectores empleados. Así Kostelnik *et al.*, (1989) demostraron que los embudos circulares infraestimaban los volúmenes de precipitación penetrante, aunque posteriormente Reynolds y Neal (1991) concluyeron que no había suficientes evidencias para rechazar los embudos a favor de las canaletas para los estudios de precipitación penetrante. No obstante Helvey y Patric (1965) aseguraron que es más importante el número de colectores que el tipo, estando este número determinado por la realidad económica (Peterson y Rolfe, 1979). La importancia de esta disquisición estriba principalmente en los errores que se producen al realizar el cálculo del balance hídrico así como la estimación de la deposición total en base a la precipitación penetrante, tal y como apuntaron diversos autores (Kostelnik *et al.*, 1989 y Reynolds y Neal, 1991), ya que los estudios de la composición química de la precipitación penetrante se suelen realizar en base de embudos circulares (Reynolds y Neal, 1991) y en un reciente trabajo de Glaubig y Gómez (1994) sobre la construcción de colectores de precipitación penetrante estos eran embudos circulares.

La importancia del método de estudio se hace patente en los errores encontrados por Crockford y Richardson (1990) para la estima de la intercepción, infraestimando los pluviómetros circulares en un 30%.

Así el objetivo de este capítulo será :

- i. Elección del método de medida, tras un estudio comparativo de los propuestos en la bibliografía.

### 4.2. MATERIAL Y METODOS

En el presente trabajo se han utilizado tres métodos para la captación de la precipitación penetrante: embudos ( $\varnothing=170$  mm), embudos graduados ( $\varnothing=50$  mm) y canaletas. Además se han encontrado datos inéditos tomados por el Patrimonio Forestal y el ICONA hace ya dos décadas. A continuación se detallan los diferentes materiales y métodos utilizados:

#### 4.2.1. EMBUDOS ( $\varnothing=170$ mm).

Para la recogida de la precipitación penetrante se utilizarán pluviómetros construidos del siguiente modo: dos botellas de polipropileno de 5 litros, y 17 cm de diámetro, unidas por las bocas de las mismas, ensamblándose una dentro de la otra, con ayuda de un aro de 2 cm de PVC. A la botella cuya boca se ensambla dentro de la otra se le practicó una sección a unos 5 cm de su

parte inferior, y se le puso una rejilla en su cuello interior impidiendo el paso de materiales vegetales y animales; de esta forma esta botella realizó la función de un embudo, minimizando los problemas de pérdidas de agua por salpicaduras debido a su forma y de pérdidas por la biselación del borde. El conjunto de los dos bidones ensamblados se fijó en el suelo por medio de tres segmentos de acero corrugado de 1 cm de diámetro y de 1,5 m de longitud, con el fin de que el pluviómetro mantuviera una posición perfectamente horizontal respecto al suelo exponiendo la máxima superficie de captación, resultando finalmente que la superficie de captación quedaba 70 cm por encima del suelo (Fotografía 5).



Foto. 5 Colector de la precipitación penetrante (Pp) mediante embudos de 170 mm.

Para la recolección de la precipitación penetrante se localizaron al azar los pluviómetros en una malla cuadrangular superpuesta a la parcela Figura. 4-1, cuyos subcuadrados tenían 5 m de lado, sin ser recolocados a lo largo del tiempo de estudio.

El número de pluviómetros se aumentó de 15 a 40 tras dos meses de medida con el fin de reducir progresivamente el coeficiente de variación (C.V.) a un compromiso menor del 20%. No se pudieron aplicar métodos para la determinación del tamaño muestral basados en los intervalos de confianza de la media o similares al no conocer *a priori* la distribución de la muestra. El área total de los 40 embudos se muestra en la Tabla. 4-2.

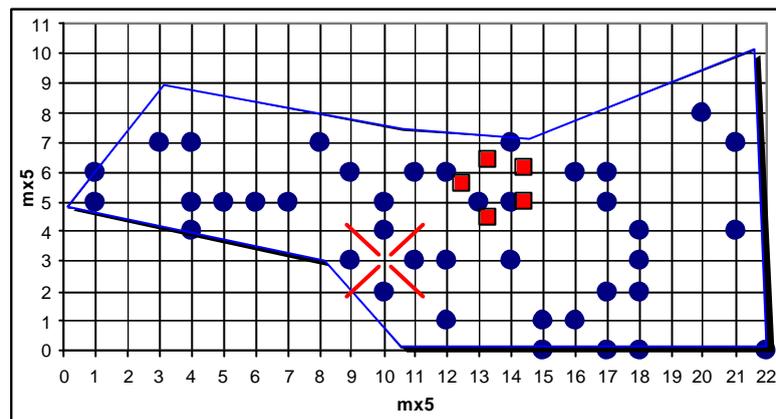


Fig. 4-1 Diseño experimental con los puntos de localización de los pluviómetros de 170 mm de Ø (como puntos), de los pluviómetros de 50 mm de Ø (como cuadrados) y de las canaletas (líneas).

La recogida de agua se realizó a intervalos semanales, desde el 23 de septiembre de 1994 hasta el 31 de diciembre de 1995, midiendo el volumen de líquido con un juego de probetas de 25, 50, 100 y 1.000 ml, eligiendo la misma con base al volumen existente con el fin de minimizar el error de medición.

#### 4.2.2. CANALETAS.

También se utilizaron canaletas de PVC, rectangulares y de sección semiesférica, siendo el diámetro de 14 cm y la longitud de  $\approx 1,5$  m. Las canaletas estaban sostenidas por estacas de madera que creaban una pequeña inclinación, con una pendiente entorno a los  $5^\circ$ , para permitir el flujo rápido del agua hacia la zona del desagüe, lo que se tuvo en cuenta en la reducción del área de captación. El desagüe se conectó por medio de un tubo plástico a bolsas de 36 l de capacidad. La colocación de las canaletas se realizó eligiendo un punto central al azar dentro de la parcela, colocándolas entorno a este punto, de acuerdo con Ibrahim (1979) que utilizó esta estrategia de

muestreo para compararla con el muestreo al azar de embudos. Las medidas por este método de la precipitación penetrante se realizaron durante dos periodos de tiempo, el primero del 4 de noviembre de 1993 al 11 de mayo de 1994 y el segundo del 1 de enero de 1995 al 31 de diciembre de 1995. En el primero de los periodos el intervalo de recogida de agua fue de dos o tres días, mientras que en el segundo de los periodos la medida fue semanal. Los datos de las superficies de las canaletas se especifican en las Tablas. 4-1 y 4-2, para cada periodo.

#### 4.2.3. EMBUDOS ( $\varnothing=50$ mm).

Otro tipo de colectores utilizados fueron los embudos que se comercializan como "pluviómetros de cuña<sup>18</sup>" (R. Fuess Berlín-Steglitz) los cuales están calibrados para 0,5 mm de precipitación. La colocación de los pluviómetros de cuña se realizó eligiendo un punto central al azar dentro de la parcela, colocándolos entorno a este punto a 1 m de altura sobre el suelo. Durante el periodo del 29 de octubre de 1993 al 11 de mayo de 1994 se midió con este tipo de colectores. Los datos de las superficies de los embudos se especifican en la Tabla 4-1.

#### 4.2.4. MESAS (0,5 m<sup>2</sup>).

Al mismo tiempo que se recopilaban las series pluviométricas de la estación meteorológica de Tacoronte-Agua García C.F., se encontraron los datos diarios de precipitación penetrante, recogidos por el Patrimonio Forestal y el ICONA, mediante la utilización de colectores de tipo mesas de 0,5 m<sup>2</sup> (Santana, 1986), bajo tres tipos de cubiertas vegetales en lugares adyacentes a la nombrada estación meteorológica. Estas cubiertas fueron: monteverde, una repoblación de pino canario (*Pinus canariensis*) y una repoblación de pino de Monterrey (*Pinus radiata*), y sólo se instaló un pluviómetro bajo cada formación. Las mediciones bajo ambos pinos se efectuaron del 13 de octubre de 1967 al 31 de agosto de 1972 ampliándose bajo el monteverde hasta el 12 de octubre de 1975.

Tabla. 4-1 Resumen de las estadísticas para las cantidades totales de precipitación penetrante recogida por embudos de 50 mm de  $\varnothing$  y canaletas desde el 4-XI-93 al 11-V-94.

	Canaletas	Embudos de 50 $\varnothing$
Área total (cm <sup>2</sup> )	10.180	170
nº de colectores	5	5
Media total (mm)	327,6	336,7
rango	268,6-439,3	243,8-418,7
Pp como porcentaje de la lluvia	53	54

Tabla 4-2. Resumen de las estadísticas para las cantidades totales de precipitación penetrante recogida por embudos de 170 mm de  $\varnothing$  y canaletas desde el 1-I-95 al 31-XII-95.

	Canaletas	Embudos de 170 $\varnothing$
Área total (cm <sup>2</sup> )	8.550	9.079
nº de colectores	4	40
Media total (mm)	343,14	322,4
Rango	327,5-359,8	238,1-535,3
Pp como porcentaje de la lluvia	55	52

<sup>18</sup> Término anglosajón "wedge-shaped".

### 4.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.3.1. DIFERENCIAS ENTRE LAS CANALETAS Y LOS EMBUDOS GRADUADOS DE Ø=50 mm.

El resumen de las estadísticas para las cantidades totales de precipitación penetrante recogida por embudos de 50 mm de Ø (pluviómetros de cuña) y canaletas durante el primer periodo de medición se muestran en la Tabla 4-1. Durante el periodo medido llovió 618 mm. Puede observarse como las canaletas recogieron menor cantidad de agua que los embudos, igualmente a lo registrado en un experimento análogo por Reynolds y Neal (1991), no obstante hay que resaltar la pequeña diferencia que se encontró en los volúmenes recogidos, que fue del 2,7%, a pesar de la gran diferencia de área existente entre dichos métodos. Esta diferencia del 2,7% está en el rango de las registradas por Reynolds y Neal (1991) para plantaciones de *Picea sitchensis* y *Larix kaempferi*, que fueron de 2% y 10% respectivamente. El rango de variación fue mayor para los pluviómetros que para las canaletas.

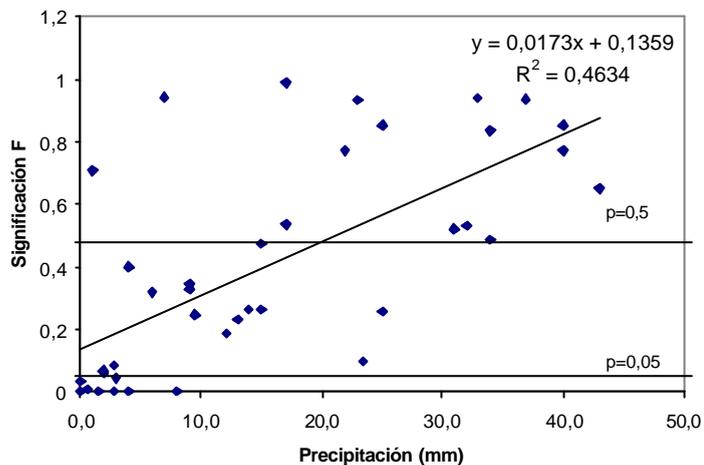


Figura 4-2. Regresión lineal entre la significación de la F y la precipitación (mm) para cada periodo de recogida. Se marca el nivel de significación de  $p=0,05$  y de  $p=0,5$ .

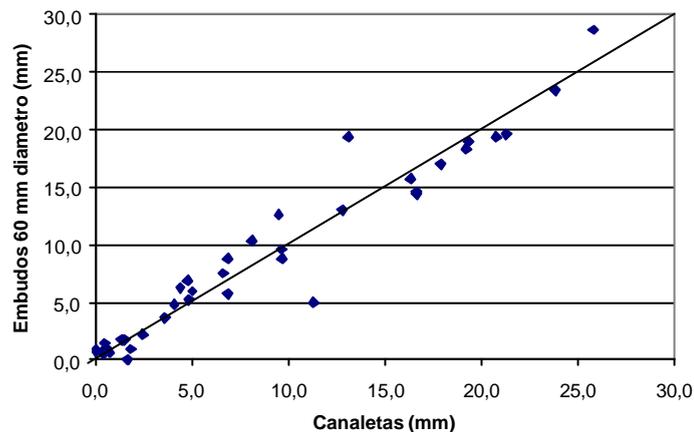


Figura 4-3. Cantidades obtenidas por medio de las canaletas y los embudos circulares de 50 mm de diámetro para cada periodo de recogida y línea de correspondencia 1:1.

Para las cantidades totales de precipitación penetrante en el periodo medido no hubo diferencias significativas, al aplicar un análisis de varianza de 1 vía y un test F, entre las canaletas y los pluviómetros, del mismo modo que lo observado por Reynolds y Neal (1991). No obstante, al realizar los mismos test estadísticos para cada colección de precipitación penetrante, encontramos que si existen diferencias significativas en algunos casos, y al representar la significación de la F ( $y$ ) frente a la cantidad de precipitación incidente ( $x$ ) para ese periodo encontramos que existe una relación lineal significativa para una  $p \leq 0,001$ , tal y como se muestra en la Figura. 4-2, donde podemos observar como todos los puntos que muestran diferencias significativas para una  $p \leq 0,05$  se corresponden a cantidades de lluvia menores a 10 mm. Estas diferencias posiblemente se deben a la heterogeneidad espacial, que varía la cantidad de precipitación directa y la saturación del dosel, produciendo diferencias con lluvias de baja cuantía, que al aumentar de volumen hace despreciables las cantidades de precipitación directa y de saturación del dosel. También es posible

que la diferencia sea debida a la utilización de diferentes precisiones en la medida del volumen en ambos métodos.

El rango de las cantidades de precipitación penetrante es similar con ambos métodos, calculado con base en las medias aritméticas de los volúmenes de los colectores, el rango fue de 0 a 25,8 mm para las canaletas y de 0 a 28,6 mm para los embudos, las medias aritméticas fueron de 8,5 y 8,6 mm respectivamente. Se realizó una representación de las cantidades obtenidas por ambos métodos para cada periodo Figura. 4-3, mostrando una gran similitud entre ambas técnicas de medición, con los puntos cercanos a la línea de correspondencia 1:1, de un modo similar a lo registrado por Reynolds y Neal (1991).

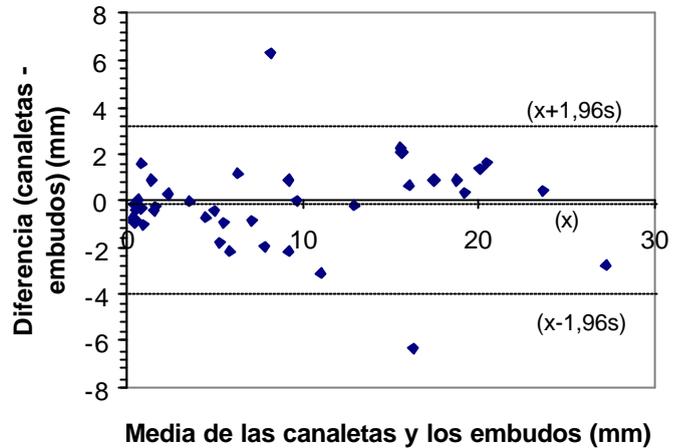


Fig. 4-4 Diferencias entre los volúmenes de los dos métodos frente a sus medias para cada periodo de recogida, sesgo (x) y grado de ajuste ( $x \pm 1,96s$ ).

Para estimar las diferencias entre métodos se siguió el test propuesto por Altman y Bland (1983). Las diferencias entre los dos métodos para cada periodo de recogida, se representaron frente a la correspondiente media de las dos medidas para ese mismo periodo, tal y como se puede ver en la Figura. 4-4. Las diferencias no sobrepasaron los 8 mm para ninguno de los periodos de recogida, el grado de ajuste se realizó mediante el cálculo del sesgo ( $\bar{x}$ ) como la media de las diferencias, y la desviación estándar de las diferencias ( $s$ ), como se observa en la Tabla. 4-3, estas diferencias respondieron a una distribución normal, encontrándose el 95% de las diferencias en el intervalo  $\bar{x} \pm 1,96s$ , que fue de  $-3,9$  a  $3,6$ , el intervalo de confianza de la media varió de  $-0,4$  a  $0,8$ , reflejando la mayor recolección de los embudos. Se comprobó que las diferencias entre los métodos tenían una distribución normal.

Tabla. 4-3 Resumen de las estadísticas de las diferencias entre los dos métodos para cada periodo.

Estadístico	Abreviatura	canaletas-emb. 170Ø	canaletas-emb. 50Ø
Sesgo (mm)	$\bar{x}$	0,8	-0,2
DT	s	1,4	1,9
Grado de ajuste (mm)	$\bar{x}-1,96s$	3,6	3,6
	$\bar{x}+1,96s$	-2,0	-3,9
95% del límite de confianza (mm)	$\bar{x}+95\%IC$	1,4	0,4
	$\bar{x}-95\%IC$	0,2	-0,8
Nº de medidas	n	26	39

Reynolds y Neal (1991) observaron un pequeño sesgo hacia una menor recogida por las canaletas, aunque algunas veces ocurrieron mayores diferencias, concluyendo que de acuerdo con Kostelnik *et al.* (1989) no hay suficientes evidencias para rechazar los pluviómetros a favor de las canaletas para estudios de precipitación penetrante, sin embargo este último recogió mayores cantidades con las canaletas que los embudos en un bosque de frondosas. Reigner (1964) sin embargo observó una menor recogida por las canaletas dictaminando que era provocada por salpicaduras, evitándose mediante la perdida de angulación respecto la horizontal, o mediante el método de Crockford y Richardson (1983, 1990) de canaletas con sección en forma de V. Estos mismos autores contrastando las canaletas en V con pluviómetros de cuña (como los de nuestro

experimento) encontraron que casi siempre recogían más agua las canaletas, promediando un 14% más.

#### 4.3.2. DIFERENCIAS ENTRE LAS CANALETAS Y LOS EMBUDOS DE Ø=170 mm.

El resumen de las estadísticas para las cantidades totales de precipitación penetrante recogida por embudos de 170 mm de Ø y canaletas durante el segundo periodo de medición se muestran en la Tabla. 4-2. Durante el periodo medido llovió 626 mm. A diferencia del periodo en que se utilizaron embudos de menor diámetro las canaletas recogieron mayor cantidad de agua que los embudos, y aun siendo la diferencia de área de captación menor la diferencia en los volúmenes totales recogidos fue mayor que en el caso anterior, siendo esta del 6,1%, encontrándose no obstante dentro del rango de la bibliografía existente, habiéndose encontrado el mismo resultado en un experimento análogo por Ibrahim (1979). Como en el caso anterior, el rango fue mayor para los embudos que para las canaletas, pero en este caso la amplitud del rango de los primeros sobrepasa con creces el de las canaletas (Tabla. 4-2).

Para las cantidades totales de precipitación penetrante en el periodo medido no hubo diferencias significativas, al aplicar un análisis de varianza de 1 vía y un test F, entre las canaletas y los pluviómetros, del mismo modo que lo observado en el caso anterior, y de lo observado por Ibrahim (1979) que comparó ambos métodos mediante una t de Student sin encontrar diferencias significativas. No obstante, al realizar los mismos test estadísticos para cada colección de precipitación penetrante, encontramos que si existen diferencias significativas en algunos casos, y al representar la significación de la F (y) frente a la cantidad de precipitación (x) para ese periodo encontramos que existe una relación lineal significativa para una  $p \leq 0,001$ , tal y como se muestra en la Fig. 4-5., donde podemos observar como todos los puntos que muestran diferencias significativas para una  $p \leq 0,05$  se corresponden a cantidades de lluvia menores a 20 mm.

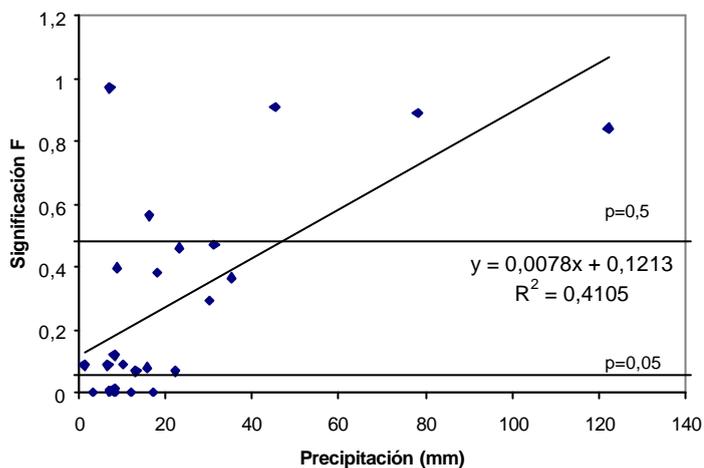


Fig.4-5 Regresión lineal entre la significación de la F y la precipitación (mm) para cada periodo de recogida. Se marca el nivel de significación de  $p=0,05$  y  $p=0,5$ .

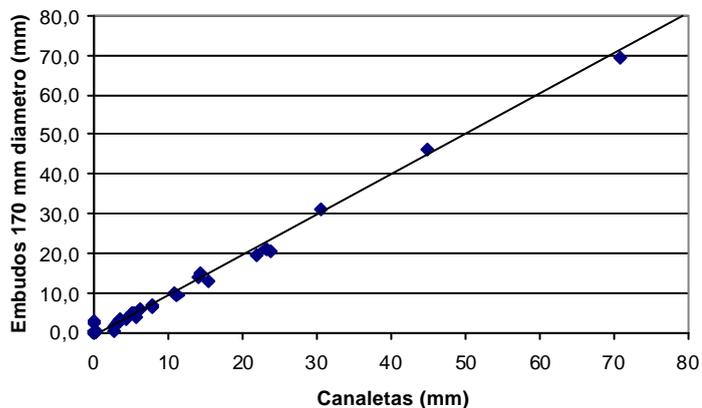


Fig. 4-6 Cantidades obtenidas por medio de las canaletas y los embudos circulares para cada periodo de recogida y línea de correspondencia 1:1.

El rango de las cantidades de precipitación penetrante es similar con ambos métodos, calculado con base en las medias aritméticas de los volúmenes de los colectores, el rango fue de 0 a 70,9 mm para las canaletas y de 0 a 69,4 mm para los embudos, las medias aritméticas fueron de 6,6 y 6,2 mm respectivamente. Se realizó una representación de las cantidades obtenidas por ambos métodos para cada periodo Fig. 4-6, mostrando una gran similitud entre ambas técnicas de medición, con los puntos cercanos a la línea de correspondencia 1:1; observando sin embargo que en este caso los puntos se quedan en mayor número por debajo de la línea de correspondencia, visualizando de este modo una mayor recogida de las canaletas.

Para estimar las diferencias entre métodos se siguió, de nuevo, el test propuesto por Altman y Bland (1983). Las diferencias entre los dos métodos para cada periodo de recogida, se representaron frente a la correspondiente media de las dos medidas para ese mismo periodo, tal y como se puede ver en la Figura. 4-7. Las diferencias no sobrepasaron los 4 mm para ninguno de los periodos de recogida, es decir fueron menores que en el caso anterior, aunque las diferencias finales fueran mayores, esto parece deberse a un error sistemático, el grado de ajuste se realizó mediante el cálculo del sesgo ( $\bar{x}$ ) como la media de las diferencias, y la desviación estándar de las diferencias ( $s$ ), como se observa en la Tabla. 4-3, estas diferencias respondieron a una distribución normal, encontrándose el 95% de las diferencias en el intervalo  $\bar{x} \pm 1,96s$ , que fue de  $-2,0$  a  $3,6$ , el intervalo de confianza de la media varió de  $0,2$  a  $1,4$ . Se comprobó que las diferencias entre los métodos tenían una distribución normal.

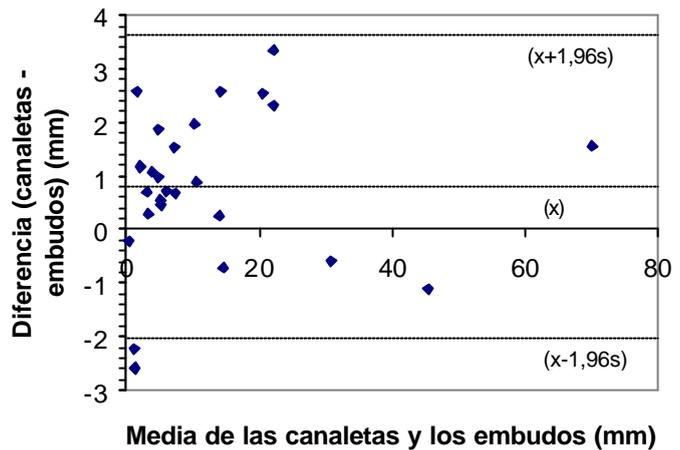


Fig. 4-7 Diferencias entre los volúmenes de los dos métodos frente a sus medias para cada periodo de recogida, sesgo ( $\bar{x}$ ) y grado de ajuste ( $\bar{x} \pm 1,96s$ ).

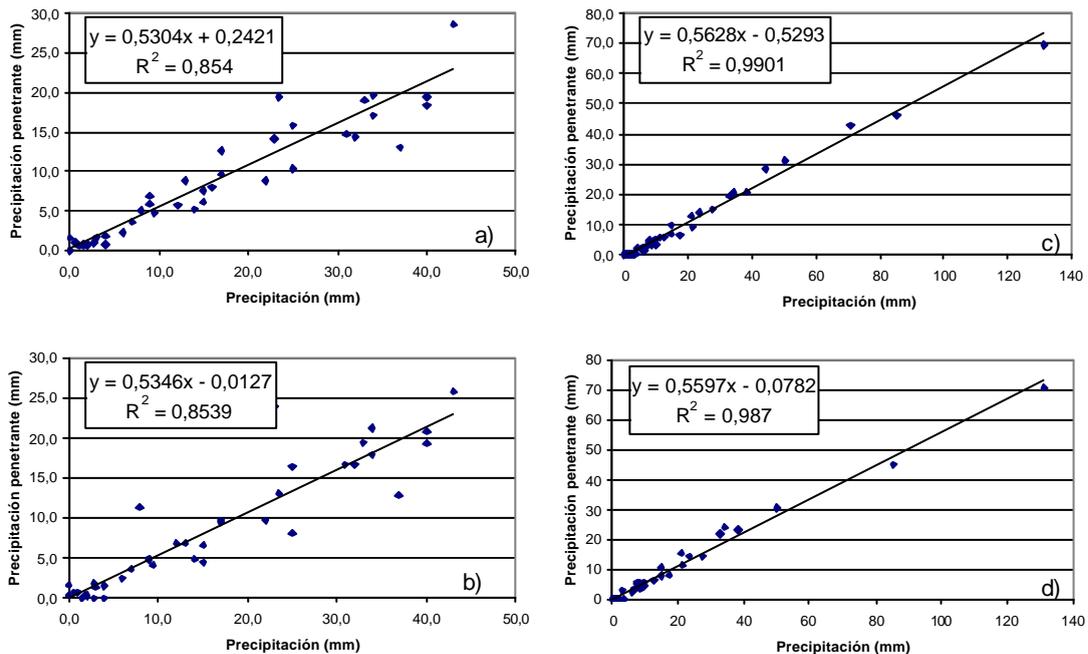


Fig. 4-8 Regresiones de la precipitación y la precipitación penetrante para: a) Pluviómetros de cuña durante el primer periodo; b) canaletas durante el primer periodo; c) embudos (170mm $\varnothing$ ) durante el segundo periodo y d) canaletas durante el segundo periodo.

Crockford y Richardson (1983, 1990) contrastando las canaletas en V con pluviómetros de 200 mm de diámetro encontraron una mayor recogida por las canaletas de un 6% más.

#### 4.3.3. DIFERENCIAS ENTRE LOS PERIODOS MEDIDOS. CORRELACIONES Y SU COMPARACIÓN CON LOS DATOS DEL ICONA Y EL PATRIMONIO FORESTAL.

Es posible realizar regresiones para los volúmenes de precipitación penetrante semanal ( $y$ ) y la precipitación total semanal ( $x$ ) en la parcela, mediante un modelo lineal del tipo  $Pp = a + bP$ , donde  $a$  y  $b$  son los coeficientes de la ecuación,  $Pp$  es la precipitación penetrante y  $P$  es la precipitación incidente del periodo, tal y como se muestra en la Figura.4-8, donde se observan estas rectas de regresión para los tres métodos examinados en los dos periodos de estudio. De acuerdo con t-test para comparar las medias de las pendientes y de los valores de interceptación entre ambos periodos y entre las canaletas y los dos tipos de embudos conjuntamente, no hay razón al nivel del 95% para sospechar que pendientes y cortes con el eje de ordenadas sean diferentes. No obstante se observa un mayor dispersión en los datos referentes al primer periodo, posiblemente debido al menor espacio de tiempo efectuado en las recogidas de agua de dos o tres días, a diferencia del segundo periodo con recogidas semanales, en las cuales las mayores cantidades de agua y número de eventos crean un efecto de homogenización sobre las mediciones.

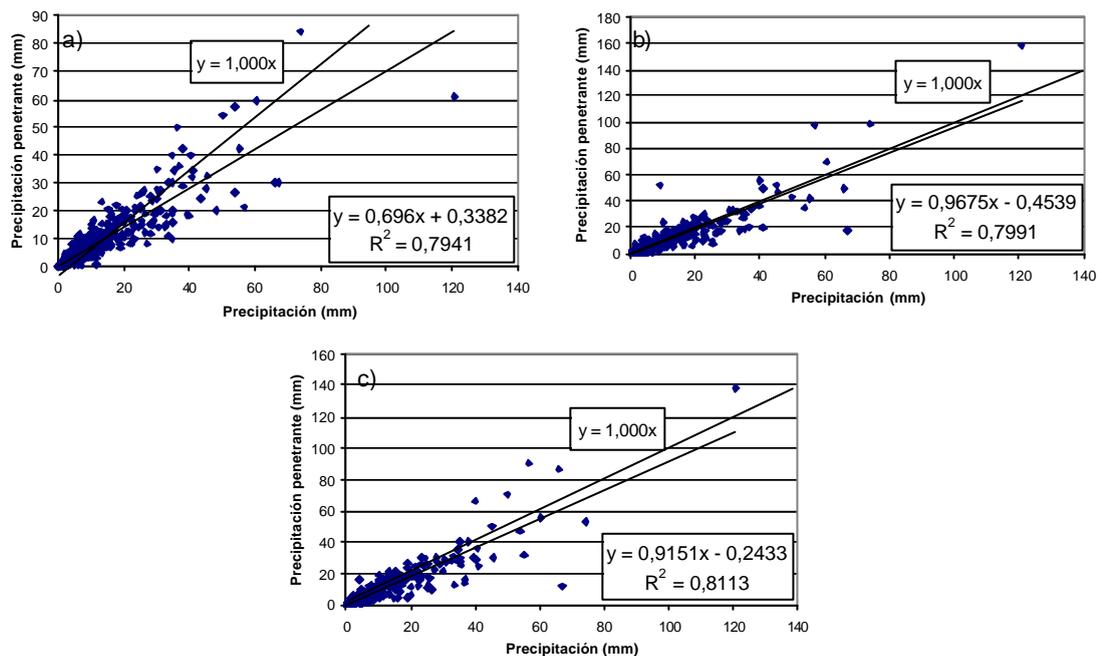


Fig. 4-9 Regresiones entre la precipitación y la precipitación penetrante para: a) monteverde; b) plantaciones de *Pinus canariensis* y c) plantaciones de *Pinus radiata*. Nótese la diferencia de escalas.

Respecto a los datos del ICONA y del Patrimonio Forestal, en principio no se deben considerar demasiado certeros al carecer de representatividad espacial para cada uno de los tipos de cubierta estudiada, además de hallarse probablemente tomado cerca de uno de los lados del bosque, no obstante al repetir las regresiones anteriores, como se puede observar en la Figura. 4-9, de modo comparativo encontramos grandes diferencias entre las dos plantaciones de coníferas y la de monteverde, esta diferencia al estar los datos tomados en condiciones similares se podría deber al tipo de hoja que de acuerdo con Kämmer (1974) en condiciones de niebla densa, humedad y velocidad del viento media, los árboles de hoja ancha de los bosques de laurisilva

presentan un obstáculo menos efectivo a la precipitación de niebla que el *P.canariensis* y las dos especies de *Erica* presentes en la Isla. Es necesario resaltar el parecido de la pendiente obtenida para el monte verde con el de los métodos anteriormente descritos.

#### 4.3.4. EVALUACIÓN DE LOS MÉTODOS UTILIZADOS.

A la hora de comparar métodos la altura de los colectores sobre el suelo es muy importante, ya que en episodios de alta intensidad de lluvia las salpicaduras podrían tener gran importancia, sin embargo los métodos comparados se hallaban a alturas similares sobre el suelo. Igualmente es de importancia la altura de las paredes de los embudos y de las canaletas, siendo menor en estas últimas propiciando la pérdida de agua por salpicaduras, hecho que fue encontrado por Reigner (1964). Otras diferencias podrían provenir de las propiedades aerodinámicas de los métodos, peor conocidas para el caso de las canaletas, ya que los embudos circulares han sido profundamente evaluados (Rodda y Robinson, 1969; Crockford y Richardson, 1983), aunque debido a la baja velocidad de los vientos bajo cubierta este no debe de ser un factor muy importante. No obstante Crockford y Richardson (1990) afirmaron igualmente que las canaletas largas recogían mayor cantidad de agua que las pequeñas, hecho que quizás sea achacable a cuestiones aerodinámicas del efecto de los bordes. Respecto a los bordes y la forma la relación entre el perímetro y el área es menor para los colectores circulares por lo que el efecto de borde disminuiría en los mismos.

Los pluviómetros de cuña podrían tener mayores tasas de evaporación al no existir ningún estrechamiento en su estructura, este fenómeno fue comprobado en experiencia de laboratorio por Crockford y Richardson (1990), que observaron que las gotas que se quedaban en las paredes cuando las cantidades de lluvia no eran muy altas eran de nuevo evaporadas a la atmósfera, llegando a infraestimar en comparación a pluviómetros de 200 mm de boca en un 12%. Además Gash y Morton (1978) encontraron que pluviómetros parecidos<sup>19</sup> conectados a un registrador infraestimaban un 7% en comparación con pluviómetros circulares usuales. Otro factor de error podría provenir del instrumental de medida, ya que los volúmenes existentes en los embudos son siempre menores a los de las canaletas, no obstante como ya se mencionó se intentó corregir utilizando un juego de probetas. Sin embargo el más importante de los factores que pueden causar variación es la distribución espacial de los colectores y el tipo de estrategia de muestreo; el área abarcada por los pluviómetros de 170 mm  $\varnothing$  era la mayor, produciendo el mayor rango de mediciones dentro del bosque, y representando mejor la variabilidad espacial de este; esta estrategia de muestreo viene dada porque al tener menor coste y área se pueden poner más unidades de embudos que de canaletas. Parece ser igualmente que existe una interacción entre el error existente entre ambos métodos y el tipo de cubierta tal y como concluyeron Crockford y Richardson (1990). Por lo tanto el método elegido para los tratamientos de datos posteriores y para el examen de su variabilidad será el de los embudos de 170 mm de diámetro, a diferencia de Crockford y Richardson (1990) que se decantaron por las canaletas por tener una menor variabilidad, pero teniendo en cuenta lo postulado por Lloyd y Marques (1988) en cuanto a que el número óptimo de colectores es el que describe adecuadamente la estructura de la cubierta, un aumento de variabilidad significaría un aumento de las variaciones espaciales del bosque y por ello una mejor estima para el mismo. No obstante hay que constatar el hecho de que las canaletas con la misma área de muestreo pueden recoger la misma heterogeneidad espacial, pero en los datos obtenidos estaría integrada para cada canaleta.

Según Reynolds y Neal (1991) las diferencias en la intensidad de muestreo (tanto número como área) pueden llevar a diferencias en las medidas de precipitación penetrante más que el diseño del colector, lo que está en consonancia con nuestra anterior suposición, y parece ser el mismo caso que le aconteció a Ibrahim (1979) y Kostelnik *et al.* (1989), en experiencias análogas,

---

<sup>19</sup> *tipping-bucket raingauges*

explicando la diferencia en el número de los colectores de ambos métodos colocados en su experiencia.

#### 4.4. CONCLUSIONES

- A lo largo del periodo de estudio recogieron 2,6% más volumen de agua los pluviómetros de cuña que las canaletas. Se pueden observar diferencias significativas entre ambos métodos para cantidades de lluvia menores a 10 mm.
- A lo largo del periodo de estudio recogieron 6,1% más volumen de agua las canaletas que los pluviómetros de 170 mm de diámetro. Se pueden observar diferencias significativas entre ambos métodos para cantidades de lluvia menores a 20 mm.
- Estas diferencias se deben a la heterogeneidad espacial, que varía la cantidad de precipitación directa y la saturación del dosel, produciendo diferencias con lluvias de baja cuantía, que al aumentar de volumen hace despreciables las cantidades de precipitación directa y de saturación del dosel. También es posible que la diferencia sea debida a la utilización de diferentes precisiones en la medida del volumen en ambos métodos.
- No existen diferencias entre los parámetros de las ecuaciones de regresión entre la precipitación incidente y la precipitación penetrante para los dos periodos de medición.
- Por la representatividad espacial de la cubierta nos decantamos finalmente por el método de los pluviómetros de 170 mm de diámetro, ya que al tener menor coste se pudieron instalar en mayor número.

#### 4.5. BIBLIOGRAFÍA

- Altman, D.G. & Bland, J.M. 1983 Measurement in medicine: the analysis method comparison studies. *Statistician* 32:307-317.
- Crockford, R.H. & Richardson D.P. 1983. Some hydrological influences on vegetation. Technical Memorandum 83/18 September 1983. CSIRO Institute of Natural Resources and Environment, division of water resources research. Canberra.
- Crockford, R.H. & Richardson, D.P. 1990. Partitioning of rainfall in a eucalypt forest and pine plantation in southern Australia: I Throughfall measurement in a eucalypt forest: effect of method and species composition. *Hydrol. Process.* 4:131-144.
- Gash, J.H.C. y Morton, A.J. 1978. An application of the Rutter Model to the estimation of the interception loss from the forest. *J. Hydrol.* 38: 49-58.
- Glaubig, R. & Gomez, A. 1994. A simple, inexpensive rain and canopy throughfall collector. *J. Environ. Qual.* 23:1103-1107.
- Helvey, J.D. & Patric, J.H. 1965. Canopy and litter interception of rainfall by hardwoods of Eastern United States. *Water Resour. Res.* 1:193-206.
- Ibrahim M.M. 1979 Recherche sur la dynamique et le bilan de l'eau d'un écosystème à pin pignon (*Pinus pinea* L.) sur sable dunaire Thèse présentée à l'Université des Sciences et Techniques du Languedoc pour obtenir le grade de Docteur d'état (Mention Sciences).
- Kämmer, F. 1974 Klima und vegetation auf Tenerife besonders in Hinblick auf Nebelniederschlag. *Scripta Geobotanica.* Vol. 7 Edit Erich Goltze KG. Göttingen.
- Kostelnik, K.M. Lynch, J.A. Grimm, J.W. & Corbett, E.S. 1989. Sample size requirements for estimation of throughfall chemistry beneath a mixed hardwood forest. *J. Environ. Qual.* 19:633-634.

- Lloyd, C.R. & Marques F, A. de O.1988. Spatial variability of throughfall and stemflow measurements in Amazonian rain forest. *Agr. Forest Meteorol.* 42: 63-73.
- Peterson, D.L. & Rolfe, G.L. 1979. Determinating sample size in throughfall studies. *For. Sci.* 25(4):582-584.
- Reigner, C.L. 1964. Evaluation of the trough-type raingauge. U.S. Forest Service Research Note NE20. Reynolds, B. & Neal, C. 1991. Trough versus funnel collectors for measuring throughfall volumes. *J. Environ. Qual.* 20:518-521.
- Reynolds, B & Neal, C. 1991. Trough versus funnel collectors for measuring throughfall volumes. *J. Environ. Qual.* 20:518-521.
- Rodda, J.C. & Robinson, A.C. 1969. Rain Wind and the aerodynamic characteristics of raingauges. *Meteorol. Mag.* 98:113-120.
- Santana, L. 1986. Estudio de la precipitaciones de niebla. Instituto Nacional para la Conservación de la Naturaleza.



## Capítulo 5. PRECIPITACIÓN PENETRANTE. VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL. CANTIDADES.

### 5.1. INTRODUCCIÓN

La precipitación penetrante es la fracción de la precipitación que incide sobre el bosque y que llega al suelo a través de la cubierta, bien como precipitación directa o bien tras contactar con la cubierta y escurrir desde esta, como drenaje. No obstante, al margen del concepto clásico de precipitación penetrante, en algunos bosques el planeta en los que es posible que se incluya este, existirían otras fuentes de precipitación penetrante no basadas en la precipitación que incide sobre la cubierta, de modo que la definición clásica sería modificada. Las gotas de niebla de pequeño diámetro 0,001-0,5 mm tienen velocidades de caída por debajo de  $0,3 \text{ m s}^{-1}$ , flotan en el aire y se transportan por el viento horizontalmente, siendo depositadas sobre las plantas del bosque.

La gran variabilidad espacial de la precipitación penetrante constituye una gran dificultad a la hora de determinar las pérdidas por la evaporación de la interceptación, mediante la diferencia entre la precipitación incidente y la precipitación neta. Kimmins (1973), Lloyd y Marques (1988) y Crockford & Richardson (1990a) han discutido los errores asociados con la creación de medias para las zonas de estudio desde el punto de vista de las medidas de precipitación penetrante.

Ford y Deans (1978) y Bouten *et al.* (1992) han presentado mapas ilustrando la variabilidad de la precipitación neta. Otros investigadores tales como Eschner (1967), Tajchman *et al.* (1979) Calheiros de Miranda y Buteler (1986) y Johnson (1990) han investigado la influencia de la distancia a los troncos para la precipitación penetrante.

Así los objetivos de este capítulo serán :

- i. Determinar la variabilidad espacial y el error de la precipitación penetrante para el bosque de estudio.
- ii. Determinar las causas de la variabilidad espacial.
- iii. Determinar las causas de la variabilidad temporal.

### 5.2. MATERIAL Y MÉTODOS

Además de la metodología escogida en el capítulo anterior (apartado 4.2), con el fin de relacionar la medida de la precipitación penetrante debida a la condensación de la niebla con una medida directa y sencilla se instaló, en lo alto de la torre una estructura con una malla metálica cilíndrica de tipo "*Grunow'scher Nebelfänger*" (fabricante: R. Fuess Berlín – Steglitz), de 200 mm de altura y 100 mm de diámetro, el hilo de la red tenía un diámetro de 0,25 mm y la luz de la malla es de 1,5 mm, el cilindro metálico tenía una superficie de  $200 \text{ cm}^2$  igual que la superficie receptora del pluviómetro sobre el que se monta y del pluviómetro adyacente. Las cantidades de agua en ambos pluviómetros se pueden medir en un cilindro graduado normal referido a una superficie de  $1 \text{ m}^2$ . El dato que proporciona es una medida relativa de la captación, ya que se utiliza una superficie artificial para la captación, cuyo comportamiento no se puede equiparar al de la vegetación, sólo se toma como válido en el caso de que el pluviómetro adyacente tuviera una medida igual a 0; ya que si no, no se puede diferenciar si el superávit de volumen recogido por el captanieblas respecto al pluviómetro proviene de la colección de niebla o de mayor cantidad de lluvia por tener mayor superficie de interceptación para la misma al llover con un cierto ángulo. Las medidas se realizaron durante los periodos del 29 de octubre de 1993 al 11 de mayo de 1994 y del 1 de enero al 31 de diciembre de 1995, durante el primero de ellos con frecuencia de 2 ó 3 días y en el segundo semanal,

Para evaluar la heterogeneidad de la altura de la cubierta se determinó el índice de estratificación de la cubierta:

$$I_s = hc - H_0$$

Donde  $I_s$  es el índice de estratificación,  $hc$  es la altura media cuadrática, es decir la que corresponde al árbol de diámetro medio cuadrático y  $H_0$  es la altura dominante es decir la que corresponde al diámetro dominante, el de los 100 árboles de mayor diámetro por hectárea.

Las interpolaciones de los datos de precipitación y de las características de la cubierta se realizaron mediante la utilización del programa ArcView v. 3.0; se utilizó un tamaño de pixel de 1 m<sup>2</sup> y el método de los vecinos (escogiendo 12 puntos vecinos) sin barridos, los archivos *grid* fueron recortados con el tamaño y forma de la parcela para realizar las pruebas estadísticas.

La evaporacióntranspiración potencial diaria (mm día<sup>-1</sup>) se calculó mediante la ecuación de Türç (1961):

$$ET = [(R_g/41868 + 50) \times 0.013T_a] / (T_a + 15)$$

Donde:  $R_g$  total diario de radiación global (J m<sup>2</sup> día<sup>-1</sup>) y  $T_a$  significa temperatura media diaria de aire (°C).

## **5.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **5.3.1. VARIABILIDAD DE LA PRECIPITACIÓN PENETRANTE.**

#### **5.3.1.1. VARIABILIDAD ESPACIAL.**

De acuerdo con Lloyd y Marques (1988) la medida de precipitación penetrante es una variable independiente aleatoria que depende del error de los pluviómetros, de la precipitación y de la variabilidad espacial determinada por la cubierta. Se asume que los errores de los colectores son aleatorios y la variabilidad de la precipitación es usualmente un valor fijo. Incrementando el número de pluviómetros se reducen ambas contribuciones al error de la medida de la media (Lloyd y Marques, 1988). Así el efecto de la estructura de la cubierta es la única variable espacial y el incremento del número de colectores incrementa la definición de la estructura de la superficie de la cubierta, es por esto por lo que nos decantamos por el método de los 40 pluviómetros como anteriormente enunciamos.

De este modo para cada bosque habrá un óptimo de colectores fijos por área (Kimmins, 1973), fue por ello por lo que en el caso de los pluviómetro de 170 mm de diámetro se incremento el número de 15 a 40 tras 6 semanas de estudio al observar altos coeficientes de variación con el fin de conseguir para un ciclo anual un compromiso de <20% de coeficiente de variación. Esta variación espacial se diferenciará según el tipo de cubierta, siendo mayor según Reynolds y Neal (1991) en bosques mixtos de frondosas, como es nuestro caso, que en plantaciones coetáneas mono-específicas de coníferas. Crockford y Richardson (1983, 1990a) aluden a una serie de factores como diferenciadores de la cantidad de precipitación penetrante entre bosques, tales como el LAI, la hidrofobicidad y el ángulo de las hojas a lo que habría que añadir también de acuerdo con Herwitz (1987) el ángulo de las ramas.

Si para cada uno de los 40 pluviómetros se calcula la precipitación penetrante como el porcentaje de la precipitación durante el tiempo medido, la distribución encontrada no es normal (Figura.5-1), tiene un sesgo positivo de 1,101 y una curtosis de 0,243, sesgos positivos han sido igualmente encontrados por Robson *et al.* (1994) debido a la presencia de puntos de goteo y por Lloyd y Marques (1988), de acuerdo con estos últimos autores la utilización de errores típicos asumiendo una distribución normal conduce a errores en la estimación del error, recomendando la utilización de transformaciones

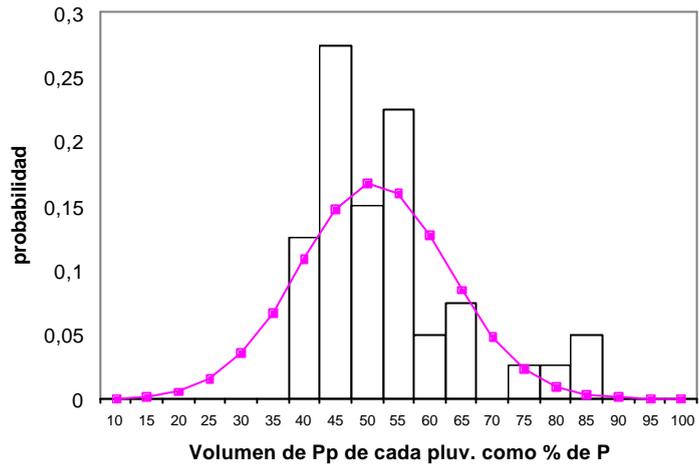


Fig. 5-1 Probabilidad de la distribución de frecuencias de la Pp como porcentaje de precipitación total para cada uno de las cuarenta posiciones muestreadas. Como línea la distribución normal para los datos existentes.

logarítmicas o de raíces cuadradas, en nuestro caso la que mejor resultado dio fue la logarítmica que normalizo el sesgo positivo, se eligió con base en un test de Chi-cuadrado tomando como los valores esperados los de una distribución gaussiana, y con esta corrección se trabajó posteriormente. Si comparamos el rango de esta distribución de frecuencias, que fue de 38-85%, con el rango tomado por otras registradas en un bosque tropical amazónico por Lloyd y Marques (1988), que varió entre 0-410% con el 29% por encima del 100%, con el de una plantación de *Pinus sylvestris* en Escocia (R.U.) medida por Gash y Stewart (1977) donde solo el 3% estaba por encima del 100% y en otra plantación de *Picea sitchensis* también en Escocia medido por Ford y Deans (1978) donde varió del 9-97% de la precipitación, observamos que la variabilidad de esta cubierta es menor. No obstante en los experimentos anteriores hubo recolocación de los pluviómetros por lo que a la variabilidad espacial muestreada sería mayor y a la variabilidad espacial se le sumaría la variabilidad estacional al comparar diferentes ubicaciones en diferentes periodos. Según Lloyd y Marques (1988) de haber recolocación el error típico sería menor, de acuerdo con lo propuesto por estos autores se puede estimar el error típico mediante el siguiente cálculo:  $s_n = s_N \left(1 + \sqrt{N/n}\right)$ , donde n es el número de muestras (en nuestro caso 20 muestras), y N es el número de localizaciones posibles en el esquema de muestreo (en nuestro caso 143 ver Figura. 4-1), obteniendo un valor de 19,37, a partir de un error estándar para los 40 pluviómetros de 6,67, pasando así de un 2% de error de la precipitación total a un 5,9%, mostrando un incremento similar al obtenido con este método para la interceptación por Jetten (1996).

Se pueden observar diferencias sistemáticas en los volúmenes recogidos para cada punto de recogida como se muestra en las Figuras 5-2, 5-3 y 5-4, mediante la interpolación de los datos de los pluviómetros cada semana. Estas diferencias que fueron igualmente observadas por Robson *et al.* (1994), son debidas a que existen puntos que reciben repetidamente grandes o pequeños volúmenes de agua, indicando que ese efecto sistemático esta causado por la estructura del bosque (Robson *et al.*,1994). Se realizó un análisis de varianza, entre los porcentajes de cada pluviómetro respecto de la media total para los datos de las 25 semanas de lluvia, para confirmar que las localizaciones eran diferentes para un nivel de confianza del 95%, cuyos resultados se muestran en la Tabla 5-1, confirmándose que si existen diferencias significativas entre algunas posiciones. Estas diferencias deben de ser atribuidas a fenómenos de la variación de la cubierta.



Según Herwitz (1987) los factores que afectan a la distribución espacial de la precipitación neta incluyen la geometría, rigidez, capacidad de retención de agua y la distribución de las superficies vegetales desde las que el agua drena sobre el suelo. Es por ello por lo que se intentó aproximar un análisis para conocer cuál de los parámetros de la superficie vegetal era el que en mayor medida controlaba el proceso. Así del mismo modo que se han interpolado los volúmenes de agua, se realizó una interpolación para algunos parámetros de la cubierta como fueron los diámetros normales, las secciones normales, las alturas y las alturas de la cubierta (alturas de copa), como se puede observar en las Figura. 5-5. Con los datos obtenidos se realizaron regresiones con el valor de cada pixel (1 m<sup>2</sup>) y el valor del pixel con las mismas coordenadas cartesianas obtenido en el anterior cálculo de las cantidades de precipitación penetrante totales para el periodo de estudio, obteniéndose el valor más alto del coeficiente de correlación para las secciones normales (Figura. 5-6). La interpretación de este resultado puede parecer paradójica, ya que cabría esperar que en aquellas zonas del bosque donde existiera menor cobertura arbórea llegase mayor cantidad de agua al suelo no obstante es posible que en esas zonas se produzcan sombras de lluvia y que la cantidad de precipitación incidente sea menor; Ford y Deans (1978) y Herwitz y Slye (1995) apuntan como otro factor la variabilidad de la precipitación incidente sobre el bosque, como son las de las sombras laterales que producen unos árboles sobre otros al llover con altas velocidades de viento. Otro factor podría ser que el goteo desde los troncos fuese mayor en esas zonas produciendo un rápido y mayor drenaje, o que las zonas de mayor concentración de sección normal se correspondan a árboles de gran porte que por fenómenos de competencia disminuyan la densidad de árboles, de forma que realmente aunque la sección normal sea grande, la cantidad de vegetación sea menor que en otras zonas de mayor densidad de árboles con menores secciones normales.

Finalmente es de notar que los pluviómetros que tuvieron regresiones significativas entre los porcentajes de volúmenes anuales y la dirección del viento se encontraron entre los que recogieron mayor volumen (p.e.11, 9, 7, 30, 18) hallándose en posiciones cercanas a grandes árboles cuyas alturas sobre el dosel pueden ser las causantes de estas significativas regresiones.

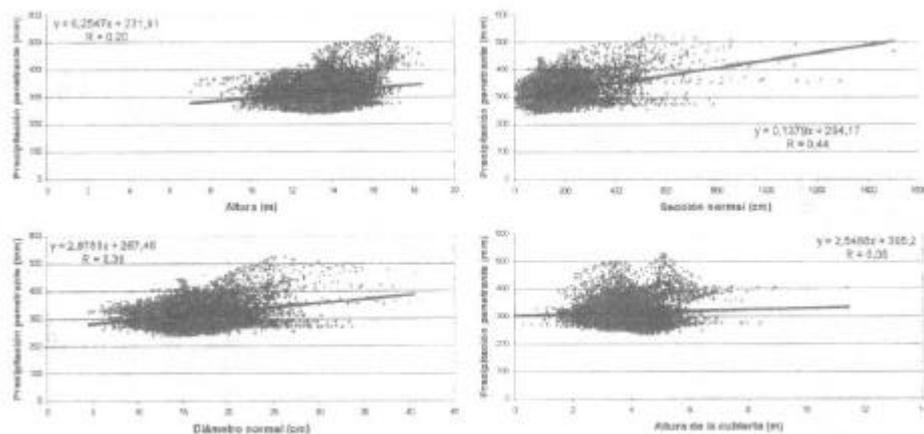


Fig. 5-6 Rectas de regresión y coeficientes de correlación entre la precipitación penetrante anual y los parámetros de la cubierta realizada para cada m<sup>2</sup> de la parcela.

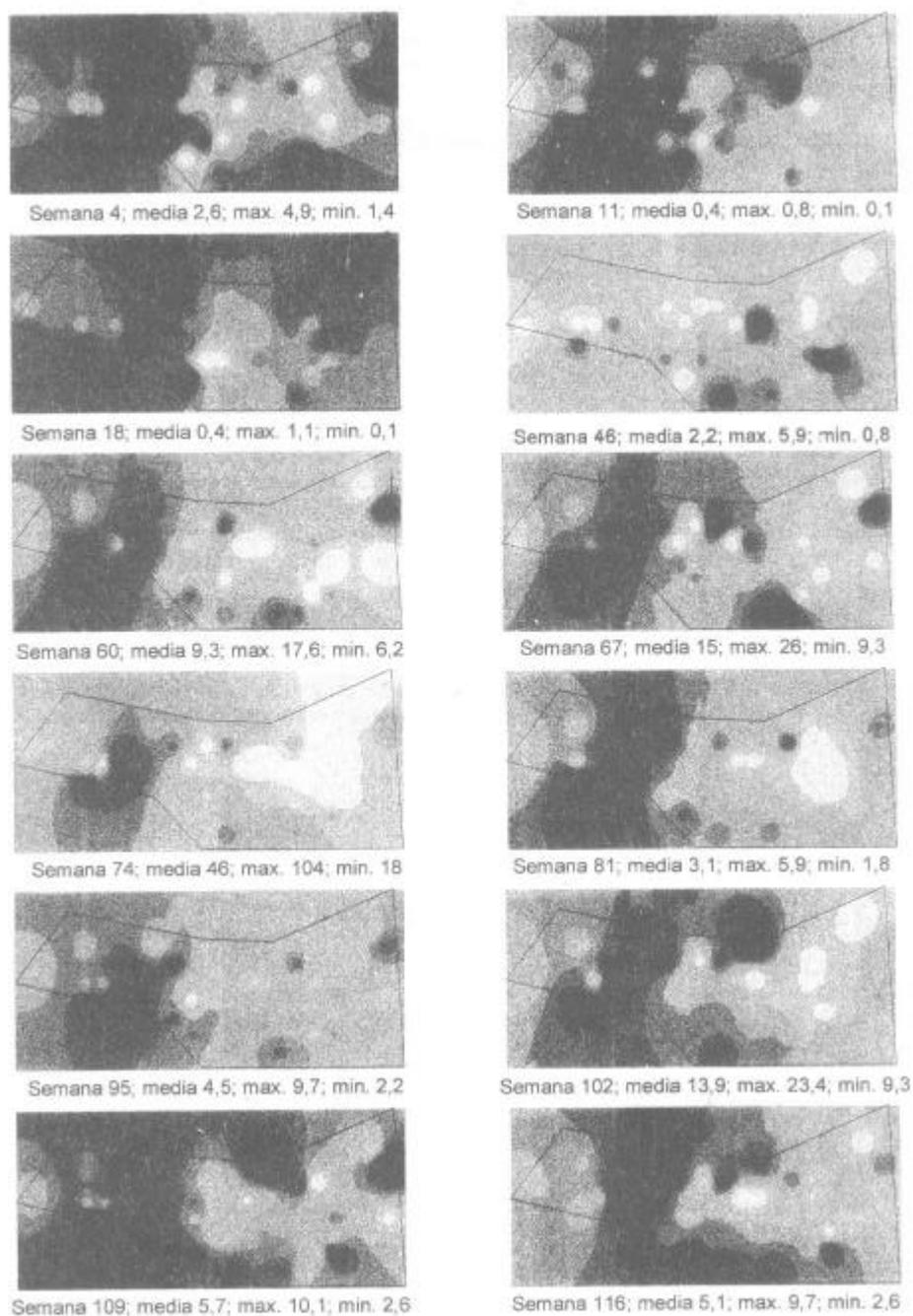


Fig. 5-2 Mapa de precipitación penetrante en porcentaje de la media para cada semana de medida, con los valores medios, máximos y mínimos. La interpolación se realizó con los 12 puntos vecinos más cercanos. Se ilustran 13 clases de intensidades de claro a oscuro que abarcan el rango existente en cada semana. Para conocer el valor de cada clase ver Fig. 5-4.

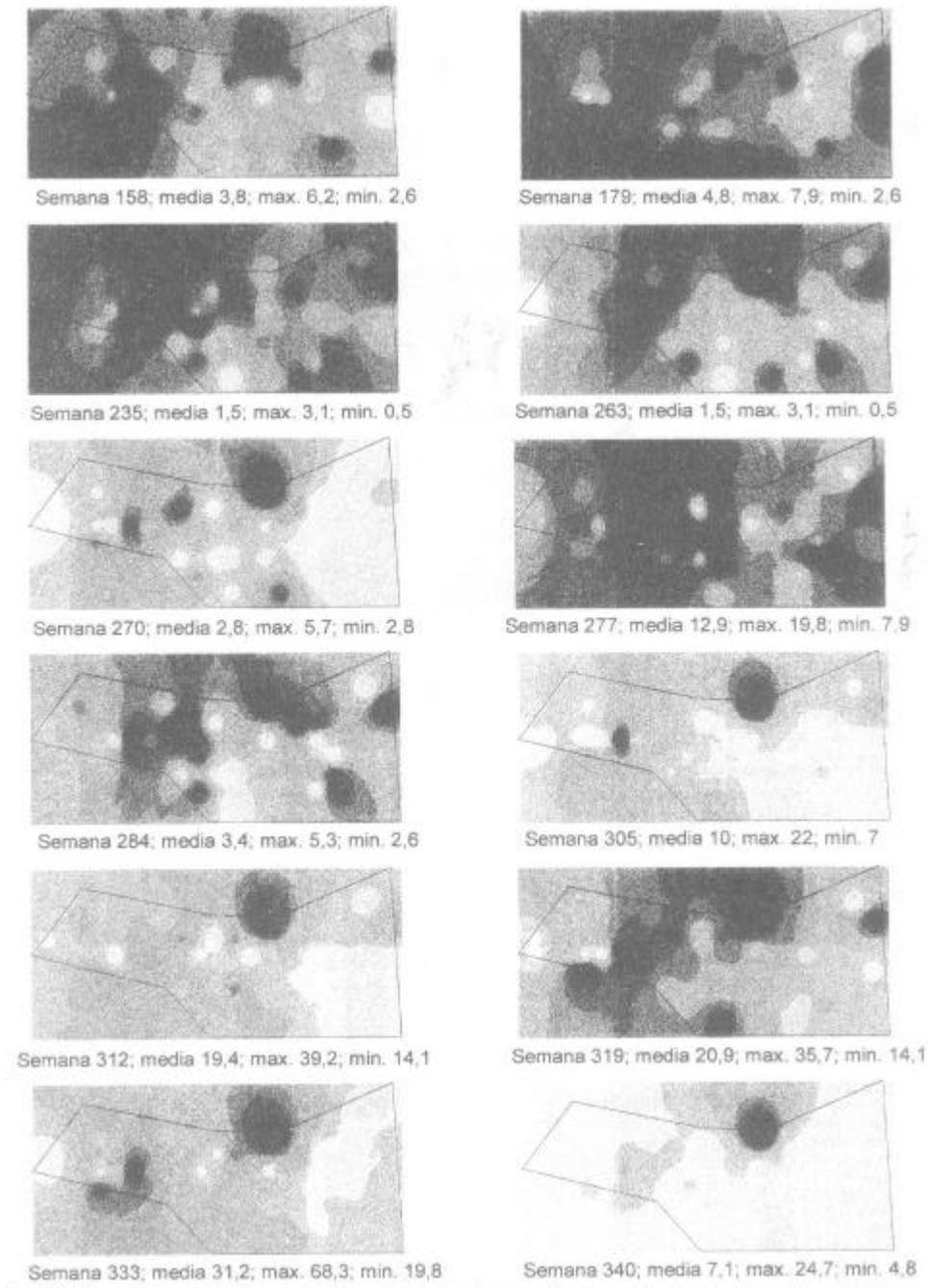


Fig. 5-3 Mapa de precipitación penetrante en porcentaje de la media para cada semana de medida, con los valores medios, máximos y mínimos. La interpolación se realizó con los 12 puntos vecinos más cercanos. Se ilustran 13 clases de intensidades de claro a oscuro que abarcan el rango existente en cada semana. Para conocer el valor de cada clase ver Fig. 5-4.

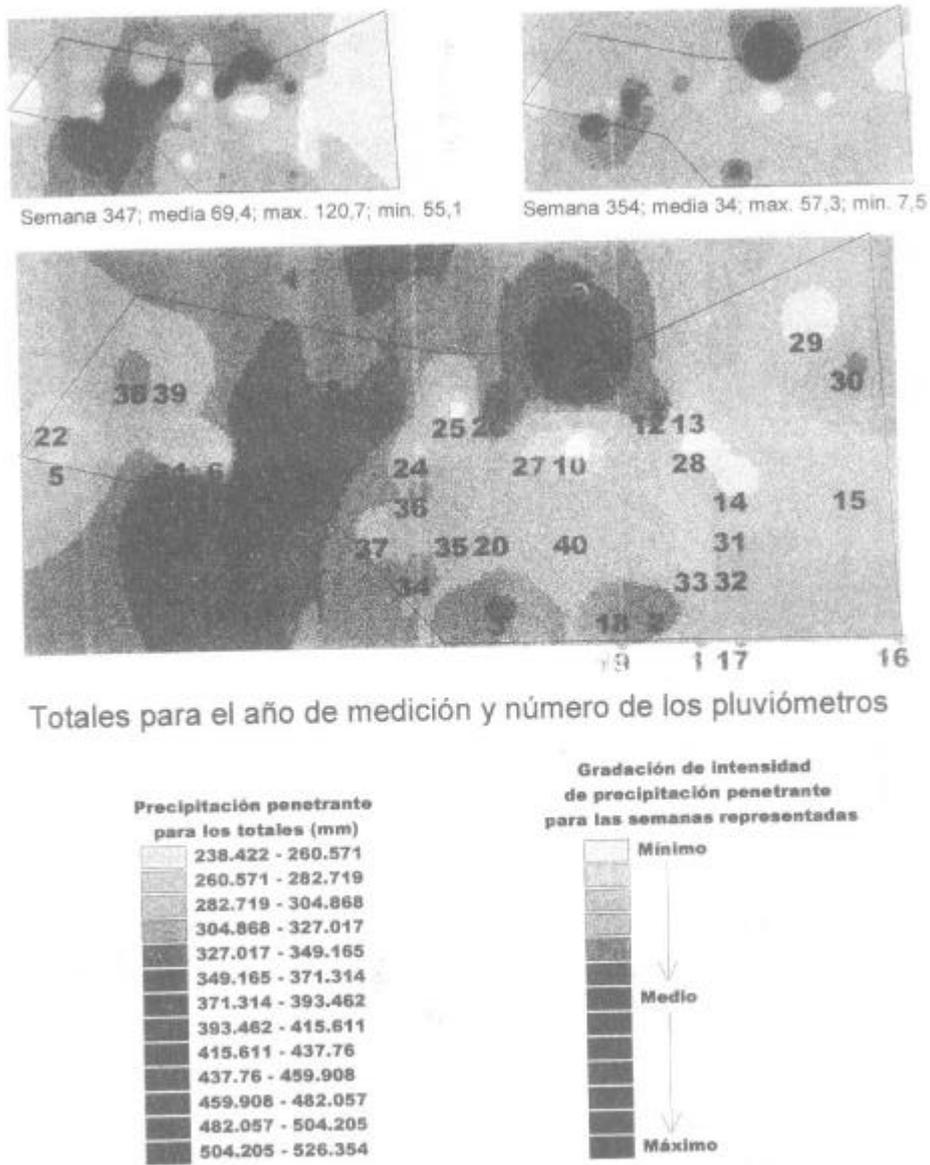


Fig. 5-4 Mapa de precipitación penetrante en porcentaje de la media para cada semana de medida, y para el total anual con los valores medios, máximos y mínimos. La interpolación se realizó con los 12 puntos vecinos más cercanos. Se ilustran 13 clases de intensidades de claro a oscuro que abarcan el rango existente en cada semana. En el total anual se adjuntan las localizaciones de cada pluviómetro.

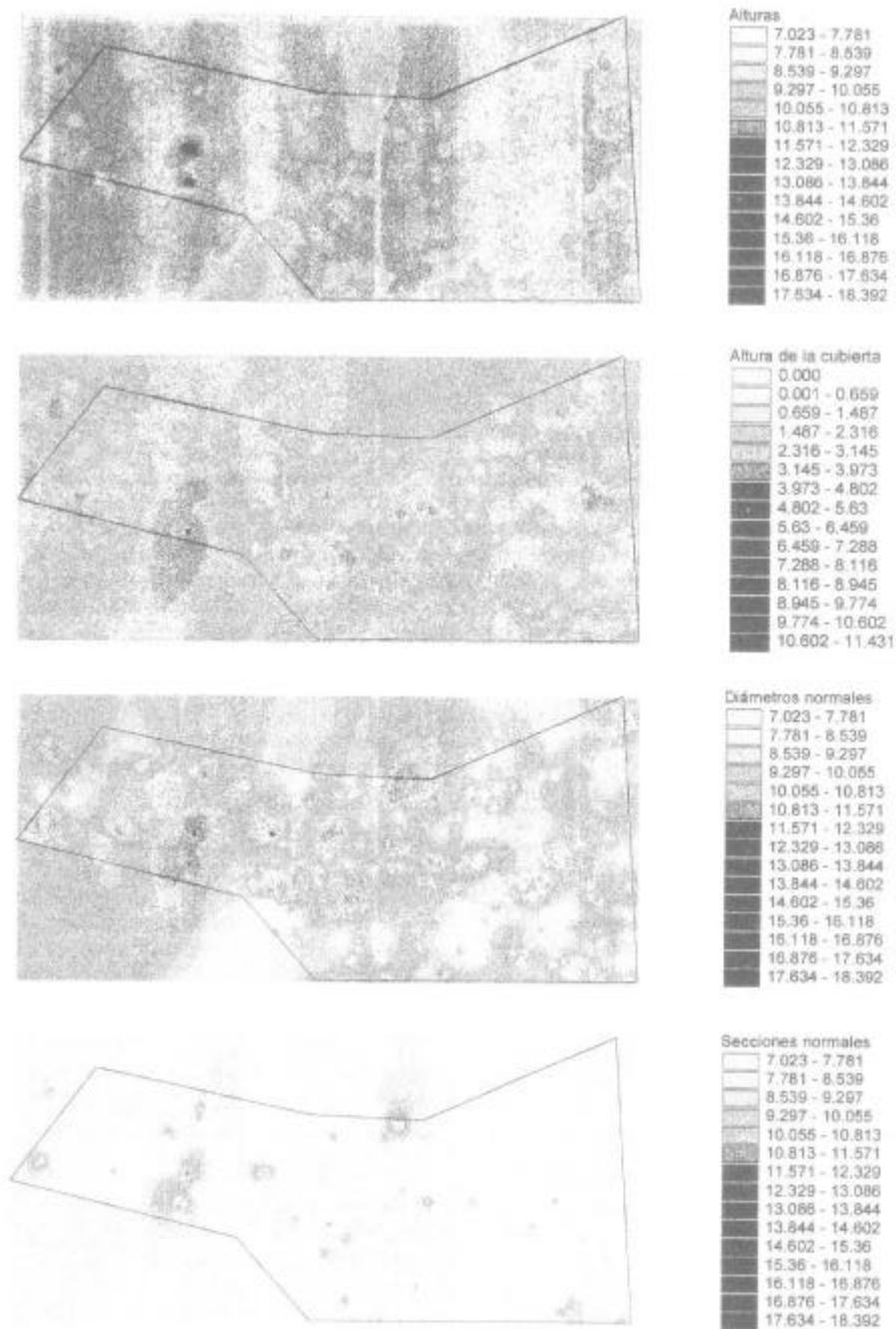


Fig. 5-5 Mapa de los parámetros de cubierta, de arriba abajo: altura (m), altura de la cubierta (m), diámetro normal (cm) y sección normal (cm<sup>2</sup>). La interpolación se realizó con los 12 puntos vecinos más cercanos. Se ilustran 15 clases de intensidades de claro a oscuro que abarcan el rango existente para cada variable, junto con los valores de las intensidades en la leyenda.

### 5.3.1.2. VARIABILIDAD TEMPORAL. EFECTO DE LOS PARÁMETROS METEOROLÓGICOS SOBRE LA PRECIPITACIÓN PENETRANTE.

A lo largo del periodo de medición se calculó para cada semana la precipitación penetrante para la parcela como porcentaje de la precipitación total, éste valor varía notablemente de una semana a otra, tal y como podemos observar en la Figura. 5-7, donde se representa este valor para cada semana, frente a la precipitación. Al observar ésta figura parece existir una tendencia curvilínea entre los valores calculados y la cantidad de precipitación, al igual que lo acontecido para Martínez-Meza y Whitford (1996), que se adaptaron mejor a los modelos logarítmicos, seleccionados desde el punto de vista de la máxima  $r^2$ , después de haber probado varios modelos, Figura. 5-7. Éstas repuestas son curvilíneas desde el inicio, el máximo de la precipitación penetrante ocurre sólo después de una cantidad de lluvia, ya que por debajo de esta cantidad la interceptación predomina. Los modelos semilogarítmicos han sido realizados también por Viville *et al.* (1993). Las causas de estas curvas se discutirán detalladamente en el capítulo 6.

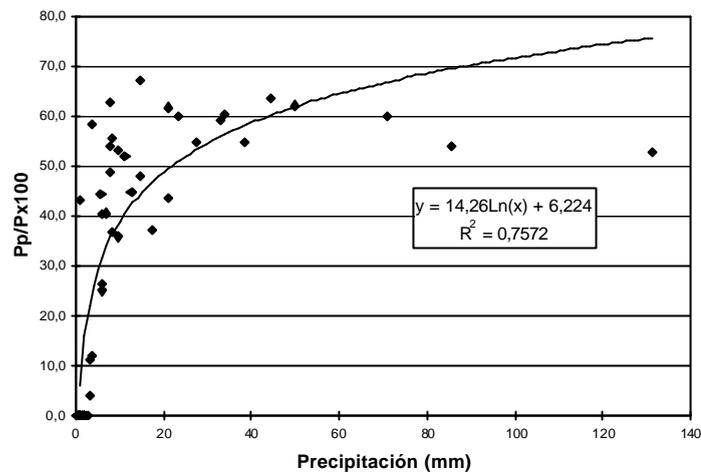


Fig. 5-7 Cantidad de precipitación semanal frente al porcentaje de la precipitación penetrante media sobre la precipitación.

Existen interacciones entre la variabilidad espacial y la temporal, así, con el transcurso del tiempo, para los valores acumulados la variabilidad entre los puntos de muestreo disminuye. El proceso se visualiza al representarlo en la Figura 5-8 donde en el eje de abscisas se representan las semanas medidas y en el eje de ordenadas el coeficiente de variación de la media acumulada de las mismas y desviación típica acumulada, el gran descenso se da con las primeras precipitaciones que fueron intensas, tendiéndose a estabilizarse para iniciar otra etapa de descenso con las siguientes precipitaciones intensas.

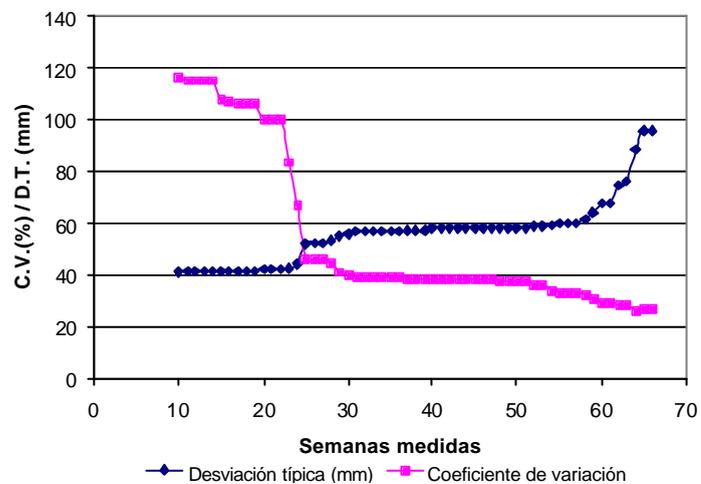


Fig. 5-8 Semanas medidas frente al coeficiente de variación de la media acumulada de las mismas y el error estándar acumulado.

No obstante ambos estadísticos, la desviación típica como el coeficiente de variación de la media están relacionadas con el volumen de precipitación penetrante medio para esa semana, el primero de ellos de forma lineal ( $p < 0,001$ ) y el segundo de forma potencial ( $p < 0,01$ ) como se observa en la Figura. 5-9. Así el coeficiente de variación disminuye de manera más rápida de 60% a 30% en un primer tramo de 0 a 20 mm de Pp, para tender a estabilizarse posteriormente, este tipo de resultados ya había sido registrados por Kimmins(1973) y confirmados por Ibrahim (1979), este último con una mayor pendiente para la desviación típica (0,25).

Como comprobamos anteriormente para la relación entre la precipitación penetrante y la cantidad de precipitación total, diferentes cantidades semanales de precipitación total pueden generar cantidades similares de precipitación penetrante y viceversa, de modo análogo a lo ocurrido con el escurrido cortical. Como se estudiará en el capítulo 6 se debe a las diferencias en los patrones de lluvia y de la evaporación potencial para cada evento. No obstante y aún careciendo de valor modelizador al constituirse como una relación empírica podemos desarrollar modelos lineales múltiples de análisis de regresión para examinar los efectos de parámetros meteorológicos sobre los volúmenes de precipitación penetrante. Los modelos tienen valor para los propósitos de pronóstico y para explicar desde el punto de vista de estos parámetros meteorológicos la causa de variación de los volúmenes de precipitación penetrante. De acuerdo con Crockford y Richardson (1990a) los factores que condicionan el proceso son la intensidad de la lluvia, la velocidad y dirección del viento. Con respecto de las regresiones simples lineales entre la interceptación y la precipitación Jackson (1975) indicó que se debían tener en cuenta variables tales como la intensidad, la duración e intervalo entre los eventos. Igualmente Zinke (1967) indicó que las pérdidas por interceptación se veían influidas por la evaporación (clima), intensidad y duración de la lluvia. La desventaja de estas relaciones empíricas simples es que no tienen en cuenta ni la intensidad de la lluvia ni la velocidad del viento mientras llueve, y sólo pueden ser extrapoladas a los mismos bosques en el mismo clima (Gash, 1979), por lo que esta regresión múltiple solucionaría en parte el problema

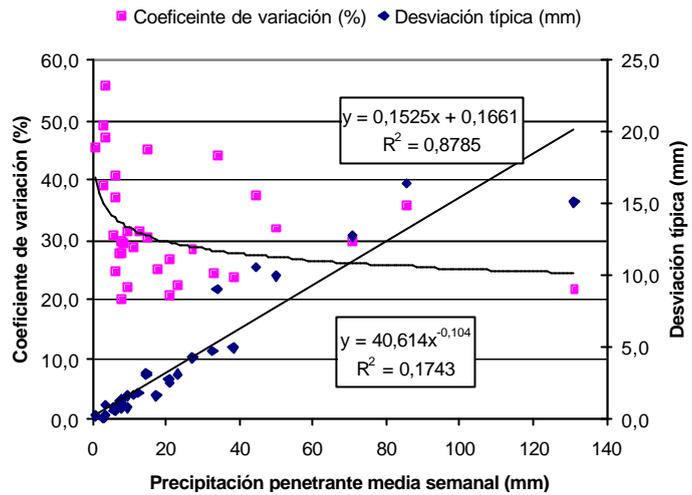


Fig. 5-9 Variaciones del error típico y del coeficiente de variación de la media de los valores semanales del periodo de observación de 34 semanas a partir de los 40 embudos.

Las variables introducidas en el análisis fueron tomadas semanalmente durante el año de investigación, y fueron además de la ya constatada como significativa volumen de precipitación semanal, las siguientes: lluvia diaria media, max. y min.; temperatura media, max. y min. durante la lluvia y durante la semana; nº de horas que llueven durante la semana, intensidad horaria de la lluvia media, max. y min.; radiación media, max. y min. durante la lluvia y durante la semana; humedad media, max. y min. durante la lluvia y durante la semana; velocidad del viento media, max. y min. durante la lluvia y durante la semana y por último Evapotranspiración media, max. y min. mientras llovía y durante la semana. El procedimiento realizado con todas las variables, fue de regresiones simples con la precipitación penetrante y entra ellas mismas (para evitar colinealidad); estas variables para ser incluidas en el modelo tenían que ser significativas para una  $p < 0,05$ , las relaciones estadísticas que surgieron se pueden observar en la Tabla. 5-2.

Tabla. 5-2 Modelos lineales desarrollados para los volúmenes de precipitación penetrante y los parámetros meteorológicos.

Variable	B	SE B	Beta	Sig T
Precipitación (mm)	0,486	0,022	0,879	0,0000
Duración de lluvia semanal (horas)	-0,071	0,019	-0,082	0,0008
Cantidad max. P en un día (mm)	0,269	0,045	0,198	0,0000
Constante	-0,516	0,123		0,0002

El modelo lineal para los volúmenes de precipitación penetrante estuvo compuesto por tres variables que se observan en la Tabla. 5-2, y absorbió el 100% de la variación ( $r^2 = 0,998$ ), con un error típico de 0,533, y una significación de la F del análisis de varianza fue de 0,0000.

El modelo explica que cuanto mayores sean los volúmenes de precipitación, y más concentrada sea esa precipitación, es decir que llueva en menos tiempo y en más cantidad en un día, más alta será la cantidad de agua que llegue como precipitación penetrante al suelo del bosque. Posiblemente sea debido a que se produce un descenso en la interceptación, de acuerdo con Jarvis (1994), que afirmó que en climas donde las lluvias ocurren en eventos cortos e intensos las pérdidas por interceptación serán menores. Un caso análogo se observó con la intensidad horaria de la lluvia y las relaciones de encauzamiento. No obstante las causas de este fenómeno viene dadas por la saturación de la cubierta en determinadas ocasiones y en otras debidas a las bajas intensidades de las precipitaciones estas no llega a ser saturada, como se comprobará en detalle al explicar los mecanismos e la evaporación por interceptación y el drenaje en el Capítulo 6. De acuerdo con Rutter *et al.* (1971) las pérdidas por interceptación se expresan frecuentemente como porcentaje de la precipitación. Expresadas de esta forma se puede esperar, y frecuentemente así se muestra, que está inversamente relacionada con la intensidad de la lluvia.

### 5.3.2 CANTIDAD DE PRECIPITACIÓN PENETRANTE. COMPARACIÓN CON OTRAS CUBIERTAS.

El resultado final de precipitación penetrante para el periodo medido fue de 328,6±19,4 mm lo que equivale a un porcentaje de la precipitación de 52±5,9%. Rutter *et al.* (1971) indicó que no se puede esperar que la interceptación para una especie dada no guarde la misma proporción de lluvia ni en diferentes sitios con diferentes climas ni en diferentes épocas del año. Es por ello por lo que se puede establecer una comparación entre diferentes climas con diferentes especies y los datos obtenidos en el bosque de laurisilva, tal y como se observa en la Tabla. 5-3.

Tabla. 5-3 Porcentaje de precipitación penetrante, precipitación total anual, lugar y tipo de vegetación para algunos tipos de cubiertas boscosas del mundo (1) Media de verano e invierno. (2) Media anual de precipitación. (3) observaciones de 163 días. (a) Referencias citadas por Lima (1987).

Autor	Vegetación	Lugar	Precip (mm)	Pp (% de la precip.)
Gash y Stewart (1977)	Bosque de <i>Pinus pinaster</i>	Reino Unido	595 (2)	67,5
Ford y Deans (1978)	Plantación <i>Picea sitchensis</i>	Reino Unido	1639	43
Ibrahim (1979)	Bosque <i>Pinus pinea</i>	Francia	750	70
Shibata y Sakuma (1996)	Bosque deciduo	Japón	1.324	75±4
Shibata y Sakuma (1996)	Bosque de coníferas	Japón	1.324	85±4
Andersson y Pyatt (1986)	Bosque de <i>Picea sitchensis</i>	Reino Unido	1037	58
Andersson y Pyatt (1986)	Bosque de pino Lodgpole	Reino Unido	1037	61
Andersson y Pyatt (1986)	Bosque de <i>Picea sitchensis</i>	Reino Unido	997	50
Wheather <i>et al.</i> (1987)	Bosque de <i>Picea abies</i>	Reino Unido	30	71
Wheather <i>et al.</i> (1987)	Bosque de <i>Picea abies</i>	Reino Unido	155	69
Crockford y Richardson (1990b)	Bosque de <i>Pinus pinaster</i>	Australia	679 (1)	72,7
Johnson (1990)	Plantación <i>Picea sitchensis</i>	Reino Unido	2200 (2)	69
Reynolds & Neal (1991)	Plantación <i>Picea sitchensis</i>	Reino Unido	1.603	63-70
Kelliher <i>et al.</i> (1992)	Plantación de <i>Pinus radiata</i>	Nueva Zelanda	1154 (3)	75
Viville <i>et al.</i> (1993)	Bosque de <i>Picea abies</i>	Francia	1400 (2)	65
Ignatova (1995)	Bosque de <i>Picea abies</i>	Bulgaria SO	580	73,1
Ignatova (1995)	Bosque de <i>Abies alba</i>	Bulgaria SO	580	71,7
Ignatova (1995)	Bosque de <i>Pinus sylvestris</i>	Bulgaria SO	580	73,2
Niklinska, <i>et al.</i> (1995)	Bosque mixto	Sur de Polonia	729	75
Shibata y Sakuma (1995)	<i>Pinus strobus</i> y <i>P.koraiensis</i>	Japón	1.189	85±4
Taniguchi <i>et al.</i> (1996)	<i>Pinus densiflora</i>	Japón	1.290	78,1
Taniguchi <i>et al.</i> (1996)	<i>Pinus densiflora</i>	Japón	1.290	68,9
Durocher (1990)	Bosque de <i>Quercus rubra</i>	EE.UU:	24	61
Neal <i>et al.</i> (1993)	Bosque de <i>Fagus sylvatica</i>	Reino Unido	64	82
Shibata y Sakuma (1995)	Bosque de frondosas	Japón	1.189	75±4

Martínez-Meza (1996)	arbustos de desierto	México	230 (2)	55,75(1)
Martínez-Meza (1996)	arbustos de desierto	México	230 (2)	55,8(1)
Martínez-Meza (1996)	arbustos de desierto	México	230 (2)	62,85(1)
Lloyd y Marques (1988)	Bosque tropical	Brasil	2721	91±2
Veneklass y vanEk (1991)	Bosque tropical montano bajo	Colombia	2.115	88
Veneklass y vanEk (1991)	Bosque tropical montano alto	Colombia	1.453	82
Brookes y Turner (1964) (a)	Bosque <i>Eucalyptus regnans</i>	Australia		73,5
Smith (1974) (a)	Bosque de Eucaliptos	Australia		89
Lima (1976) (a)	Plant. <i>Eucalyptus saligna</i>	Brasil		83,6
Duncan <i>et al.</i> (1978) (a)	Bosque <i>Eucalyptus regnans</i>	Australia		72,5
Duncan <i>et al.</i> (1978) (a)	Bosque <i>Eucalyptus regnans</i>	Australia		76
Duncan <i>et al.</i> (1978) (a)	Bosque de Eucaliptos	Australia		75,4
Westman (1978) (a)	Bosque <i>Eucalyptus signata</i>	Australia		65
Westman (1978) (a)	Bosque <i>Eucalyptus umbra</i>	Australia		75
Gosh <i>et al.</i> (1978)	Plant. <i>Eucalyptus tereticornis</i>	India		80,8
Feller (1981)	Bosque <i>Eucalyptus regnans</i>	Australia		74,5
Feller (1981)	Bosque <i>Eucalyptus obliqua</i>	Australia		84,5
Dunin <i>et al.</i> (1988)	Bosque de <i>Eucalyptus</i>	Australia	1.108	85
Crockford y Richardson (1990b)	Bosque de <i>Eucalyptus sp.pl.</i>	Australia	679 (1)	84,5
Gras (1993)	Plant. <i>Eucalyptus globulus</i>	España		79

Como se puede observar en la Tabla 5-3 el resultado obtenido entre en el amplio rango de las coníferas y se acerca al de los desiertos con un régimen de lluvias menores, que a los bosques más tropicales donde al ser la precipitación mayor y más intensa alcanza el valor máximo

En algunos casos, como las cubiertas de frondosas del este de Estados Unidos, las regresiones anuales entre la precipitación neta y la precipitación anual se han encontrado como remarcablemente constantes (Helvey y Patric, 1965). Podemos comparar igualmente la pendiente de la recta de la regresión desarrollada anteriormente (Capítulo 4) con la de otras formaciones del mundo (Tabla. 5-4) obteniendo el resultado más bajo de la bibliografía.

Tabla. 5-4 Valores de las rectas de regresión para algunos tipos de cubiertas boscosas.

Autor	Tipo vegetación	a	b	r <sup>2</sup>
Skeeffington y Sutherland (1995)	<i>Pinus sylvestris</i>	0,005	0,87	0,82
Skeeffington y Sutherland (1995)	<i>Picea sitchensis</i>	0,11	0,84	0,89
Skeeffington y Sutherland (1995)	<i>Picea abies</i>	0,11	0,84	0,89
Dewalle y Swistock (1994)	Bosque deciduo	-0,85	0,83	0,98
Dewalle y Swistock (1994)	<i>Pinus resinosa</i>	-1,15	0,85	0,98
Dewalle y Swistock (1994)	<i>Picea abies</i>	-3,44	0,88	0,94
Taniguchi <i>et al.</i> (1996)	<i>Pinus densiflora</i>	-1,45	0,81	0,96
Taniguchi <i>et al.</i> (1996)	<i>Pinus densiflora</i>	-1,26	0,71	0,98
Ibrahim (1979)	<i>Pinus pinea</i>	-0,95	0,68	0,97
Ibrahim (1979)	<i>Pinus pinea</i>	-1,87	0,80	0,97
Este trabajo (1998)	Laurisilva	-0,59	0,56	0,99

La desventaja de estas relaciones empíricas es que no tiene en cuenta ni la intensidad de la lluvia ni la velocidad del viento mientras la lluvia, y sólo pueden ser extrapoladas a los mismos bosques en el mismo clima (Gash, 1979), siendo mayor desventaja en regiones costeras con altas velocidades de los vientos (Hörmann *et al.*, 1996). Además los modelos puramente empíricos (como las rectas de regresión) son más falibles cuando, en términos de diseñar la provisión de agua de un sistema, su veracidad es más crítica, p.e. en las extremas situaciones de sequía; es así que los modelos basados en la física con empirismos restringidos funcionan mejor (Gash y Morton, 1978)

### 5.3.3. APORTE DE LA PRECIPITACIÓN HORIZONTAL A LA PRECIPITACIÓN PENETRANTE.

Para el presente trabajo se utiliza la definición de precipitaciones de niebla (o precipitaciones horizontales) de Bauer (1963) como las *"precipitaciones adicionales, es decir, las que no se pueden medir con el pluviómetro normal"*, definición de acuerdo con la de Kämmer (1974) que diferencia entre condensación de niebla, la deposición en obstáculos bajo la influencia del viento, de la precipitación de niebla como el producto medible de la condensación, ya que como señaló Bauer (1963) *"de las gotitas de niebla caen al suelo por entre el ramaje de los árboles solo una parte, la otra humedece la masa vegetal y se evapora después"*, escapamos así de la definición de Santana (1990) como *"las gotitas de agua condensadas en los obstáculos que se interponen a las nubes arrastradas por el viento, que posteriormente se transforman en gotas de mayor diámetro que por acción de la gravedad caen al suelo"*, ya que este concepto, así definido, genera una gran imprecisión en su medida real. Es por ello por lo que de existir precipitación horizontal sería una parte de la precipitación penetrante.

La precipitación de niebla depende de 5 factores principalmente: La magnitud de las gotas de agua, la densidad de la niebla, el viento, la temperatura y el perfil, volumen y constitución de la superficie del obstáculo (Merriam, 1973) a los que habría que añadir otros factores señalados por Santana (1990) referidos a Canarias como el tipo de vegetación, las características orográficas, la orientación y la altitud.

Siempre que el captanieblas recogió agua ésta también se encontraba en el pluviómetro por lo que no se pudo deducir que se tratará de precipitación de niebla, por lo que los datos del captanieblas no fueron utilizados.

Sin embargo los datos de precipitación penetrante y escurrido cortical pueden aportar información sobre este fenómeno, ya que los resultados de los análisis lineales que se desarrollaron para examinar los efectos de parámetros meteorológicos sobre los volúmenes de precipitación penetrante (Apartado. 5.3.2), mostraron que los factores determinantes de la precipitación horizontal, como los parámetros semanales de la velocidad de viento, como los de la humedad relativa y los de la temperatura no influyeron significativamente en la variación de la precipitación penetrante, y mientras que factores ligados a los volúmenes y tipo de lluvia fueron los que absorbieron el 100% de la variación sobre esta precipitación penetrante. De acuerdo a la definición por la que se ha optado anteriormente, dentro de la precipitación penetrante podría existir una porción que fuera causada por la precipitación horizontal. Siendo los parámetros climatológicos humedad y viento los que afectan a este tipo de precipitación y careciendo ambos de una relación significativa con la precipitación penetrante, y en vista de no existir ningún evento evaluable del captanieblas, podemos afirmar que no existe drenaje de la precipitación horizontal en la parcela de Agua García.

Estos resultados estarían de acuerdo con los obtenidos por Kämmer (1974), quien concluyó que la ganancia de agua *"...apenas si tiene importancia ecológica para la mayoría de las especies de árboles de laurisilva. Sólo el monte bajo de Erica scoparia y en los bosques de laurisilva ricos en epífitas, llevan el sello de la precipitación de niebla. En los bosques de laurisilva "normales" que se encuentran en Tenerife, al igual que en el resto de las islas, sólo en algunas zonas y de manera ocasional puede aparecer precipitación de niebla, pero esta apenas llega a tener importancia decisiva."*

A la hora de examinar los factores que pueden explicar la ausencia de precipitación horizontal, sin entrar en aspectos climáticos, cabe destacar los topográficos y los ligados a la vegetación. Las condiciones topográficas de la parcela con una pendiente del 10% no favorecen la captación. Kämmer (1974) afirmó que la precipitación de niebla sólo es fructífera en los márgenes

de las colonias vegetales o en las pendientes muy pronunciadas y esto por lo general sólo ocurre en espacios pequeños.

Diversos aspectos de las masas forestales tales como la distancia entre los árboles pueden modificar esta recolección, así cuanto más separados estén los árboles, más claros existan o más se reduzcan los tamaños de los árboles, permitiendo la entrada del viento con la niebla, más agua cogerán de acuerdo con diversos autores (Kämmer, 1974; Santana, 1986 y Schemenauer y Cereceda 1992), sin embargo en la parcela no hay ningún calvero y la densidad es alta (1.693 árboles por hectárea). Igualmente Kämmer (1974), Höllermann (1981) y Santana (1986) afirmaron que en los bosques cerrados las precipitaciones de niebla sólo se producen en las partes de los árboles que sobresalen y en los bosques situados en los cauces y laderas de barrancos estrechos la precipitación de niebla sería nula. Según Schemenauer y Cereceda (1994) la diferencia entre un terreno forestado o uno sin bosque en la cantidad de agua que recibe o recoge de la niebla es mínima, porque la parte de las copas del bosque se comporta frente a las nieblas del mismo modo que el suelo sin vegetación. En el caso de la parcela de Agua García el índice de estratificación sería de 2,5 m, lo que se consideraría como bajo y sumado a los anteriores factores: baja pendiente, la ausencia de calveros y alta densidad, daría lugar a una pequeña superficie de contacto frente a la niebla.

Sin embargo según diversos autores (Santana, 1986; Schemenauer y Cereceda 1992) lugares específicos tales como las crestas de los sistemas montañosos pueden recoger más agua, sin embargo "este efecto es pequeño a escala regional" (Schemenauer y Cereceda, 1994), en el caso de Tenerife estas serían las laderas de barlovento expuestas a los vientos alisios. Pasaría lo mismo para un árbol aislado, así distintos autores (Santana, 1986; Schemenauer y Cereceda, 1994) aseguraron que los árboles aislados son los que ofrecen valores más altos de precipitación de niebla, hecho que había sido contrastado en la isla de Tenerife por Ceballos y Ortuño (1952) y Kämmer (1974) y por diversas experiencias en las islas occidentales llevadas a cabo por el ICONA realizadas bajo árboles singulares y algunas veces en los laterales del bosque, que han sido expuestas por Santana (1986) sin que se puedan extraer conclusiones claras de las mismas.

Finalmente destacar que el hecho de que no recoja más agua una superficie forestada de una que no lo está, no quiere decir que no existan efectos beneficiosos de la vegetación sobre la hidrología, tales como disminuir la erosión, aumentar la retención de agua del suelo, etc.

## **5.4. CONCLUSIONES.**

- Se calculo el porcentaje de la precipitación penetrante en la parcela de medida como el 52% de la precipitación incidente con un error estimado que asciende al 5,9%, debido a su variabilidad espacial, resultando no obstante en comparación con otros bosques del mundo un valor bajo.
- Existen diferencias significativas en la recogida de volúmenes de agua que se mantienen durante el periodo de estudio. Las variaciones que se producen en cada punto de recogida son debidas a la dirección y velocidad del viento y a la temperatura y humedad relativa del aire, variables que controlan la evaporación. Las causas de la variabilidad espacial debidas a los parámetros de la cubierta, han sido probadas mediante un análisis espacial, teniendo la sección normal la mayor importancia sobre la variación espacial de la precipitación penetrante.
- Los diferentes porcentajes de la precipitación penetrante con respecto a la precipitación son debidos además de a las cantidades de lluvia caídas a la intensidad de las mismas. Al comparar los resultados obtenidos en el bosque de laurisilva canaria con otros biomas del mundo podemos afirmar que los valores de precipitación

penetrante son muy bajos, pudiéndose únicamente comparar a algunos bosques de coníferas.

- No existe ningún tipo de evidencia que haga inducirnos a pensar que durante el periodo de medida existió algún evento de precipitación horizontal, lo que parece estar de acuerdo con la bibliografía existente sobre el tema.

## 5.5. BIBLIOGRAFÍA

- Anderson, A.R. & Pyatt, D.G., 1986. Interception of precipitation, by pole-stage, Sitka spruce and lodgepole pine and mature Sitka spruce at Kielder forest, Northumberland. *Forestry*, 59(1):29-38.
- Bauer, E. 1963. Nuevo método para medir las precipitaciones horizontales (provinientes de las niebla). *Montes* 112:323-325.
- Bouten, W. Heimovaara, T.J. & Tiktak, A. 1992. Spatial patterns of throughfall and soil water dynamics in a douglas fir Stand: *Water Resour. Res.* 28(12):3227-3233.
- Calheiros de Miranda, R.A. y Buteler, R.D. 1986. Interception rainfall in a hedgerow apple orchard, *J. Hydrol.* 87:245-253.
- Ceballos, L. & Ortuño, F. 1952. El bosque y el agua en Canarias. *Montes* 8(48): 418-423.
- Crockford, R.H. & Richardson D.P. 1983. Some hydrological influences on vegetation. Technical Memorandum 83/18 September 1983. CSIRO Institute of Natural Resources and Environment, division of water resources research. Canberra.
- Crockford, R.H. & Richardson, D.P. 1990a. Partitioning of rainfall in a eucalypt forest an pine plantation in southern Australia: I Throughfall measurement in a eucapypt forest: effect of method and species composition. *Hydrol. Process.* 4:131-144.
- Crockford, R.H. & Richardson, D.P. 1990b. Partitioning of rainfall in a eucalypt forest an pine plantation in southern Australia: IV The relationship of interception and canopy storage capacity, the interception of these forests, and the effect on interception of thinning the pine plantation *Hydrol. Process.* 4:168-188.
- Dewalle, D.R. & Swistock, B.R.. 1994. Differences in Oxygen-18 content of throughfall and rainfall in hardwood and coniferous forest. *Hydrol. Process.* 8:75-82.
- Dunin, F.X., O'Loughlin, E.M. & Reyenga, W. 1988. Interception loss from eucalypt forest: lysimeter determination hourly rates for long term evaluation. *Hydrol. Process.*, 2:315:329.
- Durocher, M.G. 1990. Monitoring spatial variability of forest interception. *Hydrol. Process.* 4:215-229.
- Eschner, A.R. 1967. Interception and soil moisture distribution. In: *Forest Hydrology*, Sopper, W.E. and Lull, H.W. (Editors), Proceedings of the international Symposium, University Park, Pennsylvania, Aug-Sept 1965, Pergamon Press, Oxford /London /Edinburgh /New York /Toronto /Sydney/ Paris /Braunschweig, pp.191-200.
- Feller, M.C. 1981. Water balances in *Eucalyptus regnas*, *E.oblicua* and *Pinus radiata* forests in Victoria.. *Aust. For.* 44: 153-161.
- Ford E.D. & Deans, J.D. , 1978. The effects of canopy structure on stemflow, throughfall and interception loss in a young Sitka spruce plantation. *J. Appl. Ecol.* 15(3): 905-917.
- Gash, J.H.C. 1979. An analytical model of rainfall interception by forest. *Quart. J. R.Met.Soc.* 105:43-55.
- Gash, J.H.C. & Morton, A.J. 1978. An application of the Rutter Model to the estimation of the interception loss from thetford forest. *J. Hydrol.* 38: 49-58.
- Gash, J.H.C. & Stewart, J.B. 1977. The evaporation from Thetford forest during, 1975. *J. Hydrol.* 35:385-396.
- Gosh, R.C. Kaul, O.N. & Subba Rao, B.K. 1978. Some aspects of water relations and nutrition in Eucalypus plantations. *Indian Forester.*

- Gras, J.M. 1993. Investigación sobre las relaciones hídricas en las plantaciones de *Eucalyptus globulus* en Galicia. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Superior de ingenieros de Montes. No publicada. 150 pp.
- Helvey, J.D. & Patric, J.H. 1965. Canopy and litter interception of rainfall by hardwoods of Eastern United States. *Water Resour. Res.* 1:193-206.
- Herwitz, S.R. 1987. Raindrop impact and water flow on the vegetative surfaces of trees and the effects on stemflow and throughfall generation. *Earth Surf. Process. Landforms.* 12:425-432.
- Herwitz, S.R. & Slye, R.E. 1995. Three-dimensional modeling of canopy tree interception of wind-driven rainfall. *J. Hydrol.* 168:205-226.
- Höllermann, P. 1981. Microenvironmental studies in Laurel forest of Canary islands. *Mountain Res. Development.* 1:193-207.
- Hörmann, G. Branding, A. Clemen, T. Herbst, M. Hinrichs, A. & Thamm, F. 1996. Calculation and simulation of wind controlled canopy interception of beech forest in Northern Germany. *Agr. Forest Meteorol.* 79:131-148.
- Ibrahim, M.M. 1979. Recherche sur la dynamique et le bilan de l'eau d'un écosystème a pin pignon (*Pinus pinea* L.) sur sable dunaire Thèse présentée à l'Université des Sciences et Techniques du Languedoc pour obtenir le grade de Docteur d'état (Mention Sciences).
- Ignatova, N. 1995. Changes in crown leaching composition induced by a sudden increase in atmospheric deposition. A case study in South-western Bulgaria. *Plant Soil* 168-169:373-382.
- Jackson, I.J. 1975. Relationships between rainfall parameters and interception by tropical forest. *J. Hydrol.* 24:215-238.
- Jarvis, P.G. 1994. Water deficits. Plant responses from cell to community. In "Environmental Plant Biology" Smith J.A.C. & Griffiths, H. (Eds.) Bios scientific publishers.
- Jetten, V.G. 1996. Interception of tropical rain forest: performance of a canopy water balance model. *Hydrol. Process.* 10:671-685.
- Johnson, R. 1990. The interception, throughfall and stemflow in a forest in highland Scotland and the comparison with other Uplands forest in the U.K. *J. Hydrol.* 118:281-287.
- Kämmer, F. 1974. Klima und vegetation auf Tenerife besonders in Hinblick auf Nebelniederschlag. *Scripta Geobotanica.* Vol. 7 Edit Erich Goltze KG. Göttingen.
- Kelliher, F.M. Whitehead, D. & Pollock, D.S. 1992. Rainfall interception by trees and slash in a young *Pinus radiata* D. Don stand. *J. Hydrol.* 131:187-204.
- Kimmins, J.P. 1973. Some statistical aspects of sampling throughfall in nutrient cycling in British Columbian forest. *Ecology* 54:1008-1019.
- Lima, W.P. 1987. O reflorestamento com Eucalipto e seus impactos ambientais. Sao Paulo. Artpress.
- Lloyd, C.R. & Marques F, A. de O. 1988. Spatial variability of throughfall and stemflow measurements in Amazonian rain forest. *Agr. Forest Meteorol.* 42: 63-73.
- Martínez-Meza, E. And Whitford, W.G. 1996. Stemflow, throughfall and channelization of stemflow by roots in three Chihuahuan desert shrubs. *J. Arid Environ.* 32: 271-287.
- Merriam, R.A. 1973. Fog drip from artificial leaves in a fog wind tunnel. *Water Resour. Res.* 9:1591-1598.
- Neal, C., Robson, A.J., Bharwaj, C.L., Conway, T., Jeffery, H.A., Neal, M., Ryland, G.P., Smith, C.J. & Walls, J. 1993. Relationships between precipitation, stemflow and throughfall for a lowland beech plantation, black Wood; Hampshire, southern England: findings on interception at a forest edge and effect of storm damage" *J. Hydrol.* 146:221-233.
- Niklinska, M. Maryanski, M. Szarek, G. & Laskowski, R. 1995. Chemical Input/output balance for a moderately polluted forest catchment in southern Poland. *Water Air Soil Poll.* 85:1771-1776.
- Reynolds, B & Neal, C. 1991. Trough versus funnel collectors for measuring throughfall volumes. *J. Environ. Qual.* 20:518-521.
- Robson, A.J. Neal, C. Ryland, G.P. & Harrow, M. 1994. Spatial variations in throughfall chemistry at the small plot scale. *J. Hydrol.* 158:107-122.

- Rutter, A.J., Kershaw, K.A., Robins, P.C. & Morton A.J. 1971. A predictive model of rainfall interception in forest, 1. derivation of the model from observation in a plantation of corsican pine. *Agr. Meteorol.* 9:367-374.
- Santana, L. 1986. Estudio de la precipitaciones de niebla. Instituto Nacional para la conservación de la Naturaleza.
- Santana, L. 1990. La importancia hidrológica de las nieblas en las cumbres del Parque Nacional de Garajonay, En P.L. Pérez de Paz (Ed.) Parque Nacional de Garajonay, Patrimonio Mundial, Edit. ICONA. pp. 66-71.
- Schemenauer, R.S. & Cereceda, P. 1992. "Fog as an alternative to rainwater collection", Proc. Regional Conference on Rain Water Catchment Systems Association, Kyoto, Japan, IRCSA, Vol. 2, Nº4-7, Oct 1992, pp.593-601.
- Schemenauer, R.S. & Cereceda, P. 1994. The role of wing in rainwater catchment and fog collection. *Water international*, 19:70-76.
- Shibata, H. & Sakuma, T. 1996. Canopy Modification of precipitation Chemistry in deciduous and coniferous forest Affected by Acidic deposition. *Soil Sci. Plant Nutr.* 42(1):1-10.
- Skeeffington, R.A. & Sutherland P.M. 1995, The effects of SO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub> fumigation on acid deposition and foliar leaching in the Liphook forest fumigation experiment. *Plant Cell Environ.* 18:247-261.
- Tajchman, S.J. Lee, R & Repa, E.W. 1979. Rainfall additiaments to subsurface water in young pine plantation. *Water Resour. Bull.* 15(2):381-386.
- Taniguchi, M. Tsujimura And M. Tanaka, T. 1996. Significance of stemflow in groundwater recharge. 1: Evaluation of the stemflow contribution to recharge using a mass balance approach. *Hydrol. Process*, 10, 71-80.
- Türç, L. 1961. Evaluation des lesoins en eau d'irrigation évapotranspiration potentialle. *Ann. Agrn.* 12:13-49.
- Veneklaas, E. & Van Ek, R. 1991. Rainfall interception in two tropical montane rain forests, Colombia *Hydrol. Process.* in press. Doctoral Dissertation.
- Viville, D. Biron, P. Granier, A. Dambrine, E. & Probst, A. 1993. Interception in a mountainous declining spruce stand in the Strenbach catchment (Voges, France). *J. Hydrol.* 144:273-282.
- Wheeler, H.S. Langan, S.J. Miller, D.J. & Ferrier, R.C. 1987. The determination of hydrological flow paths and associated hydrogeochemistry in forested catchments in central Scotland, *IAHS Plub.* 167:433-449.
- Zinke, P.J. 1967. Forest interception studied in the United States. In: W.E. Sopper and H.W. Lull (editors), *Forest Hydrology*. Pergamon, Oxford, pp. 137-161.

## Capítulo 6. LA EVAPORACIÓN POR LA INTERCEPTACIÓN DE LA CUBIERTA.

### 6.1. INTRODUCCIÓN

La precipitación es en parte interceptada por la vegetación y evaporada sin que esta llegue al suelo. Desde la década de los años sesenta y setenta (Rutter, 1963, 1965, 1967 y 1975; Rutter *et al.* 1971 y 1975; Helvey y Patrick, 1965; Zinke, 1967; Blacke, 1975; Stewart 1978; Gash y Morton 1978; Gash, 1979) se creó un especial interés por la investigación de la evaporación por la interceptación de la lluvia. El motivo del interés es debido a que la interceptación es la principal causa de la diferencia de recogida de caudales en cuencas (Gash y Morton, 1978), dependiendo en gran medida de ella el efecto cuantitativo de los bosques sobre los recursos hídricos (Gash *et al.* 1980), ya que se sabe que las cubiertas vegetales interceptan la mayoría de la lluvia, y controlan su posterior evaporación, y el drenaje desde las mismas (Jetten, 1996); así las tasas de interceptación afectan a la hidrología local en términos de volúmenes y tiempos de escorrentía (Lloyd *et al.*, 1988), siendo de este modo su conocimiento un requisito para la predicción cuantitativa de los efectos de la deforestación (Gash *et al.* 1980). La importancia en escalas regionales y globales de la reducción de la evaporación (deforestación) es patente al afectar a los patrones de precipitación regional y el clima global (Hutjes *et al.*, 1990). Además el agua sobre la cubierta es un importante factor ecológico que condiciona los procesos químicos, físicos y biológicos que ocurren sobre las superficies foliares (Bouten, 1992).

Rutter (1967) encontró que la tasa de evaporación por interceptación de agua en un bosque de pinos era varias veces mayor que la tasa de transpiración para las mismas condiciones, mostrando como causa que la resistencia aerodinámica al transporte del vapor de agua a través de la cubierta era mucho más pequeña en comparación con la resistencia interna a la difusión de vapor en las vías de la transpiración, así y de acuerdo con los resultados de Stewart (1977), en los bosques, las tasas de evaporación por transpiración y por interceptación son muy diferentes, lo que hace importante el determinar individualmente estas tasas de forma independiente, ya que la estima conjunta tiene desventajas Rutter *et al.* (1971). Tras tratar, primeramente, las pérdidas por interceptación como unas regresiones empíricas entre la interceptación y la precipitación con datos de eventos o de días, diferentes modelos de interceptación han sido propuestos y aplicados. Ésta modelización de la interceptación de la lluvia requiere información sobre la tasa de evaporación durante las lluvias, el drenaje desde la cubierta, la evaporación desde en cubiertas mojadas en parte, las resistencias aerodinámicas, el coeficiente de precipitación penetrante libre, la proporción de lluvia interceptada por las ramas y los troncos y la capacidad de almacenamiento de la cubierta a saturación (Rutter *et al.*, 1975 y Gash, 1979), destinando un gran esfuerzo a la determinación de éste último factor ya que según Jackson (1975) y Teklehaimanot y Jarvis (1991) es el más importante de los parámetros en los modelos de interceptación.

La ventaja de los modelos es que están basados en la física con empirismos restringidos, con una infalibilidad mayor y mejor en las situaciones extremas de sequía (Gash y Morton 1978). En cuanto a los principales modelos, Rutter (1971, 1975) desarrolló un modelo para la interceptación basado en los ya mencionados términos de la estructura del bosque y en el clima en el cual éste crece, basándose en una base física aplicable a otras zonas donde existan los datos necesarios. Posteriormente Gash (1979) simplificó el modelo mediante la introducción tras un estudio detallado de menor cantidad de información (diaria en vez de horaria), siendo la razón del éxito de éste modelo analítico la combinación de una baja demanda de datos con una simple pero realista aproximación al proceso de interceptación (Gash *et al.*, 1995). Existen otros modelos con un nivel de complejidad intermedio, los modelos

numéricos de Mulder (1985) y de Whitehead y Kelliher (1991), o con un nivel de complejidad mayor como el modelo de la cascada de Jetten (1996), no obstante la complejidad del modelo parece tener solamente un efecto secundario en los resultados (Lankreijer *et al.*, 1993). Y otros tipos de modelo como el modelo estocástico de Calder (1986). Teniendo un gran valor la prueba de estos modelos en una vegetación tan singular como un bosque de laurisilva macaronésico.

Dado la gran cantidad de experimentos de interceptación, estos parámetros hidrológicos han sido estimados en bosques templados (p.e Leyton *et al.*, 1967; Rutter, *et al.*, 1975; Gash, 1979; Gash *et al.*, 1980; Pearce *et al.*, 1980) y tropicales (Jackson, 1975; Sambasiva Rao, 1987), en vegetación semiárida (Návar y Bryan, 1994), y en particular en los bosques cerrados de coníferas de Reino Unido donde las tasas de interceptación son así bien conocidas (Calder, 1990); sin embargo no ha sido estimado para bosques relícticos terciarios de la laurisilva canaria. Existen lagunas de conocimiento sobre este proceso que hacen dificultosa su aplicación a otros bosques con diferentes especies, con diferente espaciamento entre los individuos y con diferentes patrones de precipitación<sup>20</sup> (Lundberg, 1996). La mayoría de éstas investigaciones de interceptación son estudios que calculan las pérdidas por interceptación como la diferencia entre la precipitación y la precipitación neta obteniéndose información sobre las tasas de evaporación, no obstante se han aplicado una gran cantidad de diferentes técnicas, basadas en métodos micrometeorológicos y diferentes métodos para la determinación de la capacidad de saturación de la cubierta.

Por ello además del cálculo de la evaporación por interceptación para el periodo de mediciones del escurrido cortical y la precipitación penetrante de los capítulos anteriores, se realiza el ajuste de algunos de los modelos existentes con el fin de una vez probados posibilitar su aplicación futura.

Son los objetivos del presente capítulo:

- i. Estimar los parámetros de la interceptación de la lluvia.
- ii. Ajuste del método de Rutter *et al.* (1971) en un bosque de laurisilva.
- iii. Ajuste del método analítico de Gash (1979) en un bosque de laurisilva.

## **6.2. MATERIAL Y MÉTODOS**

### **6.2.1. MÉTODOS.**

Tanto el modelo de Rutter como el de Gash, ambos con base física, tienen empirismos restringidos al máximo posible a los valores de los parámetros cuya significación física es conocida (Lloyd *et al.*, 1988). Dado que los valores apropiados de estos parámetros del modelo pueden ser derivados o estimados, los modelos pueden ser aplicables de forma general.

#### **6.2.1.1. EL MODELO DE RUTTER.**

El modelo se encuentra perfectamente descrito por Rutter *et al.* (1971) con base en una parcela de pino negro, que posteriormente se generalizó con base en el estudio de otras dos

---

<sup>20</sup>Existen estudios para monocultivos forestales, bosques mixtos, bosques de niebla y bosques altamente espaciados, bosques jóvenes y maduros y para diferentes especies. Los experimentos se han desarrollado en varios climas con diferentes patrones de precipitación y diferentes condiciones de humedad, sin encontrar un patrón unificador a todos ellos.

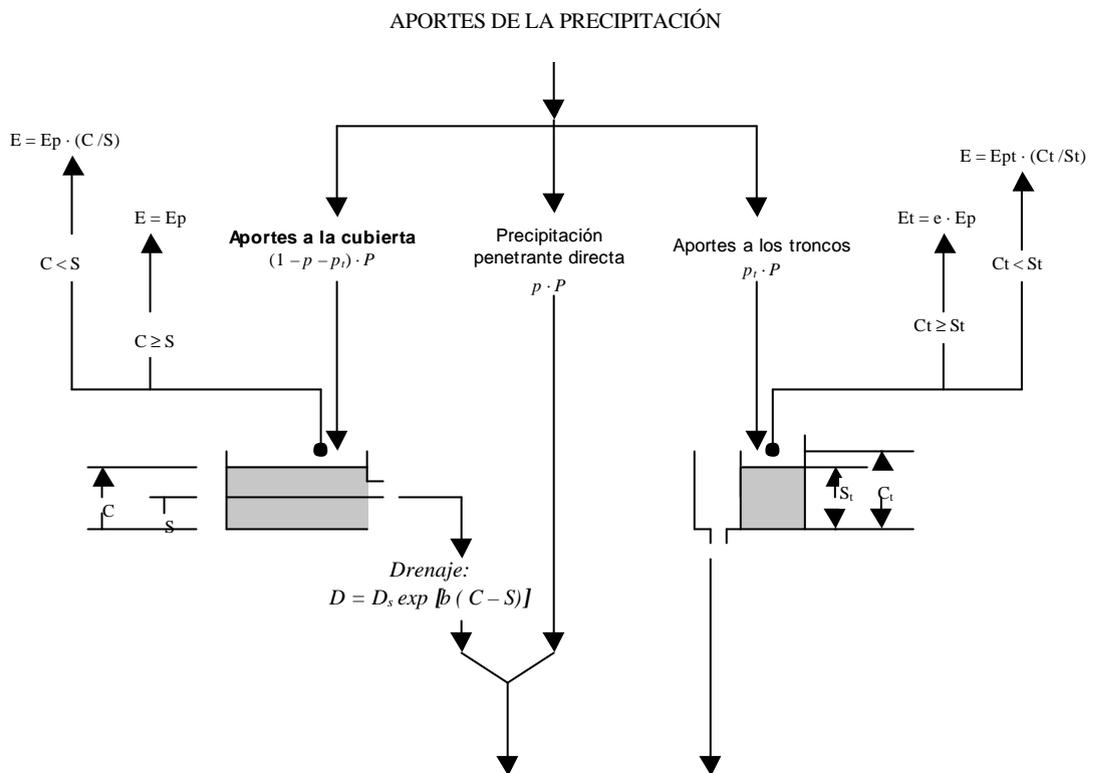
parcelas de coníferas y tres de frondosas y añadiendo el componente de los troncos Rutter *et al.* (1975).. Este método fue aplicado posteriormente entre otros por Gash y Morton (1978) y Bouten (1992) para coníferas, por DeWalle y Paulsell (1969) para bosques de frondosas templados y por Lloyd *et al.* (1988) y Jetten (1996) para bosques tropicales. A continuación se realiza una breve reseña del método

El modelo realiza un balance hídrico de la cubierta y los troncos, en donde las entradas son las cantidades de lluvias cada hora y los parámetros meteorológicos necesarios para estimar la evaporación potencial, teniendo como resultados la precipitación penetrante, el escurrido cortical y la evaporación de agua interceptada. Así el balance de agua vendrá dado por  $P$ ,  $P_p$  y  $E$  siendo respectivamente las tasas de lluvia, precipitación penetrante y evaporación, (todas las cantidades anteriores se expresan como mm de agua) y  $SP$ ,  $SP_p$  y  $SE$  los totales de esos componentes en un tiempo dado (p.e. tasa por tiempo). De este modo la pérdida por interceptación, es decir la lluvia interceptada y evaporada durante el tiempo desde que la lluvia comienza a caer sobre una cubierta seca, y el tiempo hasta que la cubierta está finalmente seca de nuevo, es:

$$I = SE = SP - SP_p$$

La proporción de lluvia que cae hasta el suelo a través de la cubierta directamente sin contactar con superficies (sin ser interceptada) es  $p$ . De este modo el balance de agua de la cubierta para el periodo que transcurre dentro de un chaparrón puede ser escrito del siguiente modo:

$$(1 - p) SP = SD + SE \pm SC$$



Esquema 1. Modelo de Rutter esquematizado por Gash y Morton (1978)

En donde  $SD$  es la cantidad de agua drenando o goteando desde la cubierta ( $D$  sería la tasa), y el  $DC$  es el cambio de la cantidad de agua,  $C$ , almacenada en la cubierta. Así:

$$SPp = pSP + SD$$

Los valores de  $C$  pueden ser mayores o menores a los de la capacidad de almacenamiento de la cubierta,  $S$ . Se asume que existe una tasa de evaporación potencial,  $E_p$  a la que se llega cuando todas las superficies de la cubierta están mojadas, es decir cuando  $C > S$ . Cuando  $C \leq S$  se asume que:

$$E = E_p \cdot C/S$$

Esta asunción se admite totalmente desde que se puede observar que la evaporación de la lluvia comienza desde una cubierta mojada, principalmente en la parte alta de las copas, mientras que en los últimos estadios de la evaporación ésta ocurre desde una cubierta mojada en las partes bajas. Un valor dado de  $C/S$  puede entonces representar la misma cantidad de agua expuesta de diversas maneras a la evaporación. Esta asunción fue validada por Teklehaimanot y Jarvis (1991). Asumiendo que cuando la cantidad de agua de la cubierta se aproxima a cero no habrá drenaje desde ella, y la ecuación anterior se puede reescribir:

$$-\frac{dC}{dt} = E_p \cdot \frac{C}{S}$$

La evaporación potencial  $E_p$ , es calculada a partir de la ecuación de Monteith-Penman (Monteith, 1965), aplicable bajo condiciones de humedad, asunción validada por Teklehaimanot y Jarvis, (1991):

$$E_p = \frac{\Delta R_N + \frac{r_{cp}(de)}{r_a}}{I(\Delta + g)}$$

En donde:

- $R_N^{21}$  -. La energía de la radiación neta ( $W m^{-2}$ ).
- $r_a$  -. Resistencia aerodinámica al transporte de vapor de agua desde la cubierta en un plano de 2 m sobre ella ( $s m^{-1}$ ).
- $de$  -. Déficit de presión de vapor (Pa)<sup>22</sup>.
- $r$  -. Densidad del aire ( $kg m^{-3}$ ).
- $cp$  -. Calor específico del aire seco a presión constante ( $J kg^{-1} ^\circ C^{-1}$ ).
- $I$  -. Calor latente de vaporización del agua ( $J kg^{-1}$ ).
- $g$  -. Constante psicrométrica ( $Pa/^\circ C$ ).
- $\Delta$  -. Pendiente de la curva de saturación de la presión de vapor ( $Pa ^\circ C^{-1}$ ).

<sup>21</sup> La radiación neta se extrajo de las ecuaciones de Penman (1956):

$$R_N = R_i \cdot (I - a) - R_b$$

En donde:

- $R_N$  -. Radiación neta ( $cal/cm^2 seg$ ).
- $a$  -. Coeficiente de reflexión para la radiación solar, 0,16 para el presente bosque (Aschan *et al.*, 1997).
- $R_i$  -. Radiación solar en la superficie de la tierra ( $cal/cm^2 seg$ ).
- $R_b$  -. Radiación emitida de onda larga ( $cal/cm^2 seg$ ).

Para el cálculo de  $R_b$  se empleará la siguiente expresión, obtenida de Rutter *et al.* (1971):

$$R_b = s \cdot T^4 (0,56 - 0,0078 ed^2) (0,10 + 0,90 n/N)$$

- $s$  -. Constante de Stefan-Boltzmann,  $1,36 \cdot 10^{-12} cal/cm^2 s$ .
- $T$  -. Temperatura del aire en grados Kelvin.
- $n$  -. Duración de las horas de sol observadas.
- $N$  -. Duración astronómica del día.

<sup>22</sup>  $de = e_d - e_a(T)$ , en donde:

- $e_a(T)$  -. Presión del vapor del agua a la temperatura del aire (Pa).
- $e_d$  -. Presión del vapor del agua a la temperatura del punto de rocío (tensión de saturación) (Pa).

El modelo igualmente requiere el conocimiento de la estructura de la cubierta descrita por los siguientes parámetros:

- $S$  -. La capacidad de saturación la cubierta, es decir la cantidad de agua que permanece en la cubierta cuando la lluvia y la precipitación penetrante han cesado.
- $p$  -. El coeficiente de precipitación penetrante libre, la proporción de lluvia que cae al suelo sin tocar la cubierta.
- $S_t$  -. La capacidad de almacenamiento de agua de los troncos.
- $pt$  -. El coeficiente de lluvia que se desvía como escurrido cortical.

También se precisan los parámetros de drenaje  $D_s$  y  $b$ , que se utilizan para describir el goteo desde la cubierta del modo:

$$D = D_s \exp[b(C - S)]$$

En donde:

- $D$  -. Tasa de drenaje.
- $C$  -. La cantidad de agua en la cubierta.
- $D_s$  -. La tasa de drenaje cuando  $C = S$ .
- $b$  -. El coeficiente de drenaje

Para la comprensión del modelo se ha recurrido al esquema representado por Gash y Morton (1987) (Esquema. 1). El modelo opera de modo que las pérdidas por interceptación serán la integral de la tasa de evaporación en el tiempo. Mientras  $C < S$ , la tasa de evaporación varía con la cantidad de agua  $C$ , sobre la cubierta y la  $C$  se ha determinado a su turno por el balance entre las tasas de lluvia, drenaje y evaporación. Dados ciertos parámetros de la cubierta, y la variación en el tiempo de la variables meteorológicas que afectan a la evaporación, el modelo se construye mediante el desarrollo en el tiempo del balance entre  $C$ ,  $E$  y  $Pp$ . Los parámetros de la estructura de la cubierta necesarios son  $a$  (el coeficiente de reflexión para la radiación de onda corta, que afecta a  $R_N$ ),  $r_a$ ,  $b$ ,  $p$  y  $S$ . Además y como indicó Rutter *et al.* (1971) éstos parámetros se toman como constantes, a sabiendas que  $S$  y  $p$  varían con la cantidad y disposición del follaje y  $b$  con la inclinación de las hojas y la humectabilidad de sus superficies. Así mismo puede variar los factores aerodinámicos la altura de la rugosidad,  $z_0$  y el desplazamiento del plano 0,  $d$ .

### 6.2.1.2. EL MODELO ANALÍTICO DE GASH.

El modelo analítico de Gash (1979) es una simplificación del modelo de Rutter basado en eventos singulares de lluvia, que se calibra utilizando datos meteorológicos horarios, y posteriormente se desarrolla mediante valores de lluvia diarios (lo que según Pearce y Rowe, 1981; Herbst y Thamm, 1994 genera error), tales como la tasa media de evaporación y lluvia y los patrones de lluvia, así mismo utiliza para la estima parámetros de la estructura de la cubierta. Este modelo ha sido reformulado posteriormente Gash *et al.* (1995). El modelo ya había intentado introducir cambios para situaciones especiales como alta evaporación de los troncos (Gash *et al.*, 1980) o grandes lluvias (Pearce y Rowe, 1981) sin ser utilizadas en estudios posteriores. El modelo ha sido probado satisfactoriamente en coníferas en Reino Unido por Gash *et al.* (1980), en una plantación de robles en Holanda (Dolman, 1987) y en un bosque siempreverde en Nueva Zelanda (Pearce y Rowe, 1981 y Rowe, 1983), en una plantación de bosque tropical (Bruijnzeel y Wiersum, 1987), en un bosque natural amazónico (Lloyd *et al.*, 1988) en el oeste de África (Hutjes *et al.*, 1990), en coníferas en Francia (Loustau *et al.*, 1992), en los desiertos mejicanos (Navar y Bryan, 1994) en coníferas en Francia y en robles en Holanda (Lankreijer *et al.*, 1993) y en hayas en Alemania (Herbst y Thamm, 1994 y Hörmann *et al.*, 1996) y con menos éxito en un bosque abierto (Teklehaimanot *et al.*, 1991), por lo que posteriormente el modelo fue reformulado para éste tipo de cubiertas esparcidas (el cual no es nuestro caso) por Gash *et al.* (1995).

El modelo considera que la lluvia ocurre en una serie de eventos discretos, que cada uno de los cuales comprende un periodo para mojar la cubierta, en el cual la lluvia  $P_G$ , es menor que el valor necesario para mojar la cubierta,  $P'_G$ , un periodo de saturación y un periodo en el que la cubierta se seca tras el cese de la lluvia. La estructura de la cubierta es de nuevo descrita por  $S$ ,  $p$ ,  $S_t$  y  $p_t$ . Igualmente se hace necesario el conocimiento de la tasa de evaporación media mientras llueve  $\bar{E}$  y la tasa media de lluvia,  $\bar{R}$  para las condiciones de la cubierta saturada son también necesarias. Los componentes por separado de la interceptación son calculados de acuerdo con la Tabla. 6-1 obteniendo finalmente una expresión del tipo:

$$\sum_{j=1}^{n+m} I_j = n(1-p-p_t)P'_G + (\bar{E}/\bar{R})\sum_{j=1}^n (P_{Gj} - P'_G) + (1-p-p_t)\sum_{j=1}^m P_{Gj} + qS_t + p_t \sum_{j=1}^{m+n-q} P_{Gj}$$

Donde, las nuevas notaciones son:

$$\sum_{j=1}^{n+m} I_j = \text{Las pérdidas totales por interceptación.}$$

$n$  = Es el número de eventos de lluvia que saturarían la cubierta.

$m$  = Es el número de eventos de lluvia que no saturarían la cubierta.

$q$  = Es el número de eventos de lluvia que saturarían los troncos (la lluvia >  $S_t/p_t$ ).

$\bar{E}$  = La tasa de evaporación media de los eventos tras la saturación de la cubierta ( $\text{mm h}^{-1}$ ).

$\bar{R}$  = La tasa de precipitación media de los eventos tras alcanzarse la saturación de la cubierta ( $\text{mm h}^{-1}$ ).

$P'_G$  = La lluvia necesaria para lograr la saturación de la cubierta (mm).

$$P'_G = -\frac{\bar{R}S}{\bar{E}} \ln \left( 1 - \frac{\bar{E}}{(1-p-p_t)\bar{R}} \right)$$

$P_G$  = La lluvia incidente (mm)

Aunque no es estrictamente necesario, el modelo usualmente se calcula con los totales diarios de lluvia sumiendo un evento por día de lluvia.

Tabla. 6-1 La forma original del modelo analítico de Gash (1979)

Componentes de la pérdida por interceptación	El modelo de Gash (1979)
Para $m$ pequeñas lluvias insuficientes para saturar la cubierta ( $P_G < P'_G$ )	$(1-p-p_t)\sum_{j=1}^m P_{G,j}$
Para $n$ lluvias que saturan la cubierta ( $P_G \geq P'_G$ ).	$n(1-p-p_t)P'_G - nS$
Evaporación antes de que la lluvia cese	$(\bar{E}/\bar{R})\sum_{j=1}^n (P_{G,j} - P'_G)$
Evaporación después de que la lluvia cese	$nS$
Evaporación desde los troncos, para $q$ lluvias que saturan los troncos.	$qS_t$
Evaporación desde los troncos, para $n+m-q$ lluvias, que no saturan los troncos	$p_t \sum_{j=1}^{m+n-q} P_{G,j}$

Como se desprende de la Tabla. 6-1 el modelo asume una estructura quasi-bidimensional para la superficie. La lluvia que se desvía como precipitación penetrante libre por los troncos no está disponible para la cubierta

La filosofía de modelo analítico requiere un simple pero robusto método de cálculo de la tasa de evaporación, para su cálculo Gash (1979) asumió que el valor medio de la evaporación para todas las horas con lluvia mayor a 0,5 mm representa la evaporación desde una cubierta saturada. Para los mismos registros horarios se calcula  $\bar{R}$ . Además Gash (1979) mostró que la pendiente de la regresión entre las pérdidas por interceptación ( $I$ ) frente a la precipitación ( $P_G$ ) es igual a  $\bar{E}/\bar{R}$  y la constante de la regresión es  $(S + \int E dt) \left\{ 1 - \left( \frac{\bar{E}}{\bar{R}} \right) (1 - p)^{-1} \right\}$ ; la regresión asume que el cociente  $\bar{E}/\bar{R}$  es constante durante las lluvias.

## 6.2.2. EL CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DE LA ESTRUCTURA DE LA CUBIERTA.

Como ya se mencionó anteriormente para la aplicación de los modelos se hace indispensable el cálculo de parámetros estructurales de la cubierta como  $S$ ,  $p$ ,  $ra$ ,  $pt$ ,  $St$ ,  $Ds$  y  $b$ .

### 6.2.3.1. LA CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO DE LA CUBIERTA.

La cubierta posee una capacidad de almacenar agua sobre su superficie, que es rellenada por la lluvia y vaciada por la evaporación o el drenaje. Se asume que existe una mínima cantidad de agua,  $S$ , requerida para mojar las superficies de la cubierta, que se corresponde con la capacidad de almacenamiento de Zinke (1967), o al valor de saturación de cubierta de Leyton *et al.* (1967).

La capacidad de la cubierta,  $S$ , puede ser determinada mediante el método de Leyton *et al.*, (1967), mediante el gráfico de la precipitación frente a la precipitación penetrante para eventos individuales o para periodos de 24 horas aproximadamente. Primeramente hay que buscar un punto de inflexión dado por los eventos en los cuales la precipitación es lo suficientemente grande para saturar la cubierta, usualmente se toma como este punto el dado por eventos de 1,5 mm, precedidos por un día no lluvioso, y por encima de este valor se extraen los registros de lluvia que se analizan. Así se asume que la parte superior a la inflexión (la que cubre los puntos del gráfico) representa las dotes de saturación de la cubierta, y que a la izquierda de este punto de inflexión los datos deben de estar representados por  $SPp = p SP$ . Posteriormente se dibuja por encima de todos los puntos extraídos una línea recta de pendiente la unidad (estrictamente de pendiente  $(1 - pt)$  tal y como utilizan Gash y Morton (1978) y Lloyd *et al.* (1988)); de acuerdo con Leyton *et al.*, (1967) se asume que el esparcimiento vertical de los puntos a la derecha de la inflexión son debidos principalmente a variaciones de evaporación de la cubierta, y que la parte superior del gráfico sobre esos puntos representa la relación de la precipitación penetrante con la precipitación en las condiciones de mínima evaporación. Así idealmente esta parte superior puede esperarse que sea una línea con pendiente igual a la unidad:

$$Pp = SP - S$$

Donde la  $S$  se obtiene de la interceptación negativa con el eje de ordenadas (la precipitación penetrante). Otros autores utilizan el método tradicional mediante la realización de regresiones lineales en vez de pasar una línea por los puntos superiores (Crockford y Richardson 1990; Jetten, 1996).

Este proceso es subjetivo en tanto que el punto de inflexión se corresponde con el punto de saturación de la cubierta, y además en el dibujo de ajuste de los puntos superiores del gráfico se tiende a sesgar el resultado (Teklehaimanot y Jarvis, 1991), con énfasis en los puntos de errores aleatorios negativos en  $S$ , que no es constante, y tiene una variación natural, debido a los cambios de la velocidad del viento y el área foliar según Gash y Morton (1978), que da un error para el cálculo de un 10%, producido por errores en la estimación de la precipitación penetrante, pero no es dificultoso de emplear si los puntos son numerosos. Denotar que si no hay errores de medida, las cantidades de precipitación penetrante pueden exceder  $SP - S$  cuando  $SP < S/(1-p)$ . Otro problema se crea para cubiertas con alta variabilidad de precipitación penetrante como el bosque amazónico (Lloyd *et al.*, 1988) no así en nuestro caso. Además la hidrofobicidad de la cubierta es un parámetro variable (Crockford y Richardson 1990) y este hecho puede introducir errores. Rowe (1983) encontró que este método de estima está fuertemente influenciado por la velocidad del viento y la intensidad de la lluvia. Otros factores que intervendrían en la determinación de  $S$  son la temperatura media y el tamaño y *momentum* de las gotas de lluvia (Massman, 1983). Un factor que no influye es el espaciamiento entre árboles ya que se muestra como una propiedad individual de los árboles (Teklehaimanot y Jarvis, 1991)

La validez de este acercamiento quedó corroborada por Rutter *et al.* (1971) al confrontarlo con el acercamiento de Zinke (1967) que definió la capacidad de almacenamiento como "la cantidad de agua en el área proyectada de la cubierta de la planta que puede ser almacenada o detenida por la planta en ausencia de movimiento del aire". Después de que la lluvia haya cesado, y en ausencia de viento, el tiempo en que  $C$  se iguala a  $S$  debe de ser reconocible por el cese del drenaje de la cubierta. En la práctica, las condiciones sin viento rara vez existen, ya que la tasa de drenaje disminuye exponencialmente y el momento en el que el drenaje cesa no puede reconocerse con precisión. De este modo se redefinió arbitrariamente  $S$  como el valor en el que la tasa de drenaje es de 0,002 mm/min. Durante el periodo desde el inicio de la lluvia hasta el instante después de la lluvia en el que el drenaje llega a 0,002 mm min<sup>-1</sup>, se da la siguiente relación:

$$SP - SPp = SE + S.$$

Y a partir de medidas cada cinco minutos de  $P$ ,  $Pp$  y estimaciones de  $S$  para cuatro eventos de lluvia, se obtuvieron valores prácticamente iguales a los obtenidos con el método de Leyton *et al.*, (1967), atribuyéndose las diferencias a la tasa de drenaje arbitraria de 0,002 mm/min.

La capacidad de almacenamiento de la cubierta  $S$ , también ha sido relacionada con el LAI entre otros autores por: Herwitz (1985) y Ashton, (1979). Klaassen *et al.* (1996) que aplicaron varios métodos para determinar  $S$  a partir de la precipitación incidente y de la interceptación, mostrando que los valores de  $S$  varían en un amplio rango dependiendo de la técnica aplicada. No obstante Crockford y Richardson, (1990) mediante el empleo de técnicas de empape dictaminaron que para el bosque de eucaliptos investigado el LAI y la capacidad de retener agua por las hojas tenía poco que ver con la capacidad de almacenamiento de la cubierta, no así el grosor, la fibrosidad y rugosidad de las cortezas de los troncos, y Herwitz (1985) afirma que este fenómeno se encuentra en bosques tropicales no así en templados. Rowe (1983) empleó dos métodos para determinar el valor de  $S$  encontrando variabilidad y

Crockford y Richardson, (1990) también emplearon dos métodos para determinar el valor de  $S$  encontrando variabilidad para un bosque de eucaliptos, pero siendo similares para una plantación de pinos.

Un resumen de los métodos de medida directa de la cantidad de almacenamiento  $C$  y de la capacidad de almacenamiento de la cubierta  $S$  se puede encontrar en Bouten *et al.* (1991). La medida directa de la capacidad de almacenamiento  $S$  puede ser realizada por un método de deflexión "cantilever" (Hancock y Crowther, 1979; Hancock *et al.*, 1983), con simuladores de lluvia y diferencias de pesos de pequeños árboles enteros (Aston, 1979) cortando árboles enteros (Hutchings *et al.*, 1988; Teklehaimanot y Jarvis, 1991; Crockford y Richardson, 1990), por atenuación de los rayos gamma (Calder y Wright, 1986) y por el método de las microondas (Bouten *et al.*, 1991). Lundberg (1996) tras una revisión afirma que los métodos de medición directa generalmente tiene valores mayores que los determinados por métodos gráficos.

Hörmann *et al.* (1996) introducen una  $S$  variable, ya que grandes cantidades de precipitación pueden ser sacudidas desde las cubiertas vegetales por la acción del viento, algo similar a lo concluido por Herwitz (1985), sobre todo en regiones costeras, lo que conlleva que exista una relación entre la capacidad de almacenamiento de la cubierta y la velocidad del viento. Para ello se precisa datos horarios de la velocidad del viento máxima y media, así como de la lluvia y datos semanales de la precipitación penetrante y del escurrido cortical. Posteriormente se trata de ejecutar el cálculo el balance de agua semanalmente, con un valor de  $S$  tal, que la precipitación penetrante calculada y medida se igualen, posteriormente con los valores de  $S$  obtenidos se realiza respecto a la velocidad máxima del viento una relación del tipo  $S = AB^u$  donde  $u$  es la velocidad máxima del viento en  $m s^{-1}$  durante la semana de medición. De esta forma en semanas en las que la velocidad del viento es alta la  $S$  tenderá a = 0. Esta relaciones empíricas son posteriormente utilizadas en el modelo de Gash.

### 6.2.3.2. EL COEFICIENTE DE PRECIPITACIÓN PENETRANTE LIBRE.

El coeficiente de precipitación penetrante libre<sup>23</sup> es la proporción de lluvia que cae directamente a través de la cubierta  $p$  fue determinado por Leyton *et al.* (1967) mediante un método gráfico en donde la precipitación neta se representa frente a la incidente para eventos lo suficientemente pequeños para no saturar la cubierta (los puntos a la izquierda de la inflexión anteriormente nombrada) y que de acuerdo con diferentes autores (Rutter *et al.*, 1975; Gash y Morton 1978; Sambasiva Rao, 1987) se pueden utilizar los valores menores a 1,0 mm de precipitación, de nuevo para semanas precedidas de un día no lluvioso, ya que según Rutter *et al.* (1971) desde el origen de la relación incrementa de forma constante hasta el principio de la saturación.

La  $p$  también se puede estimar a partir del grado de cobertura de la cubierta sobre la parcela mediante el empleo de cámaras como grandes angulares (ojos de pez) o anascopios para determinar el grado de cobertura a partir de la fracción de cubierta-cubierta (p.e. Gash y Morton, 1978; Perttu *et al.* 1980; Lloyd *et al.*, 1988; Lankreijer *et al.* 1993; Jetten, 1996)

Así para la determinación del coeficiente de precipitación libre se utilizaron 40 fotografías a blanco y negro tomadas perpendicularmente a la cubierta desde el lugar donde midió cada pluviómetro, escaneadas con una resolución de 393.216 píxeles (768 x 512) y contrastadas al máximo, y tratadas con software de imagen para contar el número de píxeles claros (cielo abierto) y los píxeles oscuros (cubierta), asumiendo al igual que Jetten (1996) que los píxeles blancos constituyen la fracción de cielo abierto, posteriormente al igual que este autor para calcular la media se realizó una transformación de arcoseno para normalizar la función.

<sup>23</sup> Proveniente del término anglosajón "gap fraction or free throughfall fraction"

### 6.2.3.3.LA RESISTENCIA AERODINÁMICA.

La resistencia aerodinámica se puede calcular mediante dos métodos del *momentum* o del calor.

Para el cálculo de  $r_a$  será empleado el método de cálculo del *momentum*, por medio de correcciones de estabilidad propuesto por Thom (1975):

$$r_a = \frac{1}{g_a}$$

Así:

$$g_a = \frac{k^2 u}{\left\{ \ln \left( \frac{z-d}{z_{0M}} \right) \right\}^2}$$

- $g_a$  -. Conductancia aerodinámica.
- $z$  -. Altura a la cual la temperatura y la velocidad del viento han sido medidas (m).
- $z_{0M}$  -. Altura de rugosidad del momentum; puede ser estimada para cubiertas con hojas, aproximadamente como  $0,13 * h_{veg}^{24}$ .
- $d$  -. Desplazamiento del plano 0 (m); puede ser estimada para cubiertas con hojas, aproximadamente como  $0,7 * h_{veg}$ .
- $u$  -. La velocidad del viento dos metros por encima de la cubierta ( $cm \text{ seg}^{-1}$ ).
- $k$  -. La constante de von Karman,  $\approx 0,41$ .

No obstante existe discrepancia en el cálculo de la altura de la rugosidad del *momentum* en cubiertas donde los perfiles no han sido medidos, así Shuttleworth (1989) dio como media para 15 bosques de coníferas  $0,076 * h_{veg}$  (basado en valores presentados por Jarvis *et al.*,1976); Gash (1979) utilizó  $0,1 * h_{veg}$  para un bosque de deciduas; según Brutsaert (1982) para árboles entre 10 y 15 m varía entre  $0,4 * h_{veg}$  y  $0,7 * h_{veg}$ . El valor de  $0,13 * h_{veg}$  ha sido tomado de Aschan *et al.* (1997) al aplicarlo previamente para este bosque.

Para el cálculo de  $r_a$  será también empleado el método de cálculo del calor:

$$g_a = \frac{k^2 u}{\ln \left( \frac{z-d}{z_{0M}} \right) \ln \left( \frac{z-d}{z_{0H}} \right)}$$

- $z_{0H}$  -.Altura de rugosidad  $H$  del calor; puede ser estimada, dada la incierta relación enunciada por Lankreijer *et al* (1993), como la propuesta por Garratt y Francey (1978)  $z_{0H} = 0,14 \cdot z_{0M}$ .

El uso para el cálculo de  $r_a$  del momentum en el modelo de Gash genera una sobreestimación de la interceptación de acuerdo con Hendricks *et al.* (1990) y Lankreijer *et al.* (1993) concluyen con la recomendación del segundo de los métodos de cálculo.

<sup>24</sup> En nuestro caso  $h_{veg} = 15 \text{ m}$ .

#### 6.2.3.4. LOS PARÁMETROS DEL ESCURRIDO CORTICAL.

Cuando existe una cantidad de agua que se desvía de la cubierta a los troncos transformándose en escurrido cortical, se espera que las tasas de evaporación disminuyan. Así homológamente a  $p$  que era la cantidad de precipitación libre,  $pt$  será la proporción de agua desviada por los troncos, siendo así los aportes a la cubierta  $(1-p-pt)P$  y el cálculo del balance de agua se ajustará de modo acorde a este cálculo.

Para el cálculo se representa gráficamente la relación para eventos individuales o días de lluvia, precedidos de un día no lluviosos, frente al escurrido cortical, siendo la pendiente de la regresión lineal obtenida entre estas dos variables el valor de  $pt$  y la constante el valor de  $St$ , de acuerdo con Rutter *et al.* (1975)

La expresión utilizada para el cálculo de las variables de la cubierta del escurrido cortical  $pt$  y  $St$ , desestima pérdidas por evaporación, pero considerando las diferencias esperadas del grosor de la capa límite, la ventilación y las áreas expuestas de los troncos y las hojas sugiere que la tasa de evaporación potencial desde los troncos por unidad de superficie de suelo ( $E_{pt}$ ) debe de ser inferior al 10% de la tasa potencial ( $E_p$ ) desde la cubierta. La principal evaporación desde los troncos debe de ser entonces una pequeña evaporación del agua almacenada en los troncos durante las horas o días tras la lluvia. Se asume así que  $E_{pt}$  y  $E_p$  se hallan relacionadas por un factor constante  $e$ , del modo:

$$E_{pt} = e \cdot E_p$$

Y así, en el modelo de Rutter, de modo análogo a las asunciones realizadas para el balance hídrico de la cubierta, la tasa de evaporación de los troncos ( $E_t$ ) está reducida de su tasa potencial cuando no está saturada del modo:

$$E_t = E_{pt} \cdot \frac{C_t}{S_t}$$

Donde  $C_t$  es el contenido de agua superficial (mm/superficie de suelo) de los troncos. También se asume que el drenaje de agua que excede  $S_t$  es inmediato, ya que no hay ninguna ventaja en introducir un factor de retraso, a menos que se requieran estimas en tiempos cortos.

Así dadas las estimas de  $pt$ ,  $St$  y de  $e$ , se puede hacer ejecutar el cálculo del balance de agua interceptada por los troncos, prediciendo el escurrido cortical y la evaporación. Así es necesario encontrar valores de  $e$  que den consonancia a los valores calculados y encontrados de escurrido cortical tal y como realizaron Rutter *et al.* (1975). Aunque la tasa de evaporación desde el tronco tal y como reseñó Rutter *et al.* (1975) se barajan entre un 0,01 a un 0,005, la retención de agua por los troncos y su posterior evaporación es alta oscilando entre un 2-4.%.

#### 6.2.3.5. LA TASA DE DRENAJE.

De acuerdo con el procedimiento de Rutter *et al.* (1975), y tal y como concluyeron Gash y Morton (1978) para los valores empíricos de  $D_s$  y de  $b$  pueden ser tomados los de Rutter *et al.* (1971)<sup>25</sup>, de modo razonable físicamente tanto en los principios como en la práctica, para estimar la tasa de drenaje. No obstante conviene efectuar la corrección propuesta por Rutter *et*

<sup>25</sup> A partir de medidas cada cinco minutos de  $P$ ,  $Pp$  y estimaciones de  $S$  para cuatro eventos de lluvia, obteniéndose un valor medio para  $b$  de 3,7 y por definición, cuando  $C = S$ ;  $D = 0,002$  mm/min (tasa de drenaje arbitraria).

al. (1975) donde para otras cubiertas con diferente área foliar ( $L$ ) por unidad de suelo, se recomienda emplear el cálculo:

$$0,002 \cdot L / L_c$$

En donde:

$L_c$  -El índice de área foliar de la cubierta de pino negro estudiada por Rutter et al (1971).

Y asumiendo que  $S$  está linealmente correlacionada con  $L$ , para otras cubiertas se puede multiplicar 0,002 por ( $S/1,05$ ) donde 1,05 es el valor de  $S$  para la parcela de pino negro donde se realizó el modelo, siendo el modelo moderadamente sensible a esta corrección. La misma derivación se puede realizar para la  $b$  (Lloyd et al., 1988 y Jetten, 1996).

Sin embargo para ser consecuente con el método para la estima de  $S$  realizado en el presente trabajo la tasa de drenaje se fija en cero cuando  $C < S$  (Gash y Morton, 1978, Lloyd et al., 1898). Evitando el absurdo matemático reseñado por Calder (1977), de una pequeña pero finita tasa de drenaje cuando  $C = S$ .

### 6.2.3. MATERIAL E INSTRUMENTACIÓN.

La instrumentación utilizada ya fue descrita en capítulos anteriores previamente. Las pérdidas por interceptación fueron determinadas como la diferencia medida entre la precipitación y la precipitación penetrante más el escurrido cortical.

Los registros meteorológicos fueron almacenados cada 30 minutos para posteriormente promediarse en registros horarios de acuerdo con Rutter (1971, 1975), Gash y Morton (1978), Loyd et al. (1988).

En nuestro caso los pluviómetros de precipitación penetrante no recogían los datos de manera diaria por lo que para realizar los análisis posteriores en los que se precisan datos diarios, se recurrió a examinar los registros de precipitación escogiendo primeramente las semanas en las que sólo había llovido un evento de acuerdo con Jetten (1996) y Hörmann et al. (1996), para posteriormente con el resto de las semanas en las

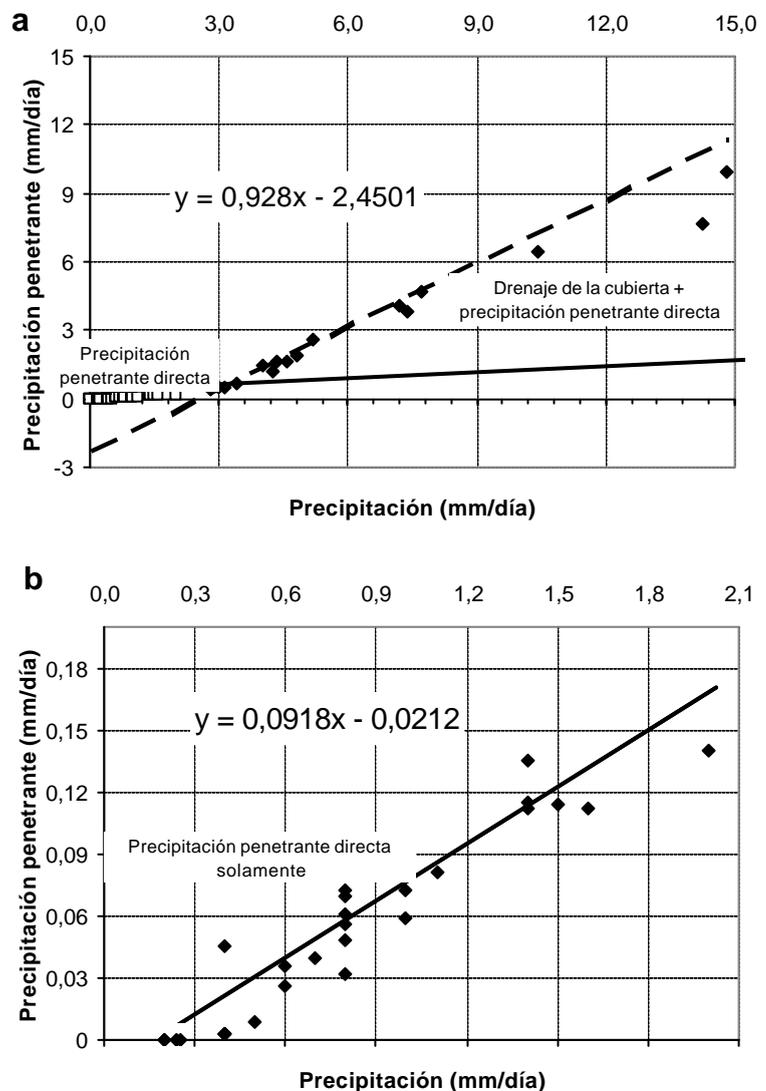


Fig. 6-1 **a** La relación entre la precipitación y la precipitación penetrante para los días con más de 2 mm de precipitación. **b** La relación entre la precipitación y la precipitación penetrante para los días con menos de 2 mm de precipitación

que existió lluvia de forma más o menos continuas, al igual que Jetten (1996), se tomaron las medias diarias de las precipitaciones recogidas respecto al número de días de lluvia, corrigiendo al igual que el citado autor el tamaño del periodo de medida para el cual se calcula el valor medio por el tiempo en que toda el agua de la cubierta es evaporada antes del inicio de la siguiente lluvia.

En nuestro caso, para comparar los resultados, del mismo modo al empleado por Jetten (1996), se integraron los resultados de interceptación calculada a los periodos de medidas de la precipitación penetrante, realizando lo mismo con los resultados de los modelos de Rutter y de Gash.

## 6.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.3.1. LOS PARÁMETROS DE LA CUBIERTA.

#### 6.3.1.1. LA CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO DE LA CUBIERTA

A partir de 2 mm de lluvia (punto de inflexión) los valores de precipitación penetrante para un valor dado de precipitación se esparcen considerablemente para los 18 datos evaluables. (Figura. 6-1). Así fue determinada  $S$  con una pendiente de 0,9279, de acuerdo con el valor de  $p_t$ , obtenido de la Figura 6-1 a, alcanzándose un valor de 2,45 mm. En la Figura 6-1 a se observa la diferente tendencia de los puntos por de bajo y encima del valor de inflexión al prolongar la tendencia de los valores menores a 2 mm hacia valores mayores de precipitación.

Este resultado está en el rango de los valores revisados en la Tabla. 6-2. La determinación del valor de  $S$  no podría ser extrapolado a otros bosques únicamente en consideración de las especies, sino que hay que contar igualmente con la densidad de pies, ya que de acuerdo con Gash *et al.* (1980) y Teklehaimanot *et al.* (1991) está determinado por el espaciamiento entre los árboles. Las formaciones vegetales más parecidas son los valores para frondosas bien en bosques de hayas o en los bosques tropicales australianos, no obstante es un valor alto

#### 6.3.1.2. EL COEFICIENTE DE PRECIPITACIÓN PENETRANTE LIBRE

Para los datos de los días con menos de 2 mm de precipitación se realizó la regresión para los 28 datos evaluables; obteniendo la siguiente ecuación:

$$Pp = 0,0918 (\pm 0.0065) \cdot P - 0,0212 (\pm 0.0052) \quad r^2=0,92$$

Con un coeficiente de correlación de, lo que implica un valor de  $p = 0,0918$ .

Mediante el procesamiento de las fotografías tomadas se obtuvo un valor medio como porcentaje de 7,15%, con un error típico de  $\pm 0,46\%$  con un valor máximo de 20,22% y mínimo de 2,52%, hallando de este modo un valor para la  $p$  de 0,0715, obteniendo de este modo valores similares mediante los dos métodos, tal y como le aconteció a Gash y Morton (1978) mediante la utilización de anascopios, con 0,34 y 0,26 y diferenciándose el resultado del obtenido por Jetten (1996) quien obtuvo por el método de la regresión un valor de 0,7 (Tabla 6-3) y por el método fotográfico un valor de 0,08 apuntando que las diferencias se pueden deber a tasas de precipitación penetrante demasiado altas.

Tabla 6-2 Valores de S y de interceptación como porcentaje para diferentes formaciones boscosas. Dependiendo de: (1) método de estima (2) intensidad de la lluvia (3) espacio entre los árboles(4) Método de empape (5) continuidad de la lluvia y del viento (6) densidad (7) Lluvia (8) edad de los árboles.

Autor	Especie	Pais	S mm	Interceptación %
Stålfeldt (1961)	<i>Picea excelsa</i>	Suecia		48%
Rutter et al., (1971)	<i>Pinus nigra</i>	R.U.	1,05	35%
Rutter et al. (1975)	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	R.U.	1,2	39%
Rutter et al. (1975)	<i>Picea abies</i>	R.U.	1,5	48%
Bringfelt & Hårsmar (1976)	Mixto de <i>Pinus</i> y <i>Picea</i>	Suecia	2	26%
Calder (1976)	<i>Picea abies</i>	R.U.		27%
Gash y Stewart (1977)	<i>Pinus sylvestris</i>	R.U.		31%
Gash y Morton (1978)	<i>Pinus sylvestris</i>	R.U.	0,8+-10	29%
Ford y Deans (1978)	<i>Picea abies</i>	R.U.		30%
Gash et al. (1980)	<i>Picea sitchensis</i>	R.U.	1,2	27%
Gash et al. (1980)	<i>Pinus sylvestris</i>	R.U.	1,02	42%
Gash et al. (1980)	<i>Picea sitchensis</i>	R.U.	0,75	32%
Perttu et al. (1980)	<i>Pinus pinaster</i>	Suecia	0,3	20%
Anderson & Pyatt (1986)	<i>Picea sitchensis</i>	R.U.		29-49% (6)
Anderson & Pyatt (1986)	<i>Lodgpole pine</i>	R.U.		29%
Saxena (1986)	<i>Pinus sp.</i>	Suecia	2,1	>40%
Stogsdill (1989)	<i>Pinus tadea lobolly</i>	EE.UU.		18%
Crockford y Richardson (1990)	<i>Pinus radiata</i>	Australia	2	18,30%
Jhonson (1990)	<i>Picea sitchensis</i>	R.U.		28%
Pooke et al. (1991)	<i>Pinus radiata</i>	Australia	1,2	27%
Pröbstle y Kreutzer (1991)	<i>Picea abies</i>	Alemania		35-46% (8)
Teklehaimanot et al. (1991)	<i>Picea sitchensis</i>	R.U.		9-33%(3)
Kelliher et al. (1992)	<i>Pinus radiata</i>	Nueva Zelanda	0,4	19-30%
Loustau et al. (1992)	<i>Pinus sp.</i>	Francia	0,58-0,66	13-21% (2)
Lankreijer et al. (1993)	<i>P. pinaster</i>	Francia	0,26	
Viville et al. (1993)	<i>Picea abies</i>	Francia		34%
Gash et al., (1995)	<i>Pinus pinaster</i>	Francia	0,25	73%
Bouten et al. (1996)	<i>Douglas fir</i>	Holanda		43%
Rutter et al. (1975)	<i>Carpinus betula (con hoja)</i>	R.U.	1	36%
	<i>Carpinus betula (sin hoja)</i>	R.U.	0,65	
Rutter et al. (1975)	<i>Quercus robur (con hoja)</i>	R.U.	0,875	18%
	<i>Quercus robur (sin hoja)</i>	R.U.	0,275	
Rutter et al. (1975)	<i>Quercus robur (defoliado)</i>	R.U.	0,175	12%
Schöeder (1984,1985)	<i>Q. robur F. sylvatica (con hojas)</i>	Alemania	0,6	12%
Kändler (1986)	<i>Fagus sylvatica (con hoja)</i>	Alemania	1,2	
	<i>Fagus sylvatica (sin hoja)</i>	Alemania	0,5	
Dolman (1987)	<i>Quercus robur (con hoja)</i>		0,8	
	<i>Quercus robur (sin hoja)</i>		0,3	
Elling et al. (1990)	<i>Fagus sylvatica</i>	Alemania	2,6	
Lankreijer et al. (1993)	<i>Quercus rubra</i>	Holanda	0,7	
Lankreijer et al. (1993)	<i>Quercus rubra</i>	Holanda	0,5	
Hörmann et al. (1996)	<i>Fagus sylvatica (con hoja)</i>	Alemania	1,28 (1-2) (7)	11%
	<i>Fagus sylvatica (sin hoja)</i>	Alemania	0,84 (0,8-1,7) (7)	
Jackson (1975)	Bosque tropical	Tanzania	0,89	
Herwitz (1985)	Bosque tropical	Australia	2,2-8,3	
Vis(1986)	Bosque tropical	Colombia		11-25%
Brujinzeel y Van Wiersum (1987)	Bosque tropical	Java	0,5-0,6	
Sambasiva Rao (1987)	Cashew Trees	India	0,8	
Lloyd et al. (1988)	Bosque tropical	Brasil	0,74	10%
Fritch (1990)	Bosque tropical	Guyana	1,05	
Waterllo (1994)	Bosque tropical	Fidji	0,3-1,4	
Navar & Bryan (1994)	Vegetación semiárida	Mexico	0,87 (0,39-1,59)	28%
Pearce y Rowe (1981)	Bosque <i>Nothofagus</i>	Nueva Zelanda	1	
Rowe (1983)	Bosque <i>Nothofagus</i>	Nueva Zelanda	0,6-2 (1)	29%
Brookes y Turner (1964) (a)	Bosque <i>Eucalyptus regnans</i>	Australia		24%
Smith (1974) (a)	Bosque de Eucaliptos	Australia		10,6%
Lima (1976) (a)	Plant. <i>Eucalyptus saligna</i>	Brasil		12,2%
Duncan et al. (1978) (a)	Bosque <i>Eucalyptus regnans</i>	Australia		23,2%
Duncan et al. (1978) (a)	Bosque <i>Eucalyptus regnans</i>	Australia		18,7%
Duncan et al. (1978) (a)	Bosque de Eucaliptos	Australia		23,3%
Westman (1978) (a)	Bosque <i>Eucalyptus signata</i>	Australia		22%
Westman (1978) (a)	Bosque <i>Eucalyptus umbra</i>	Australia		22%
Gosh et al. (1978)	Plant. <i>Eucalyptus tereticornis</i>	India		11,5%
Feller (1981)	Bosque <i>Eucalyptus regnans</i>	Australia		18,5%
Feller (1981)	Bosque <i>Eucalyptus obliqua</i>	Australia		15%
Crockford y Richardson (1990)	Bosque de <i>Eucalyptus</i>	Australia	0,39 (4)/1,7	11,4%
Gras (1993)	Plant. <i>Eucalyptus globulus</i>	España		14,3%
Jetten (1996)	Bosque siempreverde seco	Guyana	0,89	16%
Jetten (1996)	Bosque mixto	Guyana	0,89	17%
Este trabajo	Laurisilva	España	2,45	

### 6.3.1.3. LA RESISTENCIA AERODINÁMICA

Ya que la resistencia aerodinámica está en función del viento, siendo el resto de los parámetros constantes para una cubierta, se puede calcular de acuerdo con Robins (1969) un valor para la  $f$  ( $f = r_a \cdot u$ ). Así se obtuvo de este modo mediante el método del *momentum* un valor para la  $f$  de 14,92, que se halla en el rango de los calculados por Rutter *et al.* (1971) de 9,8 y Lloyd *et al.* (1988) con un valor de 29,2/34,2. Mediante el método del calor se obtuvo un valor de la  $f$  de 33,44.

Tabla. 6-3 Valores de  $p$ ,  $pt$ ,  $St$ ,  $e$  y porcentajes del escurrido cortical sobre la precipitación para diferentes bosques del mundo. Con respecto a los valores de  $p$ , \* se cálculo mediante un método óptico (anoscopio o fotografía) y el resto mediante un método lineal.

Autor	Especie	Lugar	$p$	$St$	$pt$	$e$	% Sf/P
Leyton <i>et al.</i> (1967)	<i>Picea abies</i>	R.U.	0,25				
Rutter <i>et al.</i> , (1971)	<i>Pinus nigra</i>	R.U.	0,25				
Robins (1969,1974)	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	R.U.	0,09	0,9	0,15	0,04	7,7
Gash y Morton (1978) Gash (1979)	<i>Pinus sylvestris</i>	R.U.	0,26*/0,32	0,014	0,016		<2
Gash <i>et al.</i> (1980)	<i>Picea sitchensis</i>	R.U.	0	0,74	0,29		
Gash <i>et al.</i> (1980)	<i>Pinus sylvestris</i>	R.U.	0,13*	0,033	0,037		
Gash <i>et al.</i> (1980)	<i>Picea sitchensis</i>	R.U.	0	0,25	0,1		
Lankreijer <i>et al.</i> (1993)	<i>P. pinaster</i>	Francia	0,55*/0,43				
Gash <i>et al.</i> , (1995)	<i>Pinus pinaster</i>	Francia	0,55*	0,17	0,0275		1
Leyton <i>et al.</i> (1967)	<i>Carpinus betula (con hoja)</i>	R.U.	0,35				
	<i>Carpinus betula (sin hoja)</i>	R.U.	0,55				
Thompson (1972)	<i>Quercus robur (con hoja)</i>	R.U.	0,45	0,125	0,04	0,01	3
	<i>Quercus robur (sin hoja)</i>	R.U.	0,8	0,125	0,06	0,03	3
Thompson (1972)	<i>Quercus robur (defoliado)</i>	R.U.	0,85	0,125	0,06	0,03	4
Lankreijer <i>et al.</i> (1993)	<i>Quercus rubra</i>	Holanda	0,31				
Hörmann <i>et al.</i> (1996)	<i>Fagus sylvatica (con hoja)</i>	Alemania	0,05	0,28	0,06		
	<i>Fagus sylvatica (sin hoja)</i>	Alemania	0,8	0,09	0,08		
Jackson (1975)	<i>Bosque tropical</i>	Tanzania	0,25				
Sambasiva Rao (1987)	<i>Casheww Trees</i>	India	0,39	0,043-	0,048-		
				0,024	0,008		
Lloyd <i>et al.</i> (1988)	<i>Bosque tropical amazónico</i>	Brasil	0,08	0,15	0,006		1,8
Navar & Bryan (1994)	<i>Vegetación semiárida</i>	Méjico	0,25				
Jetten (1996)	<i>Bosque siempreverde seco</i>	Guyana	0,08*/0,7				
Jetten (1996)	<i>Bosque mixto</i>	Guyana	0,08*/0,8				
Este trabajo	<i>Laurisilva</i>	España	0,07*/0,09	0,08	0,07	0,09	6,9

### 6.3.1.4. LOS PARÁMETROS DEL ESCURRIDO CORTICAL

Como ya se comprobó en el capítulo 3.1. el escurrido cortical tiene una importancia evidente en la laurisilva de Agua García, se describe a continuación el comportamiento del escurrido cortical a lo largo del año de estudio para los eventos anteceditos por un día no lluvioso, con la ecuación resultante:

$$\text{Esgurrido cortical} = 0,0719 (\pm 0,0076) \cdot P - 0,080 (\pm 0,0033) \quad n=46; \quad r^2 = 0,76.$$

De forma que el valor de  $pt$  es de 0,07 y el de  $St$  es de 0,08., encontrándose ambos valores en el rango de las diferentes vegetaciones como se puede observar en la Tabla 6-3; con un valor de  $pt$  muy similar al de las frondosas, y con un valor de  $St$  comparable al de bosques como el de hayas o el tropical amazónico. El mejor valor de  $e$  probado fue de 0,09, mayores a los valores encontrados en la bibliografía de acuerdo con la Tabla. 6-3.

### 6.3.1.5. LA TASA DE DRENAJE

Se obtuvieron los valores de  $D_s$  de 0,00467 y de  $b$  de 1,58571.

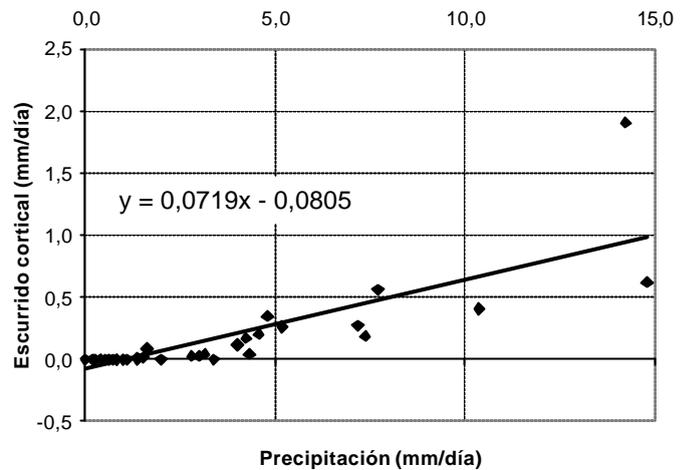


Fig.6-2 La relación entre las cantidades (mm) de precipitación y del escurrido cortical diario.

### 6.3.2. LOS PARÁMETROS CLIMATOLÓGICOS.

El parámetro climatológicos  $\bar{E}$  tuvo diferentes valores dependiendo del método de calculo empleado para la determinación de  $r_a$ , así para el *momentum* el valor fue de 0,042 mm  $h^{-1}$ , mientras que para el calor fue de 0,028 mm  $h^{-1}$ . Así mismo el parámetro climatológico  $\bar{R}$ , tuvo un valor para los mismos datos de 1,64 mm  $h^{-1}$ . Estos datos al ser comparados con los de la bibliografía Tabla 6-5, nos da para la  $\bar{E}$  un valor extremadamente bajo, de nuevo sólo comparable a los bosques de hayas en Alemania, el bajo valor puede ser debido a que en esta zona de Tenerife las lluvias se suelen producir auspiciadas por el Alisio que proviene del mar cargado de humedad, en el caso nombrado como comparable de Hörmann *et al.* (1996) también este bosque se hallaba en la cercanía de la costa sometido al influjo marino. El valor de  $\bar{R}$  fue sin embargo a diferencia del anterior perfectamente normal y dentro del rango de los valores encontrados. La pendiente de la regresión entre las pérdidas por interceptación y la precipitación fue de 0,274, obteniéndose así este valor para el cociente  $\bar{E}/\bar{R}$ .

Los valores  $P'_G$  fueron diferentes según el método aplicado, para el cálculo de la evaporación, con la  $r_a$  del *momentum* tuvo el valor de de 2,89 mm, para la  $r_a$  del calor 2,88 mm y para la calculada en base al modo lineal mediante el cociente de  $\bar{E}/\bar{R}$  tuvo un valor de 3,43 mm.

### 6.3.3. LA EVAPORACIÓN POR INTERCEPTACIÓN.

Los modelos fueron aplicados durante los meses de diciembre de 1994 a noviembre de 1995, (El modelo de Gash se pudo aplicar hasta diciembre de 1995, pero a efectos de comparar con el de Rutter sólo se presentan los datos del periodo mencionado) representándose los resultados de la evaporación por interceptación calculada y los resultados medidos con sus errores (Figura. 6-3), las pérdidas por interceptación medidas fueron 138,8 mm, o un 42,8% de la precipitación; mientras que las estimadas fueron: para el método de Rutter con el cálculo de  $r_a$  del *momentum* 125,6 mm o un 38,7% de la precipitación, para el

método de Rutter con el cálculo de la  $r_a$  del calor 119,81 mm o un 36,9% de la precipitación; para el método de Gash con cálculo de la  $r_a$  del *momentum* 142,6 mm o un 43,9% de la precipitación; para el método de Gash con cálculo de la  $r_a$  del calor 141,6 mm o un 43,6% de la precipitación; y por último para el método de Gash con cálculo para el cociente  $\bar{E}/\bar{R}$  mediante métodos lineales fue 189,5 mm o un 58,4% de la precipitación. Tal y como se observa en la Figura 6-3 donde se representan los errores como una banda cuyo valor central es la medida, las predicciones de todos los modelos excepto el del método de Gash con cálculo para el cociente  $\bar{E}/\bar{R}$  mediante métodos lineales, están dentro de este intervalo de error. Este resultado no sigue lo esperado de acuerdo con el uso del valor de la pendiente  $\bar{E}/\bar{R}$  que se ha constatado como más exacto para algunos bosques, como en el caso de *P.pinaster* en Francia (Lankreijer et al, 1993). Los valores también han sido representados en periodos de cuatro semanas en un histograma, donde el error de la interceptación medida se representa mediante las barras de error (Figura 6-4)

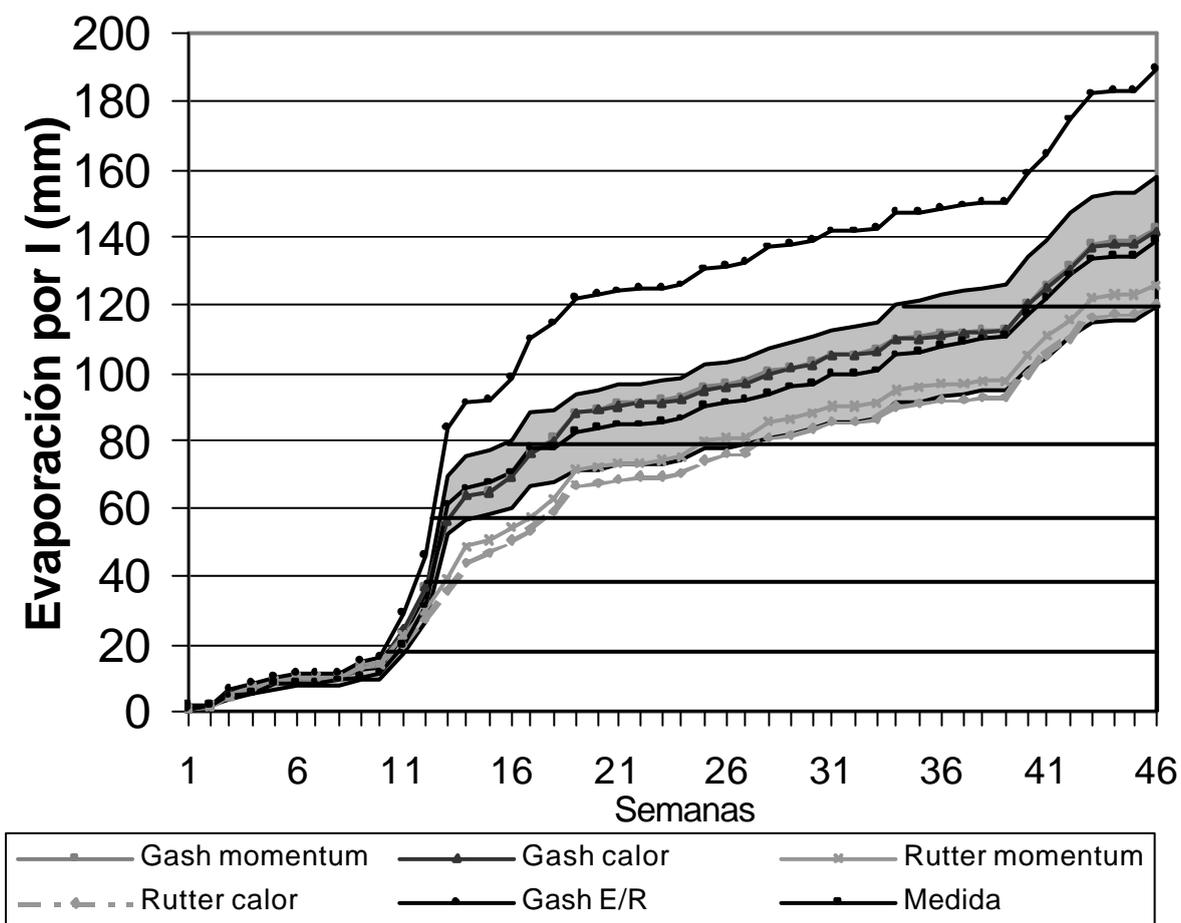


Fig. 6-3. Evaporación por interceptación acumulada frente al tiempo, estimada por cada método y medida. La franja representa el intervalo de error de la evaporación por interceptación medida

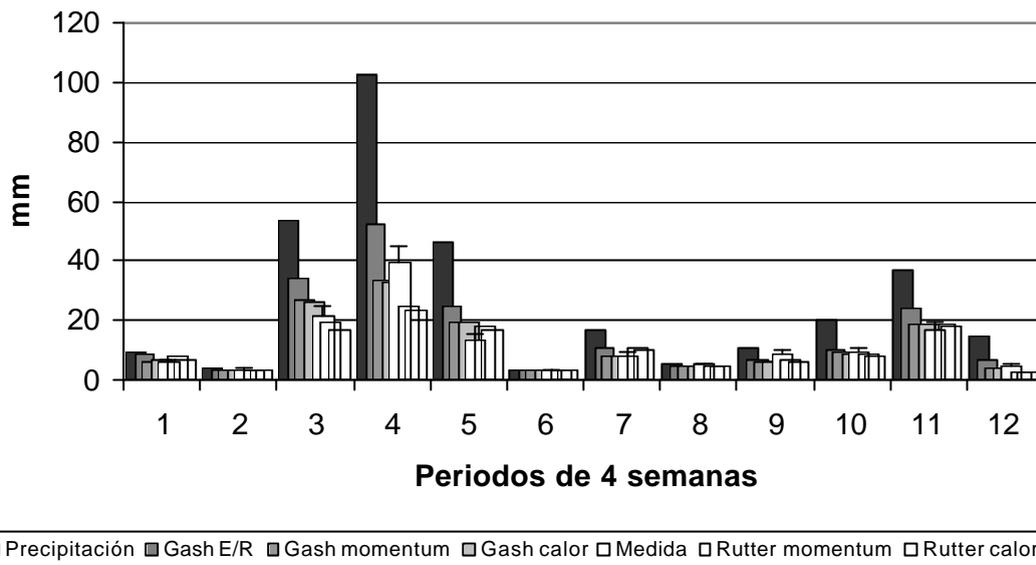


Fig. 6-4 histograma de valores de precipitación, interceptación calculada e interceptación medida.

La regresión lineal (Figura. 6-5) entre las pérdidas medidas y las estimadas tiene una pendiente que difiere mínimamente de la unidad (1,12 Rutter y 1,09 Gash), debido principalmente a los valores altos de precipitación en los que los valores de las predicciones son menores que los medidos, y una interceptación con los ejes que no difiere significativamente de cero al igual que los datos obtenidos por Rutter *et al.* (1975) y Gash y Morton (1978). Los coeficientes de correlación fueron 0,76 para el modelo de Rutter (*momentum*) y 0,92 para el modelo e Gash (*momentum*); estos valores son parecidos a los obtenidos por Rutter *et al.* (1975) entre 0,88 a 0,93 No hubo diferencias significativas entre los valores medidos y los estimados de la pérdida por interceptación.

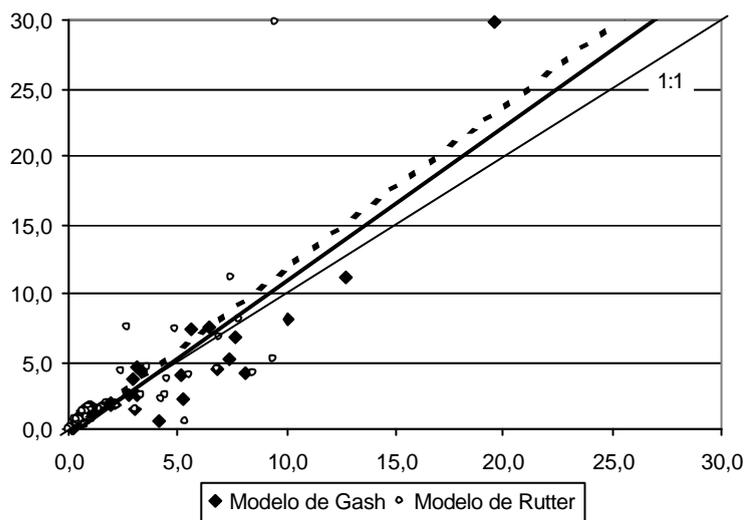


Fig. 6-5 Regresiones lineales de la interceptación medida (mm) frente a la calculada (mm) para cada semana.

Para comparar el grado de ajuste de los diferentes métodos podemos representar la interceptación medida frente a la acumulada, de forma que cuanto más se acerquen a la línea de 1:1 el método aplicado se ajustará más a los valores medidos. De este modo vemos que existe un buen ajuste para el método de Gash, tanto para el cálculo de la  $r_a$  de calor como de *momentum* Figura 6-5 a y b. El ajuste sigue siendo adecuado para el método de Rutter, tanto para el cálculo de la  $r_a$  de calor como de *momentum* Figura 6-6 a y b. No obstante podemos comprobar como con el método de Gash y la obtención del cociente  $\bar{E}/\bar{R}$  mediante métodos lineales el modelo sobrestima desde el principio, sin embargo este es el método que más se

ajusta a la semana de mayor precipitación donde el resto de los métodos tienden a infraestimar, particularmente el método de Rutter el que mas infraestima, de acuerdo con lo visto en las regresiones lineales anteriores; de todas formas el resultado obtenido finalmente está muy por encima del medido Figura 6-6 c.

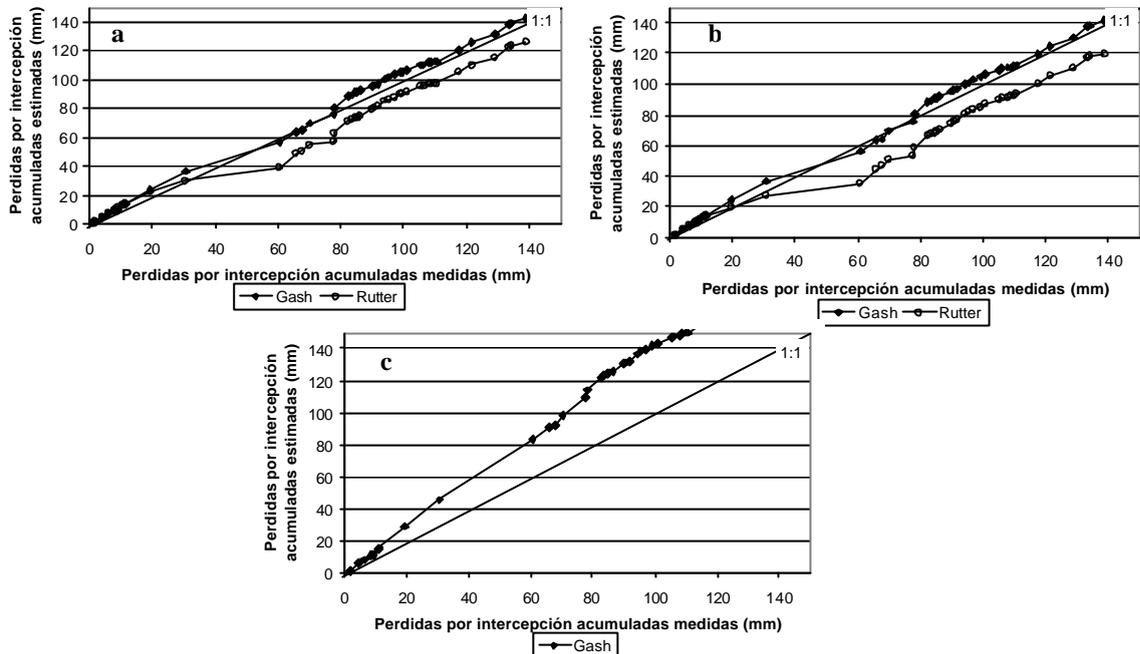


Fig. 6-6 interceptación medida acumulada frente a la estimada acumulada. a Modelos de Gash y Rutter con el cálculo de la  $r_a$  del momentum. b Modelos de Gash y Rutter con el cálculo de la  $r_a$  del calor. c Modelo de Gash la obtención del cociente  $\bar{E}/\bar{R}$  mediante métodos lineales

Tabla 6-4 Valores y resultados de la aplicación del método de Rutter con  $r_a$  del *momentum* para diferentes vegetaciones encontradas en la bibliografía, divididas en coníferas, frondosas templadas y bosques tropicales y subtropicales.

	Especie		P mm/mes	lmedida mm/mes	lcalculada mm/mes	Calc/obs.%
Rutter et al., (1971)	<i>Pinus nigra</i>	R.U.	65,3	23,05	21,05	91%
Rutter et al. (1975)	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	R.U.	65,3	25,5	26,8	105%
Rutter et al. (1975)	<i>Picea abies</i>	R.U.	29,8	14,3	14,55	102%
Gash (1979)	<i>Pinus sylvestris</i>	R.U.	37,33	10,96	10,21	93%
Gash et al. (1980)	<i>Picea sitchensis</i>	R.U.	153,42	40,94	35,38	86%
Gash et al. (1980)	<i>Pinus sylvestris</i>	R.U.	52,63	22,31	26,90	121%
Gash et al. (1980)	<i>Picea sitchensis</i>	R.U.	79,67	25,23	29,80	118%
Rutter et al. (1975)	<i>Carpinus betula</i>	R.U.	37,2	13,35	13,2	99%
Rutter et al. (1975)	<i>Quercus robur</i>	R.U.	56,1	10,2	8,2	80%
Rutter et al. (1975)	<i>Quercus robur (defoliado)</i>	R.U.	56,1	6,6	4,5	68%
Lloyd et al. (1988)	Bosque tropical amazónico	Brasil	205,71	20,58	29,00	141%
Jetten (1996)	Bosque siempreverde seco	Guyana	161,36	25,79	22,36	87%
Jetten (1996)	Bosque mixto	Guyana	162,57	28,07	22,36	80%
Este trabajo	<i>Laurisilva</i>	España	32,44	13,87	12,53	90%

Al comparar el resultado obtenido al aplicar el método de Rutter con  $r_a$  del *momentum*, con otros resultados de la aplicación de este método en otros bosques del mundo observamos (Tabla. 6-4) que en casi todos los de frondosas y tropicales a excepción del bosque amazónico

el método tiende a infraestimar, este resultado es posible que sea debido a la derivación de los parámetros de drenaje calculados para coníferas. Sin embargo observamos como el cociente entre el valor calculado y observado se mueve dentro de los límites usuales de este error para las frondosa, del 68% al 99%.

Al comparar el resultado obtenido al aplicar el método de Gash con  $r_a$  del *momentum*, con otros resultados de la aplicación de este método en otros bosques del mundo observamos (Tabla. 6-5), como los ajustes tienden a ser mejores que los estimados por el método de rutter y como el cociente entre los valores calculados y medidos en el presente trabajo, que es de 103%, está en el rango de los valores de la bibliografía.

Tabla 6-5 Valores y resultados de la aplicación del método de Gash con  $r_a$  del *momentum* para diferentes vegetaciones encontradas en la bibliografía, divididas en coníferas frondosas templadas y bosques tropicales y subtropicales. La tasa de evaporación  $E$  en Lankreijer *et al.* (1993) varía dependiendo del cálculo de la rugosidad. Valores de los parámetros meteorológicos del cálculo  $\bar{E}$ ,  $\bar{R}$  y  $P'_G$ , para los mismos bosques.

Autor	Especie		P mm/m	E mm/h	R mm/h	P'G	lcal mm/m	lm mm/m	c/m %
Gash y Morton (1978) (1979)	<i>Pinus sylvestris</i>	R.U.	37,33	0,19	1,38	1,35	10,72	10,96	98%
Singh & Szeicz (1979)	<i>Bosque boreal</i>	Canada		1					
Stewart (1979)	<i>Bosque de pinos</i>	R.U.		0,19					
Gash <i>et al.</i> (1980)	<i>Picea sitchensis</i>	R.U.	153,4	0,13	1,75		33,25	40,94	81%
Gash <i>et al.</i> (1980)	<i>Pinus sylvestris</i>	R.U.	52,63	0,33	1,22		26,37	22,31	118%
Gash <i>et al.</i> (1980)	<i>Picea sitchensis</i>	R.U.	79,67	0,21	1,37		24,74	25,23	98%
Lankreijer <i>et al.</i> (1993)	<i>P. pinaster</i>	Francia		0,09- 0,19	1,26				
Gash <i>et al.</i> , (1995)	<i>Pinus pinaster</i>	Francia	6,85	0,17	1,65		4,70	4,97	95%
Lankreijer <i>et al.</i> (1993)	<i>Quercus rubra</i>	Holanda		0,24- 0,15	1,89				
Lankreijer <i>et al.</i> (1993)	<i>Quercus rubra</i>	Holanda		0,25- 0,14	1,78				
Hörmann <i>et al.</i> (1996)	<i>Fagus sylvatica</i> (con hoja)	Alemania	66,77	0,05	1,91	1,5		7,27	
Hörmann <i>et al.</i> (1996)	<i>Fagus sylvatica</i> (sin hoja)	Alemania		0,01	1,48	7,2			
Pearce <i>et al.</i> (1980)	<i>Bosque siempreverde</i> <i>Nothofagus</i>	Nueva Zelanda		0,37					
Lloyd <i>et al.</i> (1988)	Bosque tropical amazónico	Brasil	205,7	0,21	5,15		20,58	26,11	79%
Navar & Bryan (1994)	<i>Vegetación semiárida</i>	México	60,89	2,95	13,52	1,39	16,96	17,01	100%
Este trabajo	<i>Laurisilva</i>	España	32,44	0,042	1,64	2,89	14,23	13,87	103%

Por último reseñar que al comparar el método de Gash con  $r_a$  del *momentum*, con el porcentaje de repartición de las pérdidas de interceptación debida a cada fase de la lluvia y al origen, con otros resultados de la aplicación de este método en otros bosques del mundo, observamos como no existe ningún patrón estricto (Tabla. 6-6); aunque no obstante los resultados obtenidos en este caso difieren bastante al resto, seguramente debido al régimen de lluvias existente en este tipo de ecosistema, en el cual se producen un alto porcentaje de lluvias incapaces de saturar la cubierta, y a la baja evaporación durante la lluvia que produce que la evaporación antes de que la lluvia cese sea extremadamente baja. Es posible que otros bosques del mundo con estas características climatológicas y estructurales se aproximen más a la laurisilva.

Tabla 6-6 Porcentaje de repartición de las pérdidas de interceptación debida a cada fase de la lluvia y al origen obtenidos mediante el método de Gash con  $r_a$  del *momentum*, en diferentes bosques del mundo

% de las pérdidas por interceptación	Navar & Bryan (1994)	Gash (1979)	Gash <i>et al.</i> (1980)	Gash <i>et al.</i> (1980)	Gash <i>et al.</i> (1980)	Lloyd <i>et al.</i> (1988)	Trabajo actual
Para <i>m</i> pequeñas lluvias insuficientes para saturar la cubierta	0%	19%	10%	23%	8%	7%	36%
Para <i>n</i> lluvias que saturan la cubierta .	4%	5%	3%	10%	4%	1%	1%
Evaporación antes de que la lluvia cese	71%	34%	27%	32%	40%	34%	3%
Evaporación después de que la lluvia cese	22%	41%	49%	32%	39%	49%	56%
Evaporación desde los troncos	3%	1%	11%	2%	8%	9%	4%
Total de pérdidas por interceptación (mm)	68	257	389	247	249	543	143

La ventaja que conlleva el método de Gash es que una vez calculados los parámetros necesarios es factible su aplicación a diferentes años de la misma estación siempre que se tengan los registros diarios de precipitación. En nuestro caso la estación meteorológica sobre la torre no tiene una suficiente serie de registros pero la estación cercana (sobre 500 m, al lugar de estudio) si la posee. No obstante la fiabilidad de la recogida de los datos no debe de ser tomada como excesivamente precisa, y es posible que para días con pequeñas precipitaciones, el dato se deseche, o que durante algún periodo se tome la lluvia de más de un día conjuntamente, ya que en algunos años el número de días con precipitaciones por debajo de 3 mm es casi nulo, lo cual resulta un poco inverosímil. Estos errores reducirían de forma ostensible los porcentajes anuales de pérdidas por interceptación, no obstante y pese a todo los resultados se presentan en la Tabla. 6-7. Al aplicar Gash a todo el periodo 1967-1997, se obtiene una media de 24,1%, un máximo de 32,9% en el año de año 1995, coincidente en parte con el periodo de estudio, y un mínimo 14,9% en el año 1968. Al aplicar el método a los datos de precipitación obtenidos sobre la torre durante el año de 1995 se obtiene un valor del 36%, lo que crea una diferencia del 10%, si suponemos que este 10% es el error mínimo podríamos aplicar un error arbitrario del 20% de infraestimación para la media obtenida para los valores de la estación meteorológica del INM, obteniendo un valor de 28,92%. Este valor se podría comparar con los de otros ecosistemas del planeta en la Tabla. 6-2, coincidiendo con el otro bosque afín a la laurisilva en Nueva Zelanda con un valor del 29%.

Las pérdidas por interceptación dependen de la composición y densidad de la cubierta vegetal y de las condiciones meteorológicas existentes durante la lluvia (Larcher, 1995). De la lluvia anual que cae sobre un bosque, la proporción que es interceptada por las hojas y las ramas, y evaporada desde ellas (la pérdida por interceptación) está usualmente comprendida entre un 20 y un 40% en coníferas (Zinke, 1967) y hasta un 50% en parcelas muy densas (Larcher, 1995), entre un 10 y un 20% en frondosas (Zinke, 1967), en bosques mixtos de la zona templada varía entre un 15-30% y en bosques densos tropicales del 35-70% de la precipitación total, bajo la vegetación se intercepta como media un 10% (5-20%). Los pequeños arbustos (brezos) interceptan como mucho un 50%, mientras que en campos de cultivo y pastos la interceptación es menor a un 10% (Larcher, 1995).

Las diferencias en los valores de interceptación se debe a la diferente duración de las lluvias y por lo tanto al diferente grado de humectabilidad de las cubiertas (Gash y Morton, 1978). Las cubiertas densas con hojas pequeñas y fácilmente mojables retienen más precipitación que las cubiertas abiertas con hojas grandes y lisas; el grado con el que las hojas drenan es también muy importante (Larcher, 1995). No obstante parece ser que estos porcentajes dependen en gran medida de la intensidad de la lluvia, y cantidad y tipo de precipitación; y son mayores cuando llueve durante el día, siendo más dependiente de los parámetros climáticos durante la lluvia que de los parámetros de la estructura del bosque (Loustau *et al.*, 1992), entre los que destacan la temperatura, del viento y del déficit de saturación. De manera general se intercepta mayor cantidad de agua con pequeñas gotas y pequeñas cantidades de agua (Larcher, 1995).

Tabla 6-7 Estimación de las pérdidas por evaporación por interceptación mediante la utilización del método de Gash (*momentum*) para la serie de años de la estación del INM Tacoronte - Agua García C.F.<sup>26</sup>

Año	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996
Para m pequeñas lluvias insuficientes para saturar la cubierta	4,2	3,9	7,3	12,5	45,4	19,4	1,7	2,9	11,6	38,6	12,0	49,4	41,7	29,6	29,9	25,4	17,4	35,7	27,7	21,9	24,9	4,3
Para n lluvias que saturan la cubierta (>P'G).	0,9	1,5	2,5	1,8	2,3	2,4	0,9	1,4	1,5	1,9	1,7	1,7	1,6	1,9	2,1	1,9	1,5	1,7	2,3	1,4	1,9	2,1
Evaporación antes de que la lluvia cese	8,9	22,4	16,3	14,0	18,8	19,7	7,5	13,0	11,3	15,5	17,2	14,1	15,0	16,9	24,9	13,2	18,6	13,0	16,4	9,5	10,2	21,4
Evaporación después de que la lluvia cese	63,7	105,4	176,4	122,5	161,7	169,1	61,3	95,6	102,9	134,8	115,2	117,6	110,3	134,8	147,0	129,9	102,9	117,6	156,8	98,0	129,9	144,6
Evaporación desde los troncos, para q lluvias, que saturan los troncos y n-q, que no lo hacen.	2,3	3,6	6,1	4,7	8,1	6,7	2,1	3,3	4,0	6,7	4,6	7,1	6,1	6,3	6,6	5,8	4,4	6,0	6,9	4,6	5,8	5,0
Total evaporación por interceptación	80,0	136,8	208,6	155,5	236,4	217,3	73,4	116,1	131,3	197,5	150,7	189,9	174,7	189,4	210,5	176,1	144,7	174,0	210,0	135,4	172,7	177,3
% l respecto de la precipitación	20,6	14,9	27,1	24,2	26,5	24,1	22,0	20,5	25,1	26,8	20,1	27,8	25,0	24,4	19,5	27,8	18,3	27,7	27,0	29,1	32,9	19,3

<sup>26</sup> A pesar de que existe una serie más larga de años para los datos mensuales de dicha estación, para los valores diarios sólo nos han sido suministrados los años que aparecen en la tabla, con la serie interrumpida entre los años 1976-1983.

### 6.3.4. ERROR Y SENSIBILIDAD DEL ANÁLISIS

El cálculo del error se realizó de acuerdo con Gash (1979); Gash *et al.* (1980); Lloyd *et al.* (1988) Y Navar y Bryan (1994) entre otros autores; mediante la utilización del método de Rosenbluth (1975), mediante el cálculo de las contribuciones individuales al error total. Así las resultantes del error en cada parámetro  $S$ ,  $p$ ,  $pt$ ,  $St$  y  $r_a$  y  $Ep$  ( $\bar{E}$  en el caso del modelo de Gash) fueron combinadas para estimar el error estándar en la salida del modelo.

Los errores asumidos para cada variable fueron:

- para la  $S$  un error de  $\pm 10\%$  (Gash y Morton, 1978 y Gash 1979).
- para la  $p$  un error de  $\pm 30\%$  (Gash *et al.* 1995); que equivale a un  $\pm 14\%$  en  $(1-p-pt)$ . O bien tomar el máximo valor de la literatura tal y como los hicieron con Navar y Bryan, (1994) amparándose en la falta de conocimiento sobre este tema, que en nuestro caso sería 0,55 de acuerdo con la Tabla 6-3, lo que equivaldría a un  $\pm 785\%$ , que dada la poca variación en la obtención de la  $p$  por métodos diferentes en el presente estudio, se eligió la opción del valor que le corresponde a la variación de  $p$  acuerdo con su 95% de intervalo de confianza, que fue de  $\pm 13,3\%$ .
- para la  $pt$  y  $St$ , aunque el porcentaje de los parámetros del escurrido cortical es grande, cuando la magnitud absoluta de la evaporación desde los troncos es pequeña, los errores pueden ser desestimados. De acuerdo con Navar y Bryan, (1994) que utilizaron para el error de la  $pt$  el valor de la máxima variabilidad interespecífica, el cambio sería de un  $\pm 600\%$ . No obstante se puede utilizar el  $\pm 20\%$  como una asunción arbitraria (Gash, 1995).
- para la  $r_a$  y  $Ep$ , el error de  $Ep$  (que incluye el de  $r_a$ ) debe de ser menor al de la evaporación de durante los eventos e acuerdo con Gash *et al.* (1980), ya que las estaciones automatizadas tienden a tener mayor error en las condiciones cercanas a la saturación, por lo que se eligió un valor arbitrario del  $\pm 10\%$  para el error de  $Ep$ , o bien las diferencias entre las estimaciones de  $Ep$  mediante el método del cálculo de  $r_a$  de calor o del *momentum* que fue de  $\pm 37,9\%$ .
- para la  $\bar{E}$  la evaporación durante los eventos un error arbitrario de  $\pm 15\%$  de acuerdo con Gash (1979) posteriormente (Gash *et al.*, 1980) lo estima con base a fallos de precisión de los sensores como un  $\pm 19\%$ ; o el que le corresponde a la variación de acuerdo con su 95% de intervalo de confianza (Navar y Bryan, 1994) que en nuestro caso fue del  $\pm 89\%$ ; éste error incluiría la estimación de la la evaporación durante los eventos mediante el método de cálculo de  $r_a$ , del calor. Los errores de  $\bar{E}$  dependerán de la precisión de las medidas, en particular de la humedad y de las asunciones para la determinación de  $r_a$  (Gash, 1979).

El error final no incluye los posibles errores introducidos por los valores asumidos de los parámetros de la función de drenaje (Lloyd *et al.*, 1988), y las hojas de los árboles de laurisilva son muy diferentes a las acículas de coníferas del modelo inicial. Además en ecosistemas tropicales algunas especies han desarrollado la capacidad de repeler y enviar el agua rápidamente a través de sus hojas lisas vía puntos de goteo (Herwitz, 1987), de este modo se supone un drenaje mayor que el de las coníferas (Lloyd *et al.*, 1988). Los errores en la medida de la precipitación son también desestimados.

Otra fuente de error, se daría en ecosistemas tales como el del presente estudio o la vegetación semiárida de México, expuestos a balances hídricos deficitarios, donde las hojas

probablemente absorban parte del agua interceptada para satisfacer los déficits internos de agua y además el movimiento descendente de agua es probable (Navar y Bryan, 1994).

Así las pérdidas por interceptación fueron estimadas con cada uno de los nuevos valores. El error del modelo de predicción perteneciente a cualquier variable,  $X$ , fue estimado como:

$$dI = \frac{\partial I}{\partial X} dX$$

Si las variables son independientes, los errores resultantes deben de ser sumados cuadráticamente para el error total en la estima.

#### **6.3.4.1. ANÁLISIS DEL ERROR DE LA MEDIDA DE LAS PÉRDIDAS POR INTERCEPTACIÓN.**

El error en la medida de las perdidas por interceptación ha sido estimado asumiendo un error aleatorio de un 5% en la lluvia para cada periodo de medida (Gash *et al.*, 1980 y Gash, 1995), que supone 16,2 mm; un error en la precipitación penetrante dado por la variabilidad del mismo (Gash *et al.*, 1995), es decir un 5,9% que supone 9,7 mm; y con una asunción arbitraria del escurrido cortical del 20%(Gash, 1995) que supone 4,2 mm. Cuando estos son sumados cuadráticamente, se obtiene un error de 19,4 mm, o un 13,9% de las perdidas por interceptación, y un 6% de la precipitación. Éste error entra dentro de lo esperado al compararlo con otros errores como el 40,4% de Lloyd *et al.* (1988) o el 15% de Gash *et al.* (1995).

Es así como al existir estos errores se transfieren a un error al derivar los parámetros de la cubierta, en especial la  $S$  (Gash y Morton, 1978; Gash, 1980 y Lloyd *et al.*, 1988).

#### **6.3.4.2. ANÁLISIS DEL ERROR (MODELO DE RUTTER). SENSIBILIDAD DEL ANÁLISIS.**

Un cambio de  $S$  de 2,45 a 2,7 mm desvía la pérdida por interceptación en  $\pm 4,7$  mm o un  $\pm 3,7\%$ . Un cambio de  $p$  de 0,07 a 0,079 desvía la pérdida por interceptación en  $\pm 1,7$  mm o un  $\pm 1,4\%$ . Un cambio de  $E_p$  medio de 0,39 mm h<sup>-1</sup> a 0,53 mm h<sup>-1</sup> desvía la pérdida interceptación en  $\pm 8,9$  mm o un  $\pm 7,13\%$ . Un cambio de  $pt$  medio de 0,07 a 0,084 desvía la pérdida interceptación en  $\pm 4,3$  mm o un  $\pm 3,5\%$ . Y por último todos juntos, el error estimado de este modo fue de  $\pm 11,12$  mm o un  $\pm 8,9\%$ . Éste error entra dentro de lo esperado al compararlo con otros errores como el 21% obtenido por Lloyd *et al.* (1988).

Se realizó un test de diferencias estándar de medias entre la interceptación medida y estimada mostró que había diferencias significativas al nivel de 10%.

Gash y Morton (1978) probaron a introducir cambios en los parámetros de la estructura de la cubierta manteniendo las variables meteorológicas para comprobar la sensibilidad del modelo, comprobando que el modelo tenía una baja sensibilidad para  $p$  y para  $S$ , encontrando explicación en términos de las tasas relativas de lluvia y evaporación, ya que sólo con determinadas condiciones meteorológicas, la cubierta se secaría durante la lluvia, y así la evaporación siempre depende de las variables meteorológicas, sin embargo la importancia de los parámetros de la estructura de la cubierta estará restringida a los periodos cuando la lluvia caiga en pequeñas cantidades, o con bajas tasas y a las pequeñas cantidades de agua que permanezcan en la cubierta cuando la lluvia haya cesado.

Los mismos cálculos fueron realizados por Jetten (1996) que introdujo valores de  $S$  que variaba entre un  $-50\%$  y un  $+100\%$ , realizando lo mismo para la  $Ep$ , encontraron que si aumentaban un  $50\%$  la  $S$  obtenían valores muy similar a los medidos para la evaporación por interceptación, teniendo que aumentar un  $100\%$  la  $Ep$  para encontrara resultados en consonancia. Sin embargo este aumento del  $50\%$  sobrestima los resultados para poca precipitación mientras que para grandes cantidades sigue infraestimando, no mejorando de este modo los resultados. En nuestro caso como puede comprobarse en la Figura. 6-7, los valores que coincidirías con la interceptación medida tanto de  $S$  como de  $Ep$  serían menores a un aumento del  $25\%$ , no obstante estos aumentos en el caso de la  $S$  estarían fuera del margen de error propuesto anteriormente, no así en el caso de la  $Ep$ .

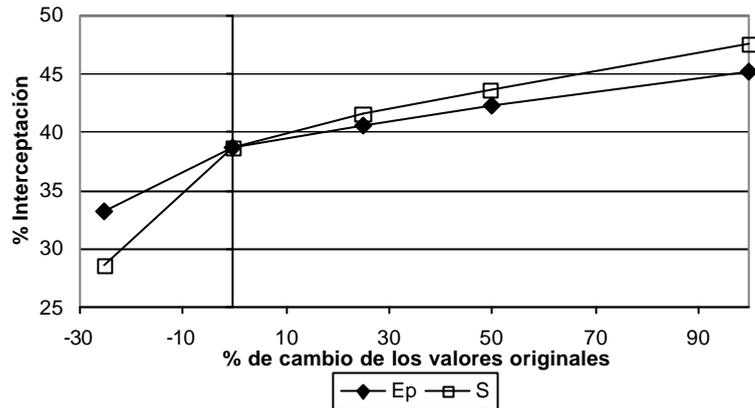


Fig. 6-7 Variación del porcentaje de interceptación respecto al porcentaje de cambio de  $S$  y  $Ep$ .

La Figura 6-8 representa la interceptación semanal medida y la calculada frente a la precipitación, presenta una gran dispersión debido a factores tales como el contenido de humedad de la vegetación anterior, la duración e intensidad de la lluvia, la tasa de evaporación y los errores de medida, lo que da como resultado una gran variabilidad de la interceptación asociada a la misma cantidad de lluvia (Jackson, 1975), la variación de los valores medidos y calculados varía de gran manera por encima los 25 mm

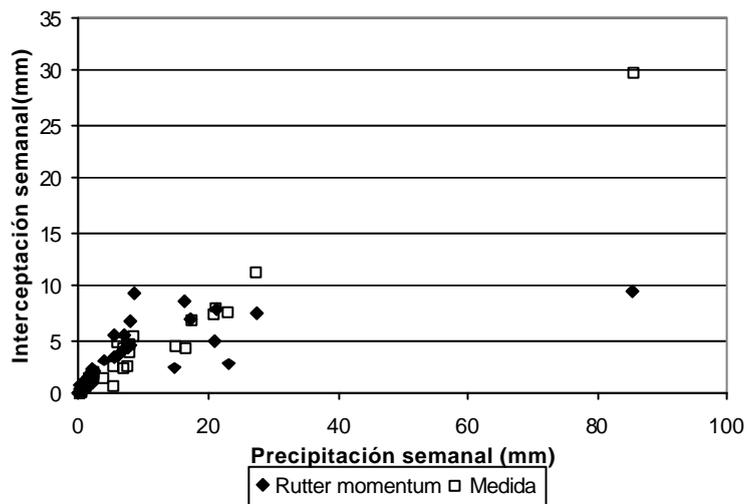


Fig. 6-8 Precipitación semanal frente a interceptación semanal estimada mediante el modelo de Rutter con el cálculo de la  $r_a$  del momentum y medida

siendo extrema en el valor alto de 89 mm de precipitación semanal. Está infraestimación para valores altos ya fue detectada por Jetten (1996), por encima de 10 mm que en su caso representa el 30% de las lluvias, afirmando que el modelo de Rutter infraestima cuando la cantidad de lluvia diaria está por encima de 10 mm. Por ese motivo este mismo autor desarrolló el modelo de la cascada (Jetten, 1996) que tiene un efecto tamponador sobre los cambios en los procesos de drenaje, almacenando más cantidad de agua en la cubierta multiestratificada ( $i$  capas) del modelo de la cascada que en el de Rutter. Este efecto es debido a que la suma de todas las  $C_i$  no es igual a  $C$ , además la superficie de evaporación es mayor, y la cubierta se seca más rápidamente, especialmente en al caso de pequeños eventos. Este modelo podrá ser aplicado para la laurisilva que ocupa nuestro interés cuando se hayan podido solucionar algunas incógnitas en la modelización del microclima dentro de la cubierta arbórea.

### 6.3.4.3. ANÁLISIS DEL ERROR (MODELO DE GASH). SENSIBILIDAD DEL ANÁLISIS.

Un cambio de  $S$  de 2,45 a 2,7 mm desvía la pérdida por interceptación en  $\pm 7,51$  mm o un  $\pm 5,26\%$ . Un cambio de  $p$  de 0,07 a 0,079 desvía la pérdida por interceptación en  $\pm 4,89$  mm o un  $\pm 3,4\%$ . Un cambio de  $\bar{E}$  medio de  $0,042 \text{ mm h}^{-1}$  a  $0,078 \text{ mm h}^{-1}$  desvía la pérdida interceptación en  $\pm 0,54$  mm o un  $\pm 0,38\%$ . Un cambio de  $pt$  medio de 0,07 a 0,084 desvía la pérdida interceptación en  $\pm 0,45$  mm o un  $\pm 0,31\%$ . Las pérdidas por interceptación fueron más sensibles para Navar y Bryan (1994) a  $\bar{E}$  y  $pt$  de acuerdo con posiblemente debido al alto valor del error al que se sometió la  $pt$ . Para Gash (1979) fueron por orden  $(1-p-pt)$ ,  $\bar{E}$  y  $S$  y para Gash *et al.* (1995) fueron dominadas por  $S$ ,  $p$  y  $\bar{E}$ .

Y por último todos juntos, el error estimado de este modo fue de  $\pm 9,0$  mm o un  $\pm 6,3\%$ . Éste error entra dentro de lo esperado al compararlo con otros errores como el 8% de Gash (1979), 21% obtenido por Lloyd *et al.* (1988), el 45,3% de Navar y Bryan (1994) o el 17,8% de Gash *et al.* (1995).

Se realizó un test de diferencias estándar de medias entre la interceptación medida y estimada mostró que había diferencias significativas al nivel de 10%, y entre la interceptación modelada por ambos modelos y no se encontraron diferencias significativas al nivel del 10%.

## 6.5. CONCLUSIONES.

- La capacidad de almacenamiento de la cubierta del bosque de laurisilva ha arrojado un valor de 2,45, alto de acuerdo con la revisión bibliográfica realizada, que debe de ser debido al alto índice de área foliar que presenta este bosque.
- La evaporación durante la lluvia presenta un valor realmente bajo,  $0,042 \text{ mm h}^{-1}$ , posiblemente debido a la falta de sensibilidad de los sensores de humedad en condiciones cercanas a la saturación y al origen oceánico frecuente de las lluvias en esta zona de Tenerife
- El resto de los parámetros de la cubierta y climatológicos no presentan valores que se salgan de lo frecuente de acuerdo con la revisión realizada.
- Para el periodo de estudio la interceptación medida tuvo como valor de  $138,8 \pm 19,4$  mm, lo que representa el  $42,8 \pm 6\%$  de la precipitación. De los modelos probados el que mejor ajuste proporcionó fue el de Gash. Para el modelo de Gash proporciona mejor ajuste el cálculo de  $r_a$  mediante el calor que el *momentum* a diferencia del modelo de Rutter donde el cálculo de  $r_a$  mediante el *momentum* se ajustó más que el calor. Todos los modelos entraron dentro el margen de error de la interceptación medida excepto el de Gash mediante la obtención por métodos lineales del cociente de  $\bar{E}/\bar{R}$ , que sobrestima el resultado de la interceptación. Tanto el modelo de Rutter como el de Gash infraestiman la interceptación para grandes eventos, mostrando un alta infraestimación el modelo de Rutter para semanas con más de 25 mm de precipitación.
- La aplicación del modelo de Gash con los parámetros obtenidos a una estación cercana del INM con un intento de corrección del resultado arroja una interceptación anual media para el periodo de datos existente del 29% en el rango de otros bosques afines al del estudio.
- Los errores de ambos modelos fueron bajos, similares a los de la bibliografía

## 6.6. BIBLIOGRAFÍA

- Allen, L.H. Lemon, E.R. & Müller, L. 1976. Carbon dioxide exchange and turbulence in a Costa Rica tropical rain forest. *Ecology*, 53:102-111.
- Anderson, A.R. & Pyatt, D.G., 1986. Interception of precipitation, by pole-stage, Sitka spruce and lodgepole pine and mature Sitka spruce at Kielder forest, Northumberland. *Forestry*, 59(1):29-38.
- Aschan, G. Losch R. Jiménez, M.S. & Morales, D. 1997. Energiebilanz von Waldbeständen in nicht-idealem Gelände-Abschätzungen auf der Grundlage von standörtlicher Klimaerfassung und flankierenden Gaswechselfmessungen am Beispiel eines Lorbeerwaldbestandes auf Teneriffa. *Eco. Sys. Suppl.-Bd. 20*:145-160.
- Ashton, A.R. 1979. Rainfall interception in eight small trees. *J. Hydrol.* 42:383-396.
- Blacke, G.J. 1975. The interception process. In T.G. Chapman & F.X. Dunin (Eds.) *Prediction in catchment Hydrology*. Australian Academy of science Press, Canberra, A.C.T., pp.59-81.
- Bouten, W. Swart, P.J.F. & De Water, E. 1991. Microwave transmission, a new tool in forest hydrological research. *J. Hydrol.* 124:119-130.
- Bouten, W. 1992. Monitoring and modelling forest hydrological processes in support of acidification research. Dissertation, Laboratory of Physical Geography and Soil Science, University of Amsterdam.
- Bouten, W. Schaap, M.G. Aaerts, J. & Vermetten, A.W.M. 1996. Monitoring and modelling canopy water storage amounts in support of atmospheric deposition studies. accepted by *J. Hydrol.*
- Bringfelt, B. & Hårsmar, P.-O. 1976. Rainfall interception in a forest in the Velen Hydrological representative basin. *Nord. Hydrol.* 5:146-165.
- Bruijnzeel, L.A. & Wiersum, K.F. 1987. Rainfall interception by young *Acacia auriculiformis* (A. Cunn) plantation forest in West Java (Indonesia): application of Gash's analytical model. *Hydrol. Process.* 1:309-317.
- Brutsaert, W. 1982. *Evaporation into the atmosphere*. D. Reidel, Dordrecht, Holland, pp. 114.
- Calder, I.R. 1976. The measurement of water losses from a forested area using a "natural" lysimeter, *J. Hydrol.* 30:311-325.
- Calder, I.R. 1977. A model of transpiration and interception loss from Spruce forest in Plynlimon, central Wales. *J. Hydrol.* 33:247-256.
- Calder, I.R. 1986. A stochastic model of rainfall interception. *J. Hydrol.* 89:65-71.
- Calder, I.R. . 1990. *Evaporation of Uplands*. John Wiley & Sons, Chichester, England, 144pp.
- Calder, I.R. & Wright, I.R. 1986. Gamma ray attenuation studies of interception from Sitka Spruce: Some evidence for an additional transport mechanism. *Water Resour. Res.* 22:409-417.
- Crockford, R.H. & Richardson, D.P. 1990. Partitioning of rainfall in an eucalypt forest and pine plantation in southern Australia: IV The relationship of interception and canopy storage capacity, the interception of these forests, and the effect on interception of thinning the pine plantation. *Hydrol. Process.* 4:168-188.
- DeWalle, D.R. & Paulsell, L.K. 1979. Canopy interception, stemflow and streamflow on a small drainage in the Missouri Ozarks. *Res. Bull. Univ. Missouri – Columbia Coll., Agric.* 951.
- Dolman, A.J. 1987. Summer and winter rainfall interception in an oak forest. Predictions with an analytical and numerical simulation model. *J. Hydrol.* 90:1-9.
- Elling, W. Häckel, H. & Ohmayer, G. 1990. Schätzung der aktuellen nutzbaren Wasserspeicherung (ANSW) des Wurzelraumes von Waldständen mit Hilfe eines Simulationsmodells. *Forstw. Zbl.* 109:210-219.
- Feller, M.C. 1981. Water balances in *Eucalyptus regnas*, *E.oblicua* and *Pinus radiata* forests in Victoria.. *Aust. For.* 44: 153-161.
- Ford E.D: & Deans, J.D. , 1978. The effects of canopy structure on stemflow, throughfall and interception loss in a young Sitka spruce plantation. *J. Appl. Ecol.* 15(3): 905-917.

- Fritsch, J.M. 1990. Les effets du enrichissement de la forêt Amazonienne et de la mise en culture sur l'hydrologie de petits bassins versants, Operation ECEREX en Guyane Française. Dissertation, Université de Montpellier.
- Garratt, J.R. & Francey, R.J. 1978. Bulk characteristics of heat transfer in the baroclinic atmospheric boundary layer. *Bound-Lay. Meteorol.* 15:399-421.
- Gash, J.H.C. 1979. An analytical model of rainfall interception by forest. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.* 105:43-55.
- Gash, J.H.C. & Stewart, J.B. 1977. The evaporation from Thetford forest during, 1975, *J. Hydrol.* 35:385-396.
- Gash, J.H.C. & Morton, A.J. 1978. An application of the Rutter Model to the estimation of the interception loss from Thetford forest. *J. Hydrol.* 38: 49-58.
- Gash, J.H.C., Wright, I.R. & Lloyd, C.R. 1980. Comparative estimates of interception loss from three coniferous forests in Great Britain, *J. Hydrol.* 48:89-105.
- Gash, J.H.C. Lloyd, C.R. & Lachaud, G. 1995. Estimating sparse forest rainfall interception with an analytical model. *J. Hydrol.* 170:79-86.
- Gosh, R.C. Kaul, O.N. & Subba Rao, B.K. 1978. Some aspects of water relations and nutrition in Eucalyptus plantations. *Indian Forester.*
- Gras, J.M. 1993. Investigación sobre las relaciones hídricas en las plantaciones de Eucalyptus globulus en Galicia. Tesis Doctoral. 150 pp.
- Hancock, N.H. & Crowther, J.M. 1979. A technique for direct measurement of water storage on a forest canopy. *J. Hydrol.* 41:105-122.
- Hancock, N.H. Sellers, P.J. & Crowther, J.M. 1983. Evaporation of partially wet forest canopy. *Ann. Geophys.* 1(2):139-146.
- Hendricks, M.J. Kabat, P. Homma, F. & Postma, J. 1990. Research into the evaporation of a deciduous forest. Measurements and simulations. Report 90, Staring Centrum, Wageningen, 95 pp.
- Herwitz, S.R. 1985. Interception storage and capacities of tropical rainforest canopy trees *J. Hydrol.* 77:237-252.
- Helvey, J.D. & Patric, J.H. 1965. Canopy and litter interception of rainfall by hardwoods of Eastern United States. *Water Resour. Res.* 1:193-206.
- Herbst, M & Thamm, F. 1994. Interzeptionverlust eines norddeutschen Buchenwaldes – Eine Anwendung des Interzeptionmodells von Gash. *Z. Kulturtechn. Landentw.* 35:311-319.
- Hörmann, G. Branding, A. Clemen, T. Herbst, M. Hinrichs, A. & Thamm, F. 1996. Calculation and simulation of wind controlled canopy interception of beech forest in Northern Germany. *Agr. Forest Meteorol.* 79:131-148.
- Hutchings, N.J. Milne, R. & Crowther, J.M. 1988. Canopy storage capacity and its vertical distribution in a Sitka spruce canopy. *J. Hydrol.* 104:161-171.
- Hutjes, R.W. Wierda, A & Venn, A.W. 1990. Rainfall interception in the Tai forest, Ivory Coast: Application of two simulation Models to Humid Tropical System. *J. Hydrol.* 114(3-4):259-275.
- Jackson, I.J. 1975. Relationships between rainfall parameters and interception by tropical forest. *J. Hydrol.* 24:215-238.
- Jarvis, P.G. James, G.B. & Landsberg, J.J. 1976. Coniferous Forest. In: J.L. Monteith (Ed.) , *Vegetation and atmosphere. Vol.2.* Academic Press, London.
- Jarvis, P.G. 1994 Water deficits. Plant responses from cell to community. In "Environmental Plant Biology" Smith J.A.C. & Griffiths, H. (Eds.) Bios scientific publishers.
- Jetten, V.G. 1996. Interception of tropical rain forest: performance of a canopy water balance model. *Hydrol. Process.* 10:671-685.
- Johnson, R. 1990. The interception, throughfall and stemflow in a forest in highland Scotland and the comparison with other Uplands forest in the U.K. *J. Hydrol.* 118:281-287.

- Kändler; G. 1986. Die Ermittlung von Betandesparametern als Eingangsgrößen für Interzeptionsmodelle mit Hilfe aerophotogrammetrischer Verfahren. Mitteilungs des Forstl. Versuchs- und Forschungsanstalt Baden- Württemberg, Freiburg, H. 127.
- Kelliher, F.M. Whitehead, D. & Pollock, D.S. 1992. Rainfall interception by trees and slash in a young *Pinus radiata* D. Don stand. J. Hydrol. 131:187-204.
- Klaassen, W. Bosveld, F. & de Water, E. 1996. On water storage and evaporation as constituents of rainfall interception. accepted by J. Hydrol.
- Kung, E. 1961. Derivation of roughness parameter from wind profile data above tall vegetation. Wisc. Univ. Dept. Meteorol., Ann. Rept., pp 27-33.
- Larcher, W. 1995. Water economy in plant communities In Larcher W. (ed.) Physiological Plant Ecology. 2<sup>o</sup> Edition. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo.
- Lankreijer, H.J.M. Hendriks, M.J. and Klassen, W. 1993. A comparison of models simulating rainfall interception of forest. Agric. Forest Meteorol. 64:187-199.
- Leyton, E.R. Reynolds & Thompson, F.B. 1967. Rainfall interception in forest and moorland. Processing from International Symposium held at University Park, Pennsylvania, Aug-Sept 1965, Forest Hydrology, In: Sopper, W.E. and Lull, H W. (Eds.), Pergamon Press, Pergamon Press, Oxford/London/Edinburgh/New York/Toronto/Sydney/Paris/Braunschweig, pp. 163-178.
- Lima, W.P. 1987. O reflorestamento com Eucalipto e seus impactos ambientais. Sao Paulo. Artpress.
- Lloyd, C.R. Gash, J.H.C. Shuttleworth, W.J. & Marques F., A. de O. 1988. The measurements and modelling of rainfall interception by Amazonian Rain Forest. Agric. For. Meteorol., 43:277-294.
- Loustau, D. Berbigier, P. & Granier, A. 1992. Interception loss, throughfall and stemflow in a maritime pine stand. I, Variability of throughfall and stemflow beneath the pine canopy, J. Hydrol. 138:449-467.
- Lundberg, A. 1996 Interception evaporation. Processes and measurement techniques. Interception evaporation - an overview of current knowledge. Doctoral Ph Thesis.
- Massman, W.J. 1983. The derivation and validation of a new model for the interception rainfall by forests. Agric. Meteorol. 28:261-286.
- Monteith, J.L. 1965. Evaporation and environment. Symposia of the society for Experimental Biology. 19:205-234.
- Mulder, J.P.M. 1985. Simulating interception loss using standard meteorological data. In: B.A. Hutchinson & B.B. Hicks (Eds.) The Forest-Atmosphere Interaction. D. Reidel, Dordrecht, Netherlands, pp.177-196.
- Návar, J & Bryan, R.B. 1994. Fitting the analytical model of rainfall interception of Gash to individual shrubs of semi-arid vegetation in northeastern México. Agricultural Forest Meteorol. 68:133-143.
- Penman, H.L. 1956. Evaporation-an introductory survey. Neth. J. Agr. Sci., 4:9-29.
- Pearce, A.J. & Rowe, L.K. 1981. Rainfall interception in a multi-storied evergreen mixed forest: estimates using Gash's analytical model. J. Hydrol. 49:341-353.
- Pearce, A.J. Rowe, L.K. & Stewart, J.B. 1980. Night-time, wet canopy evaporation rates and the water balance of a evergreen mixed forest. Water Resour. Res. 16:955-959.
- Perttu, K. Bishop, W. Grip, H. Jansson, P.E. Lingren, Å. Lindroth, A. & Nore'n, B. 1980. Micrometeorology and hydrology of pine ecosystems. I. Field studies. In: Persson, T. (Ed.) Structure and Function of Northern Coniferous Forests- An Ecosystem System Study, Ecological Bulletin, 32:75-121.
- Pook, P.H. Moore, P.H.R. & Hall T.. 1991. Rainfall interception by trees of *Pinus radiata* and *Eucalyptus viminalis* in a 1300 mm rainfall area of southeastern New South Wales: II. Influence of wind borne precipitation. Hydrol. Process. 5:142-155.
- Pröbstle, P. & Kreuzer, K. 1991. Näherungsweise Erfassung der Wasserbilanzen am Standort Högwald. Forstwiss. Forsch. 39:151-164.
- Robins, P.C. 1969. Comparative studies of evaporation from *Pinus nigra* and *Pseudotsuga menziesii*, with particular reference to air stomatal resistances. Thesis, Univ. London, 151 pp.

- Robins, P.C. 1974. A method of measuring the aerodynamic resistance to the transport of water vapour from forest canopies. *J. Appl. Ecol.* 11:315-325.
- Rosenbluth, E. 1975. Point estimates for probably moments. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, 72:3812-3814.
- Rowe, L.K. 1983. Rainfall interception by an evergreen beech forest, Nelson, New Zeland. *J. Hydrol.* 66:143-158.
- Rutter, A.J., 1963. Studies in the water relations of *Pinus sylvestris* in plantation conditions. II. The annual cycle of soil moisture change and derived estimates of evaporation. *J. Appl. Ecol.*, 18: 521-527.
- Rutter, A.J.1965. Studies on tje water relations of *Pinus sylvestris* in plantation conditions. III. A comparaison of soil water changes and stimate of total evaporation on four afforested and grass coverd site. *J. Appl. Ecol.* 2:197-209.
- Rutter, A.J. 1967 an analysis of evaporation from a stand of Scots pine. In: W.E. Sopper & H.W. Lull (Eds.), *Forest Hydrology*, Pergamon, Oxford. pp.403-417.
- Rutter, A.J. 1975. The hydrologycal cycle in vegetation. In: J.L. Monteith (Ed.) *Vegetation and the Atmosphere*. Vol. 1 Academic Press London.pp111-154.
- Rutter, A.J. Kershaw, K.A., Robins, P.C. & Morton A.J. 1971. A predictive model of rainfall interception in forest, 1. derivation of the model from observation in a plantation of corsican pine. *Agr. Meteorol.* 9:367-374.
- Rutter, A.J. Morton A.J. & Robins, P.C. 1975. A predictive model of interception loss in forest. II. Generalization of the model and comparison with observations in some coniferous and hardwood stands. *J. Appl. Ecol.* 12:367-380.
- Sambasiva Rao, A. 1987. Interception losses of rainfall from cashew trees. *J. Hydrol.* 90:293-301.
- Saxena, R.K. 1986. Estimating of the canopy reservoir capacity and oxygen-18 fractionation in throughfall in a pine forest. *Nord. Hydrol.* 17:251-260.
- Schöeder M. 1984. Die Interzeptionsmessungen an der Großlysimeteranlage St. Arnold. *DGM* 28. Jg., 5/6:164-171.
- Schöeder, N. 1985. Jahreswerte der Waldverdunstung und ihrer Teilgrößen an der Großlysimeteranlage St. Arnold. *DGM* 29. Jg., 3:95-98.
- Shuttleworth, W.J. 1989. *Micrometeorology of temperate and tropical forest*. *Forests, Weather and climate*. P.G. Jarvis, J.L. Monteith, W.J. Shuttleworth & M.H. Unsworth (Eds.) pp. 299-339. University Press, Cambridge.
- Singh, B. & Szeicz G. 1979. The effect of intercepted rainfall on the water balance of a harwood forest. *Water Resour. Res.* 15(1):131-138.
- Stålfeldt, M.G. 1963. On the distribution of precipitation in a spruce stand, In: A.J. Rutter, F.H. Whitehead (Eds.), *The water Relations of plants*. A symposium of the British Ecological Society, london, 5-8, April, 1961, Blackwell Scientific publications, London, pp.115-126.
- Stewart, J.B. 1977. Evaporation from wet canopy of a pine forest. *Water Resour. Res.* 13:915-921.
- Stewart, J.B. 1978. A micrometeorological investigation into the factors controlling the evaporation from a forest. Ph.D.thesis, University of Reading.
- Stogsdill, J.W.R., Wittwer, R.F. Hennessey, T.D. & Dougherty, P.M. 1989. Relationship between throughfall and density in a *Pinus tadea* plantation. *Forest Ecol. Manag.* 29:105-113.
- Teklehaimanot, Z. & Jarvis, P.G. 1991. Direct measurement of evaporation of intercepted water from forest canopies. *J. Appl. Ecol.* 28:603-618.
- Teklehaimanot, Z. Jarvis, P.G. & Ledger, D.C. 1991. Rainfall interception and boundary layer conductance in relation to tree spacing. *J. Hydrol.* 123:261-278.
- Thom, A.S. 1975. Momentum, mass and heat exchange of plant comunities. In: J.L. Monteith (Ed.), *Vegetation and Atmosphere*. Vol. 1. Academic Press, London.

- Thompson, F.B. 1972). Rainfall interception by oak coppice (*Quercus robur*, L.). In J.A. Taylor (Ed.) Research Papers in Forest Meteorology. Cambrian News Ltd. Aberystwyth. Pp.59-74.
- Vis, M. 1986. Interception, drop size distributions and rainfall kinetic energy in four Colombian forest ecosystems. Earth Surf. Process. Landforms. 11:591-603.
- Viville, D. Biron, P. Granier, A. Dambrine, E. & Probst, A. 1993. Interception in a mountainous declining spruce stand in the Strenbach catchment (Voges, France). J. Hydrol. 144:273-282.
- Waterloo, M.J. 1994. Water and nutrients dynamics of *Pinus caribea* plantation forests on former grassland in southwest Viti Levu, Fidji. Dissertation, Faculty of Earth Sciencies, Free University Amsterdam.
- Whitehead, D. & Kelliher, F.M. 1991. A canopy water balance model for *Pinus radiata* stand before and after thinning. Agr. Forest Meteorol. 55:109-126.
- Zinke, P.J. 1967. Forest interception studied in the United States. In: W.E. Sopper and H.W. Lull (editors), Forest Hydrology. Pergamon, Oxford, pp. 137-161.



## Capítulo 7. LA PRECIPITACIÓN COMPLETA

### 7.1. INTRODUCCIÓN

Los aportes de la deposición atmosférica están determinados por la composición de la precipitación completa (*BP*), es decir la lluvia (deposición húmeda *WD*) más la deposición seca recogida por un embudo o recipiente que está permanentemente abierto (*DD<sub>I</sub>*) (Veneklaas, 1990, Lovett, 1994). La recogida de precipitación completa es usada por la simplicidad y el bajo coste del método (Lovett, 1994). Desafortunadamente, existe otras fuentes de aportes; durante los periodos secos los colectores de precipitación completa recogen los aerosoles y partículas así como las anomalías, incluido el material de origen local que no debe de ser considerado como un aporte al ecosistema, tal como excrementos de pájaros, polen, insectos y el polvo de formación "*in situ*" que es lavado en el colector en la siguiente lluvia (Matzner y Meiwes, 1994; Lovett, 1994).

La deposición seca, durante los periodos secos, aglutina tanto la deposición de partículas y aerosoles como la deposición atmosférica de gases por adsorción, siendo una importante fuente de elementos. La deposición seca contribuye con cantidades significativas de NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub>, y hasta la adsorción gaseosa es relativamente importante para esos elementos, la deposición seca es normalmente mayor en cubiertas de coníferas que en cubiertas de frondosas (Fowler, 1980).

Las relaciones entre los principales constituyentes de la sal marina son marcadamente constantes en los océanos y mares del mundo con un pequeño número de excepciones (Sequeira y Kelkar 1978; Appelo *et al.* 1993). Las mismas relaciones en aerosoles marinos y en la precipitación han sido observadas en ocasiones como diferente a la correspondiente para los valores del agua de mar, determinada por la fuente del vapor de agua y por los iones que son adquiridos por el agua (o perdidos por ella) durante el transporte a través de la atmósfera (Sequeira y Kelkar 1978; Matzner y Meiwes, 1994), siendo una de las causas de tales discrepancias la presencia de polvo de origen terrestre en la atmósfera marina. Por ello, cerca de la costa, la composición del agua de lluvia se parece de manera significativa a agua de mar diluida. Los grandes desiertos del mundo son la mayor fuente de polvo para la atmósfera, el cual tiene una amplia distancia de transporte (Morales, 1979; Sequeira y Kelkar, 1978; Rodà *et al.* 1993). Los factores que influyen en los aportes son por ejemplo: la dirección con la que sopla el viento usualmente, la distancia desde las fuentes de emisión, el mar o la posición respecto del lugar de emisión y la situación sobre el nivel medio de la altura del mar (Striegel *et al.* 1994).

Algunos de los elementos depositados sobre la cubierta boscosa desde la atmósfera tienen un origen natural, pero el gran incremento de sustancias contaminantes, sobre todo en recientes décadas, ha significado un importante cambio en la química de la atmósfera (Mesanza y Casado, 1994). En algunos lugares el efecto sobre los bosques de los aportes atmosféricos de origen antrópico, como la lluvia ácida y la deposición seca de contaminantes, ha sido tratado entre otros autores por Lovett *et al.* (1989), Kloeti *et al.* (1989) y Neary and Gizyn (1994), pero la existencia de estos aportes antropogénicos sobre cubiertas vegetales no ha sido tratada para la isla de Tenerife.

Algunos elementos son esenciales para el desarrollo y el crecimiento de árbol. Los flujos de iones hacia y desde el ecosistema forestal están regidos por la deposición atmosférica y la escorrentía, respectivamente (Ferm y Hultberg, 1995). Las nubes contienen importantes cantidades de nutrientes minerales, que los agregan al llover, junto con la deposición atmosférica seca, al suelo (Jordan *et al.*, 1980, Lovett *et al.*, 1985; Lindberg *et al.*, 1986, 1992).

En bosques mixtos de decíduas se ha descrito que la deposición seca abastece en elementos como el Ca y N en un porcentaje que se aproxima al 40% del requerimiento anual

para la producción de madera y más de 100% del requerimiento de S (Jonhson y Lindberg, 1992), así la deposición atmosférica es una importante contribución al ciclo de los nutrientes en el ecosistema forestal (Appelo *et al.* 1993).

Los objetivos de este capítulo son:

- i. Determinar los aportes de la precipitación completa a la parcela de estudio.
- ii. Determinar el origen de estos aportes (terrestre o marino).
- iii. Examinar la influencia de diversos factores en la química de la precipitación completa.

## **7.2 MATERIAL Y MÉTODOS**

### **7.2.1. INSTRUMENTOS DE CAMPO Y RECOGIDA DE MUESTRAS**

Durante el periodo del 28 de diciembre de 1994 al 27 de diciembre de 1995 dos recipientes para la recogida de precipitación completa fueron instalados en lo alto de una torre de madera de 17 m de altura sobre el nivel del suelo, dos metros por encima de las copas de los árboles, por lo que la deposición de restos vegetales llevados por el viento (hojas, semillas y polen) fue minimizada. La recogida fue efectuada a intervalos semanales, siempre que las cantidades obtenidas fueran suficientes para constituir una muestra, obteniéndose a lo largo del año 24 muestras. La precipitación completa fue recogida en embudos de 17 cm de diámetro descritos en el apartado 4.2.1. Una muestra combinada de los dos recipientes fue recogida en botes limpios de polietileno de 250 ml. Los pluviómetros fueron lavados con agua bidestilada y desionizada tras las tomas de muestras.

A la botella cuya boca se ensambla dentro de la otra se le practicó una sección a unos 5 cm de su parte inferior, y se le puso una fina rejilla de plástico (250 mm) en su cuello interior impidiendo el paso de materiales vegetales y animales; de esta forma esta botella realizó la función de un embudo. El material acumulado en la rejilla, que se limpió semanalmente, y los filtros se lavaron frecuentemente. Las muestra fueron llevadas al laboratorio en un periodo inferior a 1 hora, e introducidas en un frigorífico a -4°C esperando para ser analizadas. En la semana siguiente un fracción de 200 ml de agua fue filtrada a través de filtros de 0,45 µm (Millipore). De cada muestra se conservo una submuestra de 50 ml sin filtrar que fue utilizada para la determinación del Carbono orgánico disuelto (COD).

### **7.2.2. ANÁLISIS QUÍMICO**

Para la metodología analítica del agua se siguieron los métodos del American Public Health Association (1992), que se indican a continuación tras el paso de filtración (de 0,45 µm de tamaño de poro), para eliminar una posible fuente de falta de balance (Sequeira y Lung, 1995) utilizando un aparato estándar, excepto para la determinación del COD:

El pH según método SM-4500 H+ B/92; la medida se realizó con un pH-metro Crison digit 501, con electrodo selectivo combinado Ingold-V5402. La Conductividad Eléctrica (CE) según el método SM-2510 B/92, la medida se realizó sumergiendo la célula en el agua a examinar, con corrección de temperatura a 25 °C y en agitación continua, se utilizó un conductímetro WTW LF 537, con electrodo WTW tetralon 36.

La determinación de los cationes, el Na y K fue efectuada por Fotometría de Emisión de Llama (Sensibilidad Na: 0,012mg/l y Sensibilidad K: 0,043 mg/l), el Ca y Mg fue efectuada por Espectrometría de Absorción Atómica y por Espectrometría de Emisión con Plasma Inducido (ICP) (Sensibilidad Ca: 0,092mg/l y Sensibilidad Mg: 0,0078mg/l), el Al, Si y Fe fue efectuada por Espectrometría de Absorción Atómica (Sensibilidad Al: 0,5 mg/l, Sensibilidad Si: 1 mg/l y Sensibilidad Fe: 0,05 mg/l)

Para la determinación de los aniones, la alcalinidad (TA y TAC) según método SM-2320 B/92, mediante valoración automática con ácido clorhídrico, hasta un pH de alrededor de 8,2 – 8,3, se valora TA y hasta pH 4,5 se valora TAC, con un electrodo combinado de pH (DM 111). Se utilizó un valorador automático Mettler DL25 Titrator. Estos parámetros se consideran generalmente como la concentración de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos, pero pueden incluir compuestos orgánicos, boratos, fosfatos, silicatos y otros componentes básicos. El N-NO<sub>3</sub>: con el método colorimétrico mediante reacción con la brucina en medio sulfúrico (Sensibilidad: 0.01 mg/l.). El SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> se determinó según método turbidimétrico, SM-4500-SO<sub>4</sub> E/92 (Sensibilidad: 1mg SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/l.). El Cl<sup>-</sup> se determinó según método SM-4500-Cl<sup>-</sup> D/92, mediante titulación potenciométrica con disolución de nitrato de plata y electrodo combinado de plata-cloruro de plata (DM 141), con un valorador automático Mettler DL25 Titrator. El fosfato (PO<sub>4</sub>) se determinó por colorimetría directa por el Método del ácido ascórbico, SM-4500-P E/92 (Sensibilidad 0.05 mg/l). y el Carbono Orgánico Disuelto (COD) se determinó por oxidación con Permanganato en medio ácido según el método de Bartlett and Ross (1988).

El método de análisis y la duración del lapso de tiempo entre la recogida y análisis de las muestras son probablemente fuentes de errores (Strigel *et al.* 1994). Para los fosfatos se ha observado que desaparecen tras el almacenamiento en botes de polietileno debido a la adsorción, pero parece ser más probable a que la causa sea la actividad biológica (Riley 1975). La baja temperatura y el corto tiempo de almacenamiento de las muestras minimizan tales efectos. Un comportamiento análogo ha sido descrito para los nitratos en muestras de precipitación guardadas a 4°C durante más de 5 meses antes del análisis, obteniendo unas diferencias estadísticas significativas (para p<5.05) con un incremento en la concentración entre las muestras preservadas y no preservadas (Butler y Likens, 1994).

### 7.2.3. ANÁLISIS DE LOS DATOS

Se calculó la concentración media ponderada por el volumen (*VWM*) de los iones analizados en la precipitación completa del siguiente modo:

$$VWMa = \frac{\sum_{i=1}^{na} Cai * Vi}{\sum_{i=1}^{na} Vi}$$

donde, *Cai* es la concentración del agua en la muestra *i*, *Vi* es el volumen de esa muestra *i*, y *na* es el número total de muestras tomadas para la precipitación completa, (Chorover *et al.*,1994).

Para calcular el exceso de los diferentes iones se puede utilizar bien el Cl<sup>-</sup> o bien el Na<sup>+</sup> como elemento trazador de la sal marina. Si se utiliza el Cl<sup>-</sup>, se multiplica la relación equivalente X/Cl<sup>-</sup> en el agua de mar (Dittmar, 1884), donde X es el ion examinado, por la concentración de Cl<sup>-</sup> en la muestra examinada de precipitación completa, y después se resta este número a la concentración de ese ión, X en la muestra de precipitación completa (Dewalle y Swistock, 1994; Appelo *et al.*, 1993).

$$\text{Exceso } X = X \text{ prec. completa} - Cl \text{ prec. completa} * (X/Cl) \text{ agua de mar}$$

Usando el Na<sup>+</sup> como elemento trazador de la sal marina el proceso es análogo, usando la relación equivalente X/Na<sup>+</sup> en el agua de mar. Esta diferencia indica bien una fuente continental del ion ("no marino" o exceso de elemento"), o una pérdida de Cl<sup>-</sup> o de Na<sup>+</sup>.

$$\text{Exceso } X = X \text{ prec. completa} - Na \text{ prec. completa} * (X/Na) \text{ agua de mar}$$

La pérdida o la adición de iones en el agua está también reflejada por un cambio en la relación de concentración respecto del agua de mar y se puede expresar mediante:

a) El Factor de enriquecimiento (*EFCl*) que es calculado de la manera propuesta por Ahmed *et al.* (1990):

$$EFCl = (X/Cl) \text{ precipitación completa} / (X/Cl) \text{ agua de mar}$$

b) Factor de fraccionamiento (*FNa*) que es calculado de la manera propuesta por Appelo (1993):

$$FNa = (X/Na) \text{ precipitación completa} / (X/Na) \text{ agua de mar}$$

Donde *X*, *Na* y *Cl* están comúnmente en mmol/l, mg/l u otra unidad de concentración.

De acuerdo con Sequeira y Kelkar (1978) conociendo la concentración de Na y la cantidad de lluvia, los valores de deposición de sal marina (*D*) son calculados de la manera convencional (kg ha<sup>-1</sup>) como:

$$D = [(Na] \times R) / 10] \times (100/30.5)$$

donde *[Na]* es la concentración media anual de sodio ponderada por el volumen (mg ml<sup>-1</sup>), *R* la cantidad de lluvia anual (cm) y 30,5, el porcentaje que representa el sodio en la sal marina.

## 7.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 7.3.1. LA COMPOSICIÓN QUÍMICA

Los resultados se resumen como la media de las concentraciones ponderadas por los volúmenes (V.W.M.) y la media aritmética de las concentraciones en la Tabla. 7-1.

Tabla. 7-1 pH, CE y concentración media de los elementos en la precipitación completa (media ponderada por el volumen, V.W.M., mg l<sup>-1</sup> y medias aritméticas mg l<sup>-1</sup>). Concentraciones sin los eventos tras el fuego y tras los episodios de calima.

	CE	pH	H	Ca	Mg	Na	K	CO <sub>3</sub> H	Cl	S-SO <sub>4</sub>	N-NO <sub>3</sub>	P-PO <sub>4</sub>	C
Media aritmética	117,3	6,0	1,1E-03	2,0	1,3	11,4	2,2	22,3	22,1	1,6	0,5	0,3	20,2
Desv. típica	132,5	0,5	7,1E-04	1,9	1,6	13,6	3,9	25,8	24,5	0,9	0,9	1,0	30,8
Sin fuego	112,3	6,0	1,1E-03	1,7	1,2	11,2	2,1	21,2	21,5	1,5	0,4	0,3	11,9
Sin calima	110,1	6,0	1,1E-03	1,8	1,2	11,1	2,1	18,3	21,2	1,6	0,6	0,2	19,3
Sin f. ni c.	104,0	5,9	1,1E-03	1,5	1,2	10,9	1,9	16,8	20,5	1,5	0,4	0,2	10,4
V.W.M.	78,44	5,9	1,2E-03	1,2	0,9	8,2	1,2	14,7	15,2	1,4	0,3	0,2	12,1

Comparando las concentraciones como V.W.M. y como medias aritméticas, encontramos

que las concentraciones ponderadas por los volúmenes son menores que las medias aritméticas de las concentraciones, este hecho está producido por el efecto de los grandes volúmenes de agua producidos en algunas semanas de lluvia, que disminuyeron la concentración de los elementos en esas semanas. Además se presentan las medias excluyendo las semanas posteriores a un incendio forestal, a los episodios de calima y a ambas, observándose un importante descenso de las concentraciones que será discutido posteriormente.

Destaca el descenso de la conductividad eléctrica (CE) al no incluir en la media aritmética los sucesos mencionados, así como el bajo valor de la media y la conductividad eléctrica ponderada por los volúmenes. Sin embargo el valor de conductividad eléctrica puede ser considerado como alto para ser un valor de precipitación completa, debido principalmente a factores tales como las turbulencias, los pocos días de lluvia y la deposición seca, mostrando una relación con las cantidades de precipitación que se observa en la Fig. 7-1, y que será analizado posteriormente.

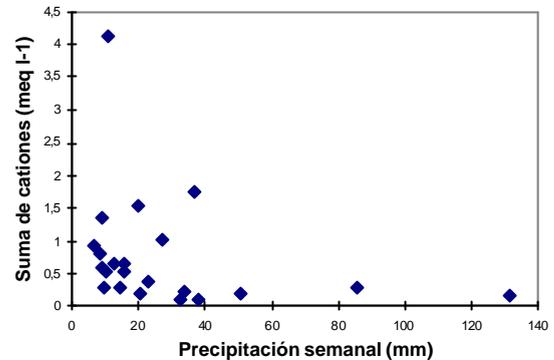


Fig. 7-1 Concentración de la suma de cationes frente a la precipitación.

Usando las concentraciones ponderadas por los volúmenes, los iones solubles variaron como se indica: Na>Ca>K>Mg>H, esta secuencia es diferente a la publicada por Kozlowski y Pallardy (1997) como usual en la precipitación completa: Na>Mg>Ca>H>NH<sub>4</sub>>K

La deposición de aniones solubles varió como se indica a continuación: Cl>HCO<sub>3</sub>>SO<sub>4</sub>>NO<sub>3</sub>>PO<sub>4</sub>, poseyendo esta secuencia el mismo orden de la publicada por Kozlowski y Pallardy (1997).

Los elementos Al, Si y Fe se encontraron fuera de los límites de detección (Al 0,5 mg l<sup>-1</sup>, Si 0,5 mg l<sup>-1</sup> y Fe 0,005 mg l<sup>-1</sup>). Estos resultados concuerdan con los de Caritat y Aamlid (1995) para el Al y los de Sequeira y Kelkar (1978) para el Si, debido según estos autores a la baja solubilidad del la sílice (SiO<sub>2</sub>) en el agua

La concentración del COD en la precipitación completa fue excepcionalmente alta, el V.W.M. fue 12,1 mg l<sup>-1</sup>, de acuerdo con otros autores que encontraron concentraciones que promediaron entorno a 1,5 mg l<sup>-1</sup> en una amplia gama de ecosistemas forestales (Hoffman *et al.*, 1980; McDowell y Likens, 1988; Moore, 1989), no obstante Liechty *et al.*, (1995) encontraron altos concentraciones de COD como V.W.M. en un bosque de Oceana (8,08 mg l<sup>-1</sup>) y un bosque de Alberta (5,88 mg l<sup>-1</sup>); estos valores sí son comparables con la media aritmética de las semanas posteriores al incendio: Como ya se mencionó, es posible que estas concentraciones se deban a elementos de origen "in situ" y se cree un error al considerarlos como aportes.

De acuerdo con Sequeira (1982), un pH de 5,6 podría servir como una referencia "conveniente" para la precipitación impoluta o pura. Para las áreas que reciben precipitación con nada más que agua con sales marinas disueltas (primariamente) se puede esperar que tengan un pH cercano a 5,6. El pH como V.W.M. del monte de Agua García fue de 5,9, la razón de este alto valor puede ser debida a que el área está afectada por el polvo de suelos áridos, y este proceso frecuentemente eleva el valor de pH por encima de 6 (Sequeira, 1982), como podremos ver después, y ha sido informado por Loye-Pilot *et al.* (1986); Loye-Pilot y Morelli, (1988) y Rodà *et al.* (1993), refiriéndose al polvo del Sahara.

A la hora de comparar, una importante diferencia se observa normalmente entre la composición de las muestras de agua de lluvia recogida por pluviómetros que solo se abren durante la lluvia, y por los embudos o pluviómetros de precipitación completa que están

permanentemente abiertos (Galloway y Likens, 1978). Las concentraciones de cationes de la precipitación completa son menores en lugares donde la precipitación es más abundante (Veneklass, 1990), por ello es conveniente el uso de las medias ponderadas por los volúmenes para la comparación de las concentraciones como se observa en la Tabla. 7-3. Hay que resaltar las altas concentraciones de sodio y cloruros debidas a una gran influencia de las sales marinas. Los valores de Calcio son equiparables a los del Levante español, no obstante, el alto valor del sodio y cloruros hace suponer que en un alto porcentaje se deba a fuentes marinas, a diferencia de los lugares del Levante, lo mismo ocurriría para el resto de los elementos, altos valores pero en gran parte debidos a la influencia del mar, a excepción del fosforo que alcanza un valor extremadamente alto debido a causas que se examinarán posteriormente.

Tabla. 7-3 Media de las concentraciones ponderadas por los volúmenes de los principales elementos de la precipitación completa ( $\text{mg l}^{-1}$ ), y precipitación (Prec.) en mm. Las V.W.M. han sido calculadas a través de los flujos anuales de elementos y la cantidad de precipitación. \*registrado como alcalinidad.

Autor	Lugar	Prec	H	Ca	Mg	Na	K	*HCO <sub>3</sub>	Cl	S-SO <sub>4</sub>	N-NO <sub>3</sub>	P-PO <sub>4</sub>
<b>Norte de España</b>												
Gras (1993)	Castrove. Galicia	3186		0,3	0,4	4,2	0,2					0,007
Gras (1993)	Arcos Condesa. Galicia	2168		0,2	0,5	4,2	0,2					0,007
<b>Este de España</b>												
Domingo <i>et al.</i> (1994)	Almería	651	0,00276	1,8	0,3	0,6	0,5	6,8	1,0	0,8	0,2	0,028
Rodá <i>et al.</i> (1993)	Montseny. Cataluña	884	0,01912	1,2	0,1	0,5	0,1	0,5(a)	1,1	1,6	0,3	
Rodá <i>et al.</i> (1993)	Prades. Cataluña	694	0,0062	1,5	0,1	0,8	0,2	2,7(a)	1,2	1,4	0,2	
<b>Europa centro-merid.</b>												
Atteia y Dambrine (1993)	Lutry. Suiza	1250		0,7	0,0	0,1	0,1	0,0	0,3	0,7	0,4	
<b>Canarias</b>												
Este trabajo	Agua García. Canarias	626	0,0012	1,2	0,9	8,2	1,2	14,6	15,1	1,4	0,3	0,227

### 7.3.1.1. LA CALIDAD DE PARÁMETROS

En este trabajo se consideran cationes inorgánicos:  $\text{H}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ , y como aniones,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  constituyendo casi toda la carga iónica en el agua de lluvia, excepto el  $\text{NH}_4^+$ , como fue enunciado por Sequeira y Lung (1995). Una vez realizado el análisis del agua, se debe comprobar la bondad del mismo, para ello han sido aplicados diversos parámetros de calidad, propuestos por Dewalle & Swistock (1994); Sequeira & Lung (1995) y Shibata *et al.* (1995):

Déficit del balance de carga:

$$CBD = S^- - S^+$$

La relación iónica (relación de la suma de aniones y cationes):

$$Ri = S^-/S^+$$

Balance iónico:

$$Bi = (S^- - S^+)/(S^- + S^+) * 100^{27}$$

Donde  $S^-$  y  $S^+$  son respectivamente, la suma de los aniones y de los cationes. La suma de los cationes principales, Ca, Na, Mg y K, denominada cationes combinados, puede ser una medida de la concentración de solutos (Crockford *et al.* 1996). En la Figura. 7-2 se muestra la esperada

<sup>27</sup> El error admisible depende de la concentración y del tipo de agua, pero a título indicativo puede establecerse (modificado de Anderson, 1966 citado por Custodio y Llamas, 1976):

Conductividad ( $\mu\text{S/cm}$ ):	50	200	500	2.000	>2.000
Error admisible (%):	30	10	8	6	4

relación hiperbólica descrita por Crockford *et al.* (1996) entre los cationes combinados y la cantidad de precipitación de cada suceso. Además de estos parámetros la relación entre la CE y la suma de aniones o cationes suministra una información suplementaria de la bondad del análisis.

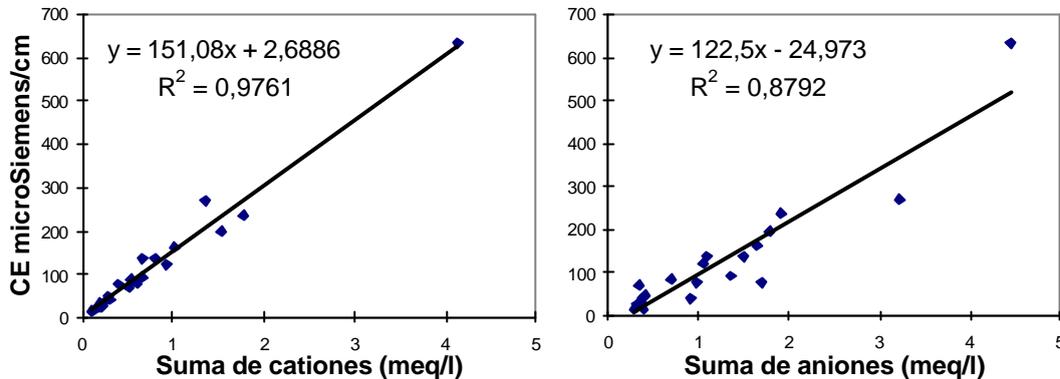


Fig. 7-2 Correlación entre la suma de los cationes y la conductividad eléctrica, y la correlación entre la suma de los aniones y la conductividad eléctrica.

Los diferentes parámetros de la Tabla 7-4 presentan un desequilibrio de cargas a favor de los aniones que puede atribuirse a:

- (a) La no inclusión del ion amonio, que puede ser importante según Crockford *et al.* (1996). Los incendios también contribuirían a aumentar la concentración de este ion.
- (b) La sobrevaloración del bicarbonato, considerando el nivel de carbono orgánico disuelto y partículas alcalinas en la precipitación completa.

Los coeficientes de correlación fueron altamente significativos ( $p < 0,001$ ). La pendiente de la recta de la regresión entre CE y  $S^+$  (Fig. 7-1) sugiere la no inclusión de un catión mayor, ya que el rango de la CE considerando la relación entre CE y  $S^+$  debería de encontrarse entre 100 y 140 (Appelo *et al.* 1993). En el caso de  $CE/S^-$ , se observa una mayor dispersión de los datos además de una constante negativa, los que estaría de acuerdo con la hipótesis (b), es decir, presencia del material particulado y sobreestimación del bicarbonato (valoración de especies no o poco conductoras). Por lo tanto, parece que los factores recogidos en ambas hipótesis han contribuido en los resultados reflejados en la Tabla 7-4.

Tabla 7-4. Parámetros de calidad de los análisis de la precipitación completa.

	$S^-$	$S^+$	CBD	Ri	$B_i$
Media aritmética	1,2	0,8	0,4	1,9	25,3
Desviación típica	1,0	0,9	0,4	0,9	19,5
Mediana	0,9	0,5	0,2	1,7	25,1
Máximo	4,4	4,1	1,9	4,4	63,2
Mínimo	0,3	0,1	-0,2	0,6	-21,6
Media ponderada por V.	0,8	0,5	0,3	1,5	21,5

### 7.3.1.2. EXCESO DE ELEMENTOS

Para la interpretación de estos análisis de la precipitación completa y para discernir cuáles han sido las fuentes suplementarias, partiendo inicialmente de una composición típica de agua no contaminada (agua de lluvia neutra con bajas concentraciones de sulfatos y nitratos), podemos establecer una comparación de las relaciones iónicas presentes en el agua de mar para obtener información sobre la contribución relativa de las sales marinas (Ericksson, 1960), la comparación con este valor del valor de la precipitación completa puede apuntar a un origen marino o terrestre de estos iones.

El cloruro como trazador es apropiado ya que es un componente conservativo con pequeño fraccionamiento (Dewalle y Swistock, 1994). Sin embargo, se puede considerar que las actividades industriales pueden ser una fuente de contaminación de cloruros, pudiéndose esperar un pequeño enriquecimiento de HCl en la precipitación (Steinhardt y Fassbender 1979). Para el año de estudio hidrológico la media de los excesos (equivalentes) entre los principales elementos y el cloro se muestran en la Tabla. 7-5; podemos observar un déficit de sodio y el magnesio, y un exceso de calcio, potasio, bicarbonatos, sulfatos, nitratos y fosfatos. El valor del déficit de sodio representa como valor medio  $-7,4\%$  en la precipitación completa, este valor está totalmente en consonancia con al valor de la relación en la sal marina, siendo este hecho perfectamente explicable por la continua influencia del viento Alisio sobre el norte de Tenerife a la cota donde se halla enclavada la parcela de estudio. La interrupción por la lluvia de la reducción de partículas de cloro y el HCl evaporado contribuye a la química total del agua, el efecto neto es que las relaciones Na/Cl permanezcan similares a las del agua marina en las áreas costeras de diferentes lugares (Appelo *et al.* 1993). El valor del déficit de magnesio representado como media fue  $-19,8\%$  en la precipitación completa. Los valores del exceso de calcio y de potasio representan como valores medios  $75,9\%$  y  $79,9\%$ , respectivamente, en la precipitación completa, esto significa gran influencia del polvo terrestre en la precipitación completa. El exceso de sulfatos tomo valores que representados como la media fueron del  $35,0\%$  de  $SO_4$  en la precipitación completa. Y finalmente los valores del exceso de nitratos y de fosfatos representaron como valores medios  $99,9$  y  $100,0\%$  de  $NO_3$  y  $PO_4$ , respectivamente en la precipitación completa.

Tabla. 7-5 Medias (meq l<sup>-1</sup>) y desviaciones típicas del exceso de elementos utilizando el Cl<sup>-</sup> como trazador, y el porcentaje del exceso sobre la cantidad total del elemento en la precipitación completa (BP).

	Ca	Mg	Na	K	CO <sub>3</sub> H	SO <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub>	PO <sub>4</sub>
Media	0,08	-0,02	-0,04	0,05	0,36	0,03	0,04	0,03
Desviación típica	0,08	0,03	0,12	0,09	0,42	0,05	0,06	0,09
% sobre BP	75,9	-19,8	-7,4	79,9	99,3	35,0	99,9	100,0

Utilizando el sodio como trazador se obtienen los resultados de la Tabla. 7-5. Este elemento podrá utilizarse posteriormente para comparar las relaciones iónicas de la precipitación completa con las de la precipitación penetrante y del escurrido cortical, ya que el sodio es el elemento más inerte respecto a su comportamiento a través de la cubierta (Ferm y Hultberg 1995). No obstante el uso de sodio como trazador ha de ser considerado con cuidado, ya, es posible encontrar contaminaciones de sodio debidas probablemente a partículas de polvo del suelo de los continentes en climas áridos (como polvo eólico de origen sahariano transportado por el Siroco a través del mar) (Fowler, 1980; Nativ e Issar , 1983; Sequeira,1991).

Tabla. 7-6 Medias (meq l<sup>-1</sup>) y desviaciones típicas del exceso de elementos utilizando el Na<sup>+</sup> como trazador, y el porcentaje del exceso sobre la cantidad total del elemento en la precipitación completa (BP).

	Ca	Mg	K	CO <sub>3</sub> H	Cl	SO <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub>	PO <sub>4</sub>
Media	0,08	-0,01	0,05	0,36	0,04	0,04	0,04	0,03
Desviación típica	0,08	0,02	0,09	0,42	0,14	0,05	0,06	0,09
% sobre BP	77,5	-11,5	81,4	99,3	6,9	39,5	99,9	100,0

Podemos observar que los excesos de elementos en la precipitación completa como valores medios son muy similares utilizando como trazadores tanto el Cl como el Na, pudiendo únicamente reseñar el incremento de Ca, K y SO<sub>4</sub>, y la disminución del déficit de Mg. Estos resultados se encuentran en consonancia con los registrados por Ferm y Hultberg (1995), que al utilizar el Na como trazador y comparando con la relación iónica existente en el agua de mar, obtuvieron otras fuentes atmosféricas para el Ca y el K pero no para el Mg. Se ha llegado a

obtener un exceso de Ca de 400-1000% con base en las concentraciones de sodio (Sequeira y Kelkar 1978).

En la Tabla 7-7 se muestran los factores de enriquecimiento, relativizados con respecto al Cl; se puede observar que tanto para el sodio como para el magnesio los valores están cercanos a la unidad, lo que significa una media para el año, de las relaciones iónicas de la precipitación completa, cercanas a las del agua marina, la precipitación completa respecto a estos elementos era agua de mar diluida, ya que fueron las mismas relaciones que las relaciones del agua marina, además se puede apuntar que la cantidad de sal (ClNa) que llegó a la parcela durante el año de medición fue de 167 kg ha<sup>-1</sup>. Para el Ca, K y SO<sub>4</sub> encontramos un incremento moderado con unas relaciones de 5,6, 4,3 y 3,1 respectivamente, y para el NO<sub>3</sub> y PO<sub>4</sub> un gran incremento de la cantidad de estos elementos. Es posible reseñar que en los casos de los NO<sub>3</sub> y PO<sub>4</sub> la desviación típica fue la mayor, debido a que hubo semanas sin que existiese la presencia de los mismos. La importante presencia de estos componentes puede hacernos llevar a concluir que la precipitación completa no es de origen de pura agua marina, sino que va diluida con polvo terrestre.

Tabla. 7-7 Factores de enriquecimiento medio (referido a los cloruros) y desviaciones típicas de los principales elementos de la precipitación completa

	Ca	Mg	Na	K	CO <sub>3</sub> H	SO <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub>	PO <sub>4</sub>
Media	5,6	0,8	1,0	4,3	193,2	3,1	1.253,5	2.994,1
Desviación típica	3,6	0,3	0,4	3,6	185,6	2,5	2.952,2	8.663,9

Los factores de fraccionamiento relativizados respecto el Na<sup>+</sup> (FNa) se muestran en la Tabla. 7-8; éstos valores son usualmente mayores a los obtenidos como factores de enriquecimiento. Comparando estos datos con los de Duce y Hoffman (1976), para el agua de lluvia (Mg: max. 1,07-min. 0,98; Ca: max. 1,22-min. 0,97; K: max 1,05-min 0,97; Cl: max.10-min. 0,93; SO<sub>4</sub>: max. ?-min. 1; N org max. 1,106, min. 2,104), nos encontramos fuera de todos los rangos en el caso de los cationes, posiblemente debido a la adición de la deposición seca en la precipitación completa.

Tabla. 7-8 Factores de fraccionamiento medio (referido al sodio) y desviaciones típicas de los principales elementos de la precipitación completa

	Ca	Mg	K	CO <sub>3</sub> H	Cl	SO <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub>	PO <sub>4</sub>
Media	6,4	0,8	4,8	226,7	1,2	3,4	2.247,8	3.254,7
Desviación típica	4,8	0,3	4,2	252,2	0,5	3,0	6.427,8	8.854,0

### 7.3.1.2.1. CAUSAS DEL EXCESO DE ELEMENTOS

Para comprender el origen de otras fuentes además del agua marina en la precipitación completa, se calcularon correlaciones lineales para los excesos de elementos, el pH y la alcalinidad, tomándolos como pares de elementos; se prestó atención especialmente a los siguientes pares: pH y SO<sub>4</sub> (total y el no marino) y a la alcalinidad y el Ca, de acuerdo con Sequeira (1982).

Para interpretar estos excesos de elementos y estos análisis de correlación, se desarrollaron modelos lineales múltiples mediante el análisis de regresión con el fin de examinar los efectos de algunos factores meteorológicos sobre el exceso de elementos en la precipitación completa. Para ésto se realizaron regresiones simples entre los factores meteorológicos y los excesos y entre los factores meteorológicos entre sí (para evitar colinealidad), introduciendo en el modelo múltiple las variables con una significación mayor a  $p \leq 0,05$ . Los modelos presentan un valor predictivo y un valor a la hora de explicar en términos de los parámetros meteorológicos las causas del gran rango de excesos de elementos encontrados para similares cantidades de

precipitación, como se puede observar en la Figura. 7-3.

Las causas de la existencia de este amplio rango de las concentraciones de la precipitación completa para una misma cantidad e precipitación fueron descritas por Crockford *et al.* (1996), que resumidas aquí para la precipitación completa son las siguientes:

- 1.- Aportes de deposición seca, la acumulación de elementos desde el evento de lluvia previo a la medición.
- 2.- La intensidad de la lluvia.
- 3.- La velocidad del viento antes y durante el evento de lluvia.
- 4.- La dirección del viento antes y durante el evento de lluvia.
- 5.- La dirección de la cual provienen los frentes de nubes, la altura de las nubes y los procesos de formación de la lluvia (Houze y Hobbs, 1982).
- 6.- La estación.
- 7.- El tamaño de la gota.

Hemos tratado de introducir estas variables en el análisis del siguiente modo:

- 1.- Número de días sin llover antes de la semana de recogida de la lluvia.
- 2.- Cantidades de lluvia, número de días lloviendo, y la duración y la intensidad de la precipitación.
- 3.- La velocidad del viento antes y durante la semana de la lluvia y durante la lluvia.
- 4.- La dirección del viento antes y durante la semana de la lluvia, en cuatro cuadrantes: 0°-90° N, 90°-180° N, 180°-270° N, 270°-360° N y periodos de calma.
- 6.- La estación como valores medios, medias de las máximas y de las mínimas, máximos y mínimos absolutos de la temperatura del aire, de la humedad, de la radiación y de la visibilidad, siendo para todas las variables los valores de antes y durante la semana de la lluvia y durante la lluvia.

Los puntos 5 y 7 no han sido analizados, pero es posible que el punto 5 este reflejado en otras variables incluidas en el punto número 6, porque en las Islas Canarias no existe un claro patrón de estacionalidad a lo largo de todo el año. Los resultados se muestran en la Tabla. 7-9.

Tabla. 7-9 Estadísticas de los modelos lineales múltiples mediante el análisis de regresión para los efectos de algunos factores meteorológicos sobre el exceso de elementos en la precipitación completa. V= viento; H= humedad; Vis= visibilidad horizontal; R= radiación; Vel= velocidad; D= dirección; Max= máximo; Min= mínimo; M= media; A= absoluta; Ds= durante la semana; Sa= semanas anteriores

Elemento	Variable	R <sup>2</sup>	SE	Constante	Coefficientes	Coefic. Típicos	Signif F
<b>Ca</b>	D V 90-180° Sa	0,9078	0,02590	0,984898	0,001575	0,930723	0,0001
	Max M H Sa				-0,009557	-0,424122	
<b>Mg</b>	Max.M Vel V Ds	0,5470	0,02969	-0,158853	0,074587	0,739595	0,0039
<b>K</b>	Max M H Sa	0,9946	0,01069	-0,491078	-0,003728	-0,192232	0,0000
	Min A Vis Sa				0,001807	0,181756	
	DV 90-180° Sa				0,001452	0,571752	
	Min M Vis Sa				0,110295	1,875020	
<b>SO<sub>4</sub></b>	M R Sa	0,9706	0,01183	0,026094	-0,003014	-0,291856	0,0000
	Min A H Ds				-0,012587	-0,687014	
	DV 90-180° Ds				-0,002293	-0,533097	
	DV calma Ds				0,006014	0,914440	
<b>NO<sub>3</sub></b>	M H Ds	0,9381	0,01965	0,339018	-0,004716	-0,604539	0,0000
	Min M Vis Ds				0,043344	1,195292	

Encontramos que el PO<sub>4</sub> y el pH, el Mg y el Na y el NO<sub>3</sub> y el K estaban correlacionados con una significación para una p= 0,001; mientras que el Ca y los HCO<sub>3</sub> y el Ca y los NO<sub>3</sub> estaban correlacionados para una p=0,01; y que por último el Ca y el Mg, el Ca y el K, el K y los HCO<sub>3</sub>, el K y el pH y los SO<sub>4</sub> y el pH estaban correlacionados para una p=0,05.

- **7.3.1.2.1.1. Calcio.**

Se encontró un gran exceso de Ca, el polvo continental es el responsable de los excesos de Ca (Sequeira y Kelkar, 1978; Fowler, 1980; Veneklass, 1990; Crockford *et al.*, 1996).

El polvo calcáreo de origen eólico proveniente de los desiertos del Sahara transportado por el viento Siroco sobre el mar, supone un largo rango de transporte para el Ca (Sequeira 1980, 1991; Loye-Pilot *et al.*, 1986 Loye-Pilot y Morelli, 1988 y Rodà *et al.*, 1993). Pasaremos a discutir cual es la forma química en que se presenta el exceso de Ca: Sequeira (1982) afirmó que la composición química del Ca de origen árido es generalmente  $\text{CaCO}_3$  con un pequeño porcentaje de  $\text{CaSO}_4$ , aunque este compuesto pueda predominar en el caso de suelos yesíferos (Petrov, 1976). La falta de proporción entre el Mg y el alto contenido de exceso de Ca descarta como posibilidad en la composición la presencia de  $\text{CaCO}_3, \text{MgCO}_3$  (dolomita) de acuerdo con Sequeira y Kelkar (1978), y la ausencia de proporción entre el exceso de  $\text{SO}_4$  y el exceso de Ca también descarta de la composición la presencia de  $\text{CaSO}_4$ . Así como basándonos en la composición de los desiertos saharianos, ricos en calcita, y la correlación existente entre la alcalinidad y el exceso de Ca, la forma más probable de composición química será el  $\text{CaCO}_3$ .

También son posibles otras fuentes de exceso de Ca, Sequeira y Peart (1995) encontraron que los altos pH y concentraciones totales de Ca en la lluvia se relacionaban cuando existía utilización del suelo, estando la parcela cerca de actividades agrícolas en áreas con poca cubierta vegetal. El uso local de fertilizantes con contenido de Ca (NPCa) puede contribuir a los excesos de Ca, y es posible que la correlación existente entre el  $\text{NO}_3$  y el Ca tenga la explicación en el uso de estos fertilizantes.

Las variables que fueron incluidas en el modelo de regresión lineal fueron la dirección del viento entre  $90^\circ$ - $180^\circ$  N en el periodo anterior a la semana de la recogida de la lluvia y la media de las máximas de las humedades en el periodo anterior a la semana de la recogida de la lluvia, este modelo lineal absorbió el 91% de la variabilidad ( $R^2 = 0,91$ ). Los coeficientes típicos explican el peso de cada variable en el modelo, siendo la dirección del viento entre  $90^\circ$ - $180^\circ$  N en el periodo anterior a la semana de la recogida de la lluvia la que recogió 1,75 veces más variación que la media de las máximas de las humedades en el periodo anterior a la semana de la recogida de la lluvia. La explicación de este modelo lineal vendría dada de una fácil manera, ya que la dirección del desierto del Sahara respecto del bosque de Agua García es de la obtenida en el modelo, y gran incendio forestal ocurrió durante el año de medida en la misma dirección, además cuando el aire proviene de África la humedad es muy baja, y en el modelo la humedad mantiene una relación inversa respecto al exceso de calcio. Si el origen del exceso de calcio fueran fertilizantes químicos sería de nuevo lógica esta relación inversa con la humedad, ya que cuando las tierras agrícolas no están húmedas la cantidad de polvo es mayor y las posibilidades de que el viento se lleve ese polvo son también mayores; además en los suelos de cultivo de la zona que son andosoles, cuando pierden humedad, al secarse sufren una importante erosión eólica, denominándose popularmente al suelo como "polvillo".

- **7.3.1.2.1.2. Potasio**

Encontramos igualmente un alto exceso de potasio, y también el polvo de origen continental es el responsable de esta alta cantidad de potasio (Fowler, 1980; Veneklass, 1990), ya que la precipitación de lugares cercanos a la costa muestra bajos residuos de potasio (Appelo *et al.*, 1993 y Sequeira y Kelkar, 1978).

La proporción de potasio en relación con el alto contenido de calcio, a la alcalinidad y a los altos pH, hacen que se pueda atribuir la misma fuente tanto para el potasio como para el calcio, polvo calcáreo de origen eólico proveniente de los desiertos del Sahara, que pueden ser relativamente ricos en ilita (datos del Departamento de Edafología y Geología de la Universidad de

La Laguna).

Otra fuente posible es el uso local de fertilizantes con contenido de K en la agricultura y el uso extendido de la madera como combustible de uso doméstico pueden contribuir al exceso de potasio (Sequeira y Kelkar 1978), esto podría explicar la relación entre el exceso de nitratos y el exceso de potasio.

Las variables que fueron incluidas en el modelo de regresión lineal fueron la dirección del viento entre 90°-180° N en el periodo anterior a la semana de la recogida de la lluvia, la media de las máximas de las humedades en el periodo anterior a la semana de la recogida de la lluvia, la media de las mínimas visibilidades y la mínima absoluta de visibilidad en el periodo anterior a la semana de la recogida de la lluvia, este modelo lineal absorbió el 99% de la variabilidad ( $r^2 = 0,99$ ). Los coeficientes típicos explican el peso de cada variable en el modelo, y fueron, la media de las mínimas visibilidades en el periodo anterior a la semana de la recogida de la lluvia absorbió 3,28 veces más variabilidad que la dirección del viento entre 90°-180° N en el periodo anterior a la semana de la recogida de la lluvia, 9,84 veces más variabilidad que la media de las máximas de las humedades en el periodo anterior a la semana de la recogida de la lluvia y 10,3 veces más variabilidad que la mínima absoluta de visibilidad en el periodo anterior a la semana de la recogida de la lluvia. La explicación de este modelo lineal podría ser muy similar a la explicada anteriormente, y en total consonancia con el modelo desarrollado anteriormente, de nuevo los desiertos del Sahara están en la misma dirección respecto al bosque de Agua García, y el gran incendio forestal durante el año de medida fue en la misma dirección, además de nuevo cuando el aire viene del norte de África la humedad es muy baja, siendo también aquí la variable humedad inversamente proporcional al exceso de potasio, como lo fue inversamente proporcional en el caso del exceso de Ca, finalmente cabe destacar que cuando las Islas Canarias reciben una invasión de una masa de aire sahariana, debido al polvo la visibilidad tiene un gran descenso, ya que las capas bajas de la atmósfera se llenan de este polvo. Y como último elemento si el origen del exceso de potasio es un fertilizante, es lógico la relación inversa con la humedad, ya que cuando el suelo de los cultivos agrícolas no está húmedo la cantidad de polvo aumenta, y como se dijo anteriormente la probabilidad de que el viento se lleve este polvo aumenta igualmente.

- **7.3.1.2.1.3. Magnesio**

No se detectó exceso de magnesio, probablemente este elemento no tenga un origen local terrestre, ya que la precipitación cerca de lugares costeros muestra bajos residuos de Mg, lo que demuestra que el contenido de ese ion en el agua de lluvia es básicamente de origen marino (Appelo *et al.*, 1993 y Sequeira y Kelkar, 1978). Este hecho, el origen marino o terrestre puede explicar la relación negativa entre los excesos de magnesio y de calcio, porque como dijimos anteriormente, el exceso de este último elemento tiene un origen terrestre, y como ha sido confirmado por la alta correlación entre los excesos de magnesio y de sodio, ambos elementos tienen un origen marino.

Solamente una de todas las variables que se utilizaron para el modelo de regresión lineal fue significativa para una  $p=0,05$ , fue la media de las máximas de las velocidades del viento durante la semana de la recogida de la lluvia y sólo absorbió el 55% de la variabilidad ( $R^2 = 0,55$ ). La explicación de este modelo no es muy clara, es posible que la razón se trate de la alta velocidad de los vientos de origen marino que azotan la parcela, estos vientos corresponden a los Alisios que llegan desde el NE, pero la dirección del viento no se incluyó en el modelo lineal de forma que no sea sencillo llegar a las conclusiones.

- **7.3.1.2.1.4. Sulfatos**

También encontramos un exceso de sulfatos. Así mismo se observó una correlación negativa entre los excesos de sulfato y el pH, lo cual nos permite considerar la posibilidad de una

fuente antropogénica de acidificación de exceso de sulfato, aunque según Sequeira (1982) este tipo de manifestaciones en algunas zonas se detectan mejor por un descenso de la alcalinidad que por un descenso del pH pero no ha sido en nuestro caso (ya que el pH puede no variar debido a una significativa acción tamponadora de posibles altas concentraciones al mismo tiempo, de  $\text{HCO}_3^-/\text{CO}_2^{2-}$  en estas soluciones acuosas).

El exceso de sulfatos referido parece que no tiene conexión con los sulfatos de origen edáfico (Sequeira y Kelkar 1978), este hecho está en consonancia con la ausencia de correlación entre los excesos de sulfatos y de calcio, dejando fuera de lugar una posible composición de  $\text{CaSO}_4$  como se indicó anteriormente. Si hubiera habido correlación entre los sulfatos y la alcalinidad, los elementos de origen terrestre se podrían haber explicado por la acidez que puede lavar parte de los compuestos minerales de origen edáfico que son normalmente insolubles y otorgarles mayor solubilidad en la precipitación como ha sido propuesto por Sequeira (1982).

El exceso de sulfatos encontrados en el agua de lluvia tiene un origen en la liberación de formas gaseosas como el  $\text{H}_2\text{S}$  natural y de  $\text{SO}_2$  proveniente de humos de la industria y el tráfico, por ejemplo, que son oxidados en la atmósfera, produciendo ácido sulfúrico  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . El origen industrial de aerosoles primarios de  $\text{SO}_4$  debe ser menos importante ya que este aerosol constituye un pequeño porcentaje de las emisiones totales de azufre a la atmósfera por parte de las industrias (Sequeira y Kelkar 1978).

La presencia de excesos de sulfatos en la precipitación completa está de acuerdo con el conspicuo enriquecimiento de  $\text{SO}_4^{2-}$  que ocurre en las islas Canarias por la obtención de energía eléctrica a través de la combustión de combustibles fósiles y de la combustión de los mismos por los automóviles. Otra fuente de sulfatos puede ser la influencia de una industria petroquímica cercana a la parcela ( $\approx 20$  km); éste tipo de fuente ha sido sugerido por Steinhardt y Fassbender (1979).

El  $\text{CaCO}_3$  emitido a la atmósfera puede neutralizar el  $\text{H}_2\text{SO}_4$  siendo las partes no neutralizadas de ácido nítrico y sulfúrico las que se presentarían como protones libres, determinando el pH del agua de lluvia (Fowler, 1980), esto puede explicar el alto pH que se registro usualmente durante todo el año, ya que los excesos de Ca fueron mayores que los excesos de  $\text{SO}_4$ . Como otros sitios del este de España los aportes de alcalinidad en las lluvias con partículas del desierto del Sahara son suficientes para neutralizar el aporte de ácidos libres en la lluvia ácida Rodà *et al.* (1993), en estos lugares el transporte de polvo desde el Sahara es de este modo uno de los mayores factores ecológicos en los ecosistemas mediterráneos a través de este efecto de capacidad neutralizadora de la atmósfera y de la deposición atmosférica de elementos.

Las variables que fueron incluidas en el modelo de regresión lineal fueron la dirección del viento entre  $90^\circ$ - $180^\circ$  N durante la semana de la recogida de la lluvia, los periodos de calma durante la semana de la recogida de la lluvia, la humedad mínima absoluta durante la semana de la recogida de la lluvia y la radiación media en el periodo anterior a la semana de la recogida de la lluvia este modelo lineal absorbió el 97% de la variabilidad ( $R^2 = 0,97$ ). Los coeficientes típicos fueron: los periodos de calma durante la semana de la recogida de la lluvia absorbió 1,31 veces más variabilidad que la humedad mínima absoluta durante la semana de la recogida de la lluvia, 1,71 la dirección del viento entre  $90^\circ$ - $180^\circ$  N durante la semana de la recogida de la lluvia y 3,13 veces más variabilidad que la radiación media en el periodo anterior a la semana de la recogida de la lluvia. La explicación de este modelo es compleja, probablemente sea debido a ciertas condiciones atmosféricas, con los periodos de calma y direcciones del viento no provenientes del SE, lo que permita la deposición de partículas y aerosoles que viene acompañados de una alta humedad relativa en el aire, ya que el mínimo absoluto de humedad durante la semana de recogida de la lluvia estuvo inversamente relacionada con el exceso de sulfatos; de nuevo la posibilidad de que los aerosoles presentes en las islas con grandes concentraciones de sulfatos debido a los aportes marinos y de origen volcánico, sean el origen de los sulfatos detectados.

- **7.3.1.2.1.5. Nitratos**

Usualmente los NO<sub>3</sub> son NO<sub>x</sub> originados principalmente por las industria y los humos del tráfico, que son oxidados en la atmósfera, produciendo ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>). Crockford *et al.* (1996) propusieron otras razones para las tendencias en el flujo de NO<sub>3</sub> que puede verse afectado en la precipitación completa como los incendios y la oxidación del NH<sub>4</sub>. Otras fuentes posibles son el uso de fertilizantes.

Análogamente a los sulfatos, el CaCO<sub>3</sub> existente en la atmósfera puede también neutralizar parte de este ácido nítrico presente como protones libres, determinando así el pH del agua de lluvia (Fowler, 1980), de nuevo esto puede explicar los altos valores de pH encontrados en el monte de Agua García.

Las variables que fueron incluidas en el modelo de regresión lineal fueron: la humedad media durante la semana de la recogida de la lluvia y la media de las mínimas de las visibilidades durante la semana de la recogida de la lluvia este modelo lineal absorbió el 94% de la variabilidad ( $R^2 = 0,94$ ). Los coeficientes típicos explican el peso de cada variable en el modelo, así, la media de las mínimas de las visibilidades durante la semana de la recogida de la lluvia absorbió 2 veces más variabilidad que la humedad media durante la semana de la recogida de la lluvia. La explicación de este modelo lineal es complicada, es posible que la fuente sean fertilizantes y con las condiciones atmosféricas que permitan un incremento del polvo del suelo en suspensión haciendo mayor la cantidad de exceso de nitratos. También es posible que estas condiciones se correspondan con las acontecidas durante el incendio en un bosque cercano a la parcela.

- **7.3.1.2.1.6. Fosfatos**

Se encontró una gran correlación entre los excesos de fosfatos y el pH, no fue posible hacer una regresión multifactorial debido al pequeño número de semanas en las que se detecto la presencia de fosfatos en el agua de lluvia. Pero podemos pensar que la existencia de fosfato está debida al incremento de pH proveniente del polvo de origen sahariano, siendo posible que la composición de este fosfato sea apatito (otra posible fuente de Ca) asociado posiblemente con los carbonatos. No obstante conviene recordar que con el paso de filtración de las muestras, parte del fosfato particulado no se valora. Según comunicación de M.A. Negrín (Departamento de Edafología y Geología de la Universidad de La Laguna), la reactividad del fosfato particulado se ha puesto de manifiesto por extracción con bicarbonato (extracción "Olsen").

### 7.3.1.2.2. FLUCTUACIONES TEMPORALES DEL pH Y DE LA CONCENTRACIÓN DE IONES. EL INCENDIO Y LA CALIMA.

Las fluctuaciones temporales de pH y de concentración de los distintos iones se pueden apreciar en las Figuras. 7-3 y 7-4.

Existieron dos importantes eventos que cambiaron la concentración de la precipitación completa. El primero de ellos fueron los periodos de invasiones de masas de aire con origen sahariano, cargada de polvo, denominadas "calima" que utilizando como fuente el I.N.M. (Instituto Nacional de Meteorología) fueron durante ese año de 1995: del 24 al 28 de marzo, del 4 al 5 abril (ambos eventos recogidos en el día 95, calendario juliano, de ese año) y el 1 de octubre (recogido el día 284). El segundo de los importantes eventos fue un gran incendio en un bosque adyacente de pinos (*Pinus radiata* y *Pinus canarinesis*), durante los días 20 al 28 de julio (recogidos en los días 235 y 263 de ese año) que contribuyo con una gran cantidad de cenizas, que fueron lavadas durante las dos primeras semanas con lluvia tras el incendio. La concentración de los elementos y los pH correspondientes a estos periodos se muestran en la Tabla 7-10.

La calima definida por el I.N.M. como " la suspensión en la atmósfera de partículas secas extremadamente pequeñas, invisibles al ojo humano, pero lo suficientemente numerosas para darle al cielo una apariencia opalescente". El término calima se usa cuando la visibilidad es reducida y la humedad relativa menor al 70%, estos datos se suministran por el I.N.M. La calima se traducirá de forma cuantitativa en una reducción de la distancia de visibilidad que se relacionará con la dirección de los vientos y la humedad relativa especificando las condiciones buscadas.

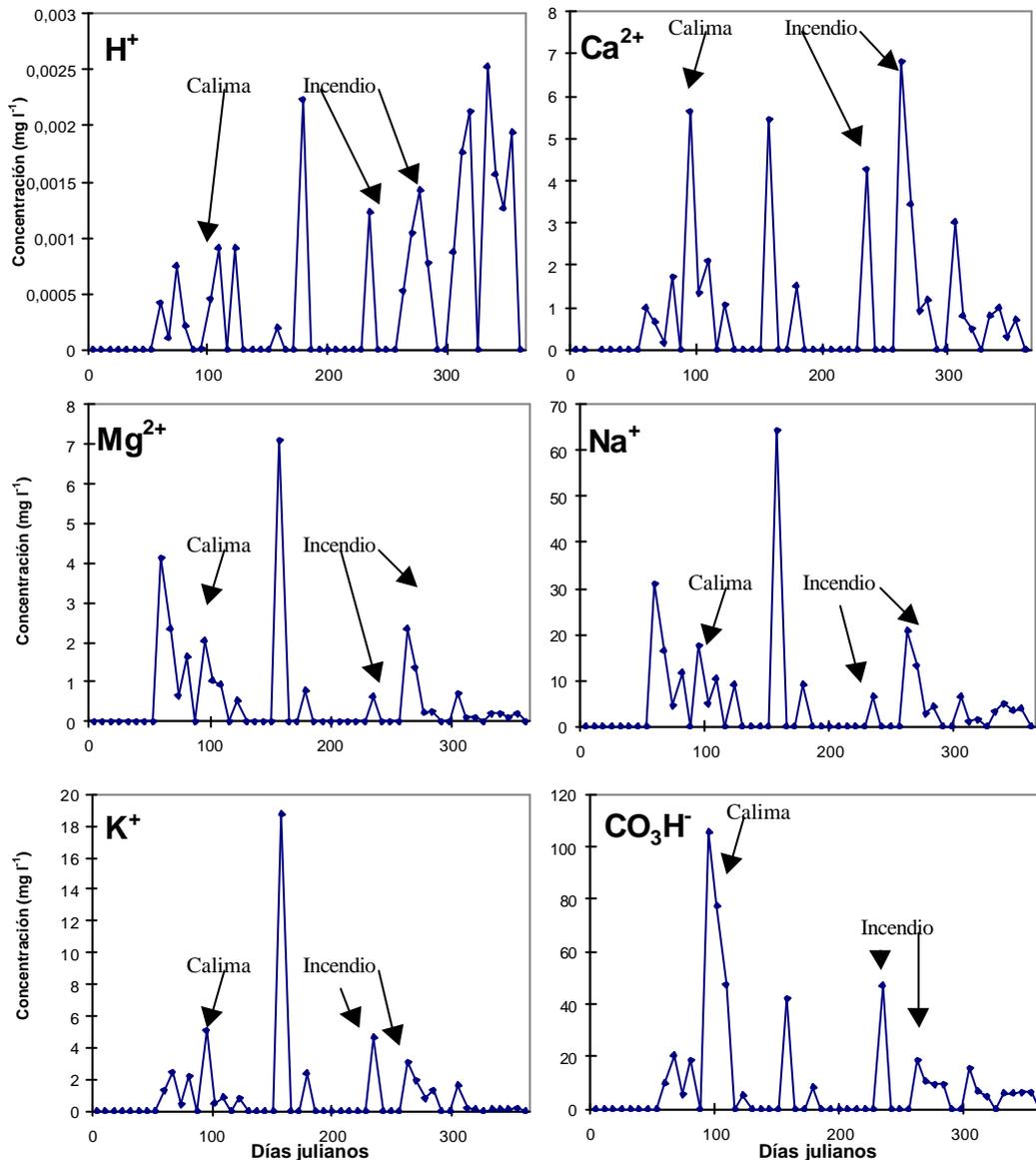


Fig. 7-3 Fluctuaciones temporales de pH y de concentración de los distintos iones

Tabla. 7-10 Concentración media de los elementos en la precipitación completa ( mg l<sup>-1</sup>, medias aritméticas) y concentración media de las semanas tras el incendio y en las que ocurrieron invasiones calima, en la precipitación completa.

	CE	pH	H	Ca	Mg	Na	K	CO <sub>3</sub> H	Cl	S-SO <sub>4</sub>	N-NO <sub>3</sub>	P-PO <sub>4</sub>	C
Media aritmética	117,3	6,0	1,1E-03	2,0	1,3	11,4	2,2	22,3	22,1	1,6	0,5	0,3	20,2
semanas incendio	168,0	6,1	8,7E-04	5,6	1,5	13,7	3,9	32,9	28,0	2,3	2,0	0,2	103,5
semanas calima	269,0	8,0	1,0E-05	5,7	2,0	17,6	5,1	105,6	40,4	2,2	0,0	2,3	40,3

Datos similares de la relación del polvo del Sahara y el pH cercano a 8 han sido

registrados por Rodà *et al.*, (1993).

Está claro el similar patrón existente para el Na, Mg y Cl, y las diferencias de concentración a lo largo del año, en ausencia de un patrón estacional, pueden ser atribuidas a que durante los periodos secos, las concentraciones en la precipitación completa son usualmente mayores (este principio es aplicable a todos los elementos).

A cerca del gran pico de Ca este corresponde a la semana posterior al incendio, hay también dos picos correspondientes a las semanas de calima y un último pico correspondiente a una semana con altos valores de Na y Cl, que no se corresponde con un exceso de Ca. Algo similar ocurre con el potasio, pero en este caso el gran pico se corresponde con los picos de elementos de origen marino, correspondiente a una semana en la que se recogió una gran cantidad de agua. Respecto a los bicarbonatos el patrón es muy similar.

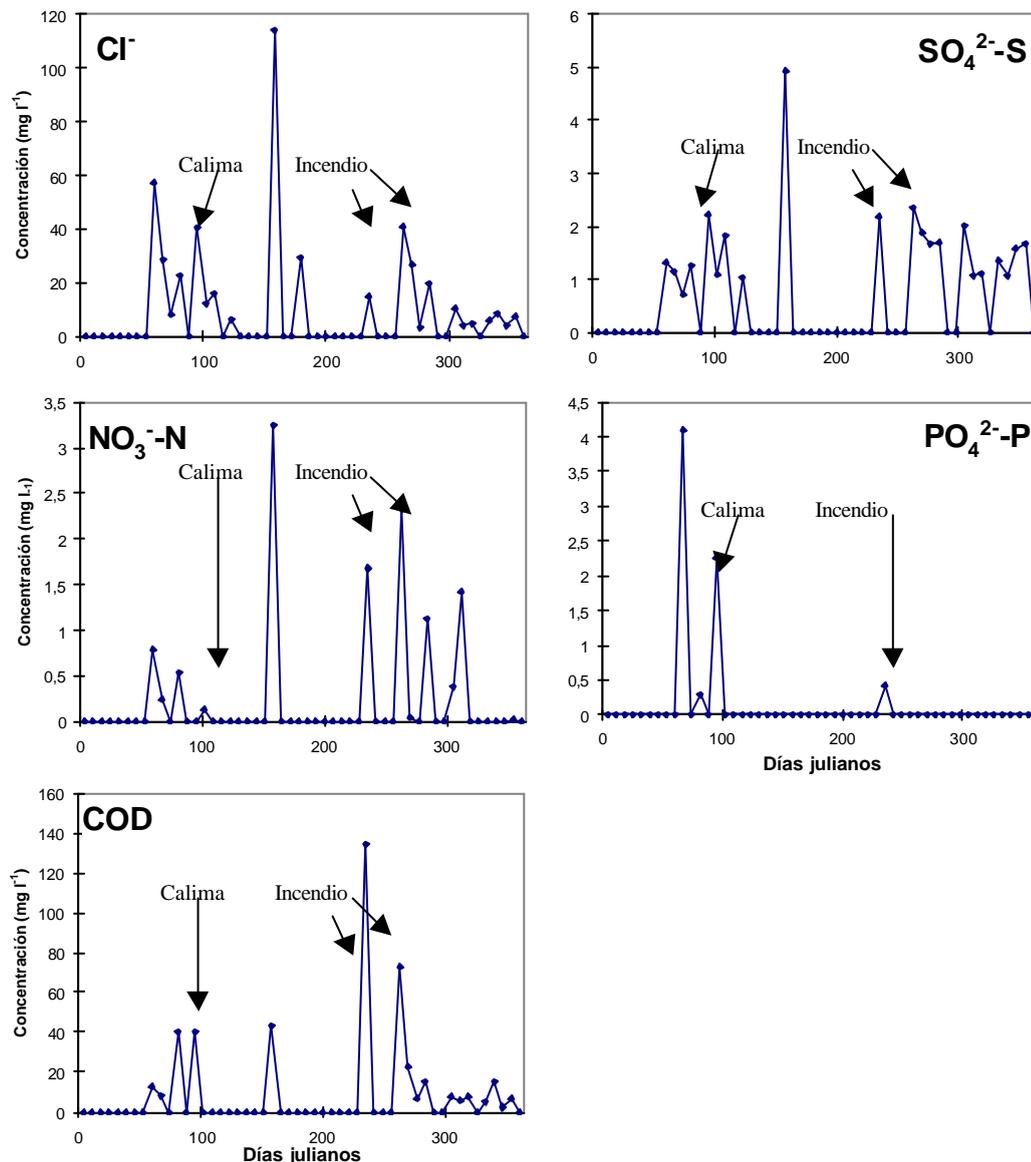


Fig. 7-4 Fluctuaciones temporales de pH y de concentración de los distintos iones

Si embargo podemos apreciar que para los fosfatos hay un gran pico en una semana que no fue anotada por el I.N.M. como una de las semanas con calima, esto puede deberse a un error en los datos del I.N.M. o a un efecto del largo periodo antecedente sin que lloviera.

En el caso de los nitratos debemos de prestar atención a la alta concentración en la semana correspondiente a alto pico de los elementos de fuente marina, y a un pico secundario tras el incendio. La concentración de sulfatos fue homogénea a lo largo del año con excepción al pico correspondiente al alto pico de los elementos de origen marino.

Para finalizar el COD fue homogéneo durante todo el año también, excepto la alta concentración medida tras el incendio forestal, originada sin duda por la alta cantidad de cenizas de madera que llegaron a la parcela, debido a la proximidad a la que paso el incendio.

### 7.3.2. LOS FLUJOS QUÍMICOS.

Los resultados se resumen como flujos anuales de los elementos químicos en la tabla 11 como  $\text{kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ , basados en el año de medición. Los cloruros y bicarbonatos fueron las especies más importantes en la precipitación completa (25,3% y 24,5% del flujo total anual de los nutrientes, respectivamente), seguido del COD (20,2%). Otros aniones fueron los sulfatos (7,1%), nitratos (2,6%) y finalmente fosfatos (1,2%). Entre los cationes el sodio fue el elemento principal (13,6% del flujo total anual de los nutrientes), como podemos observar en la Tabla. 7-11, seguido del calcio, potasio y del magnesio (2,0, 1,9, 1,5% respectivamente).

Tabla. 7-11 Flujos anuales y porcentajes de los mismos durante el año 1995 en la parcela de Agua García

	H	Ca	Mg	Na	K	CO <sub>3</sub> H	Cl	SO <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub>	PO <sub>4</sub>	C
Flujos anuales	7,5E-03	7,5	5,6	51,0	7,2	91,7	94,7	26,7	9,6	4,4	75,6
Porcentaje	2,0E-03	2,0	1,5	13,6	1,9	24,5	25,3	7,1	2,6	1,2	20,2

Tabla. 7-12 Flujos anuales de los elementos en la precipitación completa ( $\text{kg/ha año}^{-1}$ ) y Precipitación (mm) (a) sólo PO<sub>4</sub>-P (b) sólo NO<sub>3</sub>-N (c) sólo SO<sub>4</sub>-S (d) Alcalinidad.

Autor	Lugar	Prec	H	Ca	Mg	Na	K	HCO <sub>3</sub>	Cl	S	N	P
<b>África occidental</b>												
en Vitousek y Sanford (1986)	Ghana			12,7	11,3		17,5				14,0	0,1
	Costa de Marfil			30,0	7,0		5,5				21,2	2,3
	Camerún			3,8	1,5		12,0				12,0	1,7
<b>Norte de España</b>												
Mesanza y Casado (1994)	Euskadi. Ansoategui			49,0	5,8	49,7	17,7		88,4	16,5(c)	7,1(b)	
Mesanza y Casado (1994)	Euskadi. Odiaga			43,8	3,9	24,6	15,3		34,3	24,7(c)	5,6(b)	
Gras (1993)	Castrove. Galicia	3186		9,6	12,7	132,5	6,4					0,2
Gras (1993)	Arcos Condesa. Galicia	2168		5,4	10,2	90,2	4,3					0,2
<b>Este de España</b>												
Domingo <i>et al.</i> (1994)	Almería	651	0,018	11,6	2,1	3,7	3,5	44,3	6,3	5,4(c)	1,6(b)	0,2(a)
Rodá <i>et al.</i> (1993)	Montseny. Cataluña	884	0,169	10,7	1,1	4,9	1,3	4,5(d)	9,3	14,1(c)	2,5(b)	
Rodá <i>et al.</i> (1993)	Prades. Cataluña	694	0,043	10,2	0,9	5,6	1,7	18,6(d)	8,1	9,8(c)	1,7(b)	
<b>Europa centro-merid.</b>												
Ranger <i>et al.</i> (1995)	Ardennes. Francia.			18,7	3,2		6,6			47,1	20,3	0,3
Atteia y Dambrine (1993)	Lutry. Suiza	1250		9,0	0,1	0,7	1,1		3,8	8,4(c)	5,3(b)	
Atteia y Dambrine (1993)	Jura. Suiza			5,8	0,1	1,6	2,6	0,0	5,2	6,8(c)	4,9(b)	
<b>Canarias</b>												
	Agua García. Canarias	626	0,0075	7,5	5,6	51,0	7,2	91,7	94,7	8,9(c)	2,2(b)	1,4(a)

Las relaciones del flujo de  $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$  en la precipitación total promediaron 2,7 sobre una base de un año, este resultado esta en consonancia con los registrados por Neary y Gizyn (1994)

con valores que variaron entre 2,7 a 1,2, sin embargo se puede apreciar un descenso de la cantidad de  $\text{NO}_3$  en relación con los  $\text{SO}_4$  para el monte de Agua García.

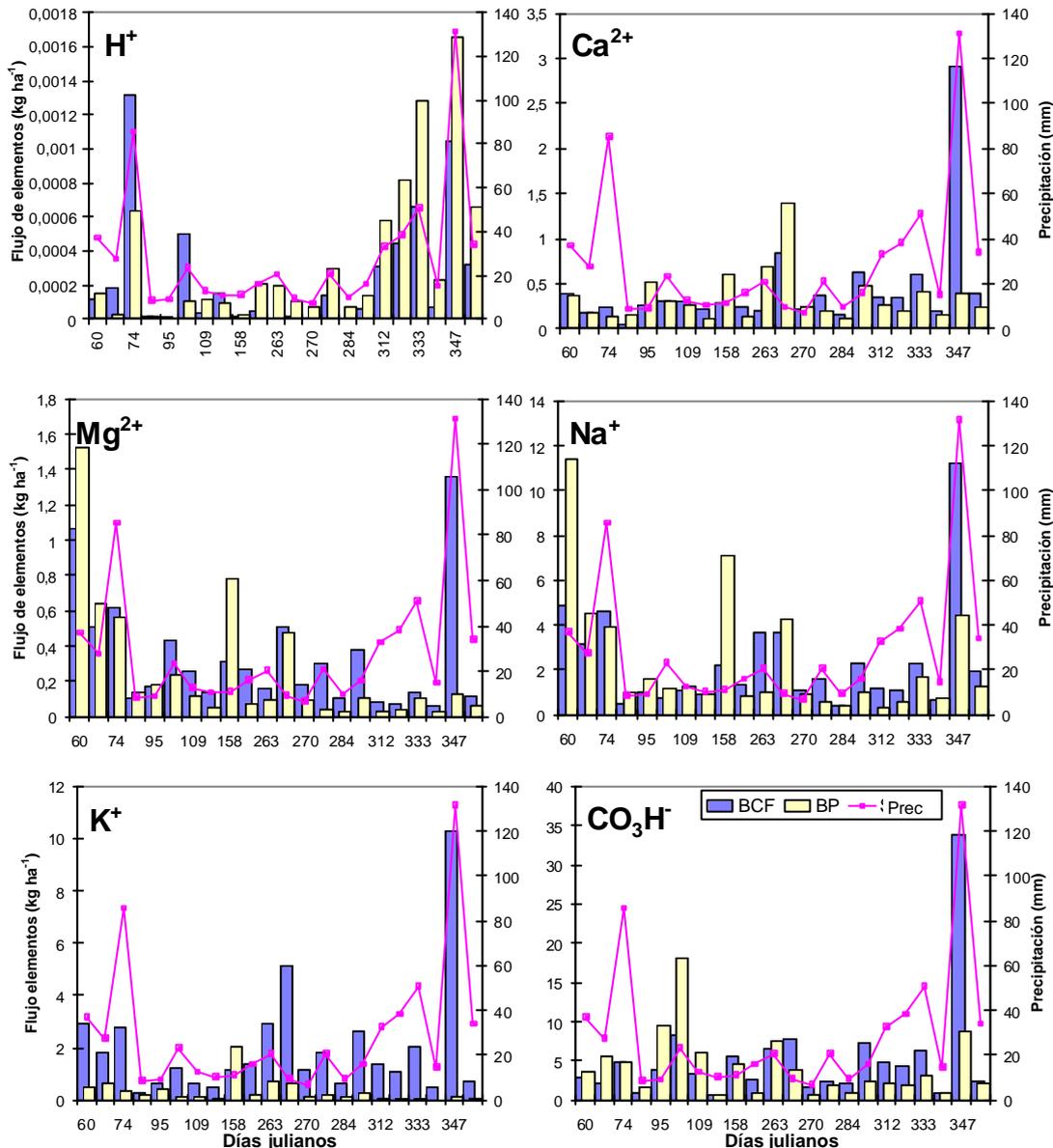


Fig. 7-5 Fluctuaciones temporales de los flujos netos de la precipitación completa (BP), la precipitación bajo cubierta ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) a lo largo del año de estudio para los distintos elementos presentes, en líneas la cantidad de precipitación en mm.

Las Islas Canarias pueden ser consideradas como un enclave subtropical, el contenido de nutrientes de la lluvia de la mayoría de los lugares tropicales están dentro del rango de resultados de algunos lugares de clima templado (Vitousek y Sandford, 1986), por ello estos lugares subtropical podrán ser comparados tanto a otros lugares tropicales del oeste de África como a otros templados de la parte mediterránea de Europa (Tabla 7-12). De acuerdo con Vitousek y Sandford (1986) existe una tendencia en cierto modo a una mayor deposición anual de cationes en lugares con mayor estacionalidad (Ghana y Costa de Marfil). Las concentraciones de protones fueron menores que las del levante español, mientras que las cantidades de calcio y magnesio se hallan como valores centrales de los intervalos (de 3,8 a 30  $\text{kg/ha año}^{-1}$  para el Ca y de 0,1 a 12,7  $\text{kg/ha año}^{-1}$  para el Ca), no obstante dadas las altas cantidades de sodio y cloruros, la proporción de Ca de origen terrestre ha de ser pequeña en comparación con parte de estos lugares. Los valores del potasio toman también valores intermedios en el rango existente (de 1,1 a 17,5  $\text{kg/ha}$

año<sup>-1</sup>) Las cantidades de bicarbonatos fueron muy altas, y las cantidades de sulfatos son bajas, debiendo de ser con base en los anteriores valores de cloruros y sodio en un porcentaje mucho mayor de los sulfatos de origen marino con respecto al del resto de los lugares presentes en la Tabla. 7-12. Las cantidades de nitratos son también bajas y en consonancia con los resultados del

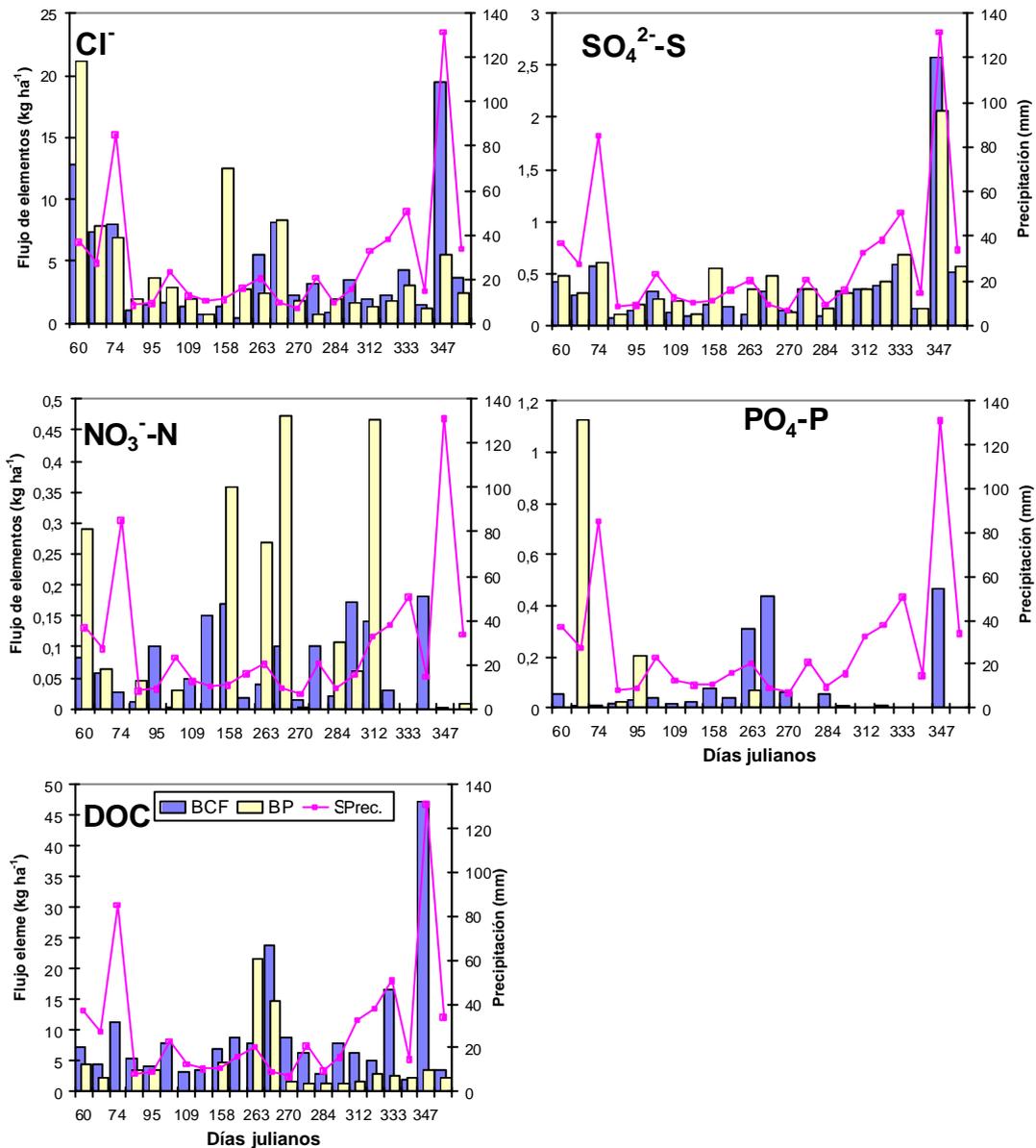


Fig. 7-6 Fluctuaciones temporales de los flujos netos de la precipitación completa (BP), la precipitación bajo cubierta (BCF) (kg ha<sup>-1</sup>) a lo largo del año de estudio para los distintos elementos presentes, en líneas la cantidad de precipitación en mm.

levante español. Por último las cantidades de fósforo sólo son igualables a las de la costa oeste africana en Costa de Marfil y Camerún.

### 7.3.2.1. LOS FLUJOS IÓNICOS A LO LARGO DEL AÑO.

De nuevo tuvieron importancia los dos eventos que cambiaron las concentraciones de la precipitación completa durante el año de estudio. Los porcentajes de flujos de nutrientes correspondientes a este periodo se muestran en la Tabla. 7-13, y en la Figuras. 7-5 y 7-6, se debe de prestar un interés especial al alto porcentaje de COD, que fue tras el incendio casi el cincuenta por ciento del total anual de COD, este hecho puede explicar que el valor de COD fuera extremadamente alto en comparación con los datos registrados por Liechty *et al.* (1995) que

variaron entre 12,1 kg ha<sup>-1</sup> a 12,7 kg ha<sup>-1</sup> para bosques de Oceana y Alberta. El porcentaje de flujos debido al polvo del Sahara es bajo comparado con la alta concentración descrita anteriormente, la causa son los pequeños volúmenes de lluvia de acuerdo con Veneklass (1990), quien afirmó que “durante los periodos de lluvia, las concentraciones de la precipitación completa son usualmente menores pero que al convertirlo en flujos, estos son mayores para los periodos de lluvia debido a los grandes volúmenes de precipitación”.

Tabla. 7-13 Porcentajes anuales del flujo de nutrientes (kg ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>) de las semanas tras el incendio y en las que acontecieron invasiones de polvo con origen en el Sahara en la precipitación completa.

	H	Ca	Mg	Na	K	CO <sub>3</sub> H	Cl	S-SO <sub>4</sub>	N-NO <sub>3</sub>	P-PO <sub>4</sub>	C
%incendio	4,0	27,7	10,3	10,4	19,0	12,4	11,4	9,3	34,1	4,8	48,0
%calima	1,0	8,3	3,7	3,9	8,2	11,4	5,8	4,1	5,0	14,3	6,7

Sin embargo, y respecto a la influencia del polvo del Sahara, en la región mediterránea del este de España se registraron altos porcentajes de los aportes anuales de los elementos disueltos en la precipitación completa, llegando al 50% del Ca en Prades, aunque estos constituyeran sólo una parte pequeña del volumen de la precipitación anual Rodà *et al.* (1993). Esto conlleva a dos reflexiones, o bien las cantidades de elementos no marinos en estos lugares son mayores o bien el aporte de polvo sahariano es constante y lo reseñado anteriormente son los grandes picos en el aporte de estos elementos.

## 7.4. CONCLUSIONES

- El pH encontrado durante el año de investigación promedia como V.W.M: un valor de 5,9 mayor al 5,6 esperado como usual, lo que nos indica la adición de elementos de origen terrestre.
- Al evaluar el exceso de elementos encontramos un exceso para el calcio, el potasio, los sulfatos, los nitratos y los fosfatos.
- Las causas del exceso de calcio y potasio pueden ser debidas a las invasiones de masas de aire provenientes del desierto sahariano, la forma del calcio sería como carbonato cálcico. No se descarta la posibilidad de un origen terrestre próximo debido al uso de fertilizantes. Tras el gran incendio forestal producido en las proximidades del bosque existieron grandes picos para estos dos elementos.
- Los sulfatos y los nitratos pueden tener como fuente la contaminación producida por el uso de combustibles fósiles, lo que parece, a tenor de las regresiones efectuadas, tener más posibilidades para los sulfatos. Los nitratos podrían tener como fuente el uso de fertilizantes. Ambos elementos tienen un gran pico tras el incendio forestal.
- Los fosfatos podrían provenir del desierto del Sahara debido a la coincidencia de la aparición de los mismos con los episodios de calima. Tras el incendio también existe un pico de fosfatos.
- El COD tiene un gran pico tras el incendio forestal que como flujo representa la mitad de los aportes de carbono orgánico disuelto durante ese año a la parcela de investigación.
- Los flujos de elementos se comportan dentro de los valores esperados, tendiendo a ser menores que en otros ecosistemas mediterráneos.

## 7.5. BIBLIOGRAFÍA

- Ahmed, A.F.M. Singh, R.P. & Elmubarak, A.H. 1990. Chemistry of atmospheric precipitation at the western Arabian gulf coast. Atmos. Environ., 24a:2927-2934.

- American Public Health Association. 1992. Standard Methods for the examination of water and waste water. 18th edition. APHA - AWWA - WPCF. Washington.
- Appelo, C.A.J. Postma, D. & Balkema A.A. 1993. Geochemistry, groundwater and pollution. Rotterdam. Brookfield. Netherlands.
- Atteia, O. & Dambrine, É. 1993. Dynamique d'éléments traces dans les précipitations sous le couvert de 2 pessières peu polluées de Suisse romande. Ann. Sci. For., 50:445-459.
- Barlett, R.J. & Ross, D.S. 1988. Colorimetric determination of oxidizable carbon in acid soil solutions. Soil Sci. Soc. Am. J. 52:1191-1192.
- Butler, T.J. & Likens, G.E. 1994. A direct comparison of throughfall plus stemflow to estimates of dry and total deposition for sulfur and nitrogen. Atmos. Environ. 29:1253-1265.
- Caritat, P. & Aamlid, D. 1995. Groundwater acidification at Birkness, southern Norway: comparing trends of chemical composition of precipitation, throughfall, soilwater and groundwater. Water Air Soil Poll. 85:1861-1866.
- Chorover, J. Vitousek, P.M. Everson, D.A. Esperanza, A.M. & Turner, D. 1994. Solution chemistry profiles of mixed-conifer forest before and after fire. Biogeochemistry 26: 115-144.
- Crockford, R.H. Richardson, D.P. & Sageman R. 1996. Chemistry of Rainfall, throughfall and stemflow in a eucalypt forest and a pine plantation in southeastern Australia: 2. Throughfall. Hydrol. Process.. 10: 13-24.
- Dewalle, D.R. & Swistock, B.R.. 1994. Differences in Oxygen-18 content of throughfall and rainfall in hardwood and coniferous forest. Hydrol. Process. 8:75-82.
- Dittmar, W 1884. Report on the scientific results of the Exploring Voyage of H.M.S. Challenger. Physics and Chemistry. Vol 1. H.M. Stationary Office, London.
- Domingo, F. Puigdefabregas, J. Moro, M.J. & Bellot, J. 1994. Role of the vegetation in biogeochemical balances of a small afforested catchment in southern Spain. J. Hydrol. 159:275-289.
- Duce, R.A. & Hoffman, E.J. 1976. Chemical fractionation at the air/sea interface. Ann. Rev. Earth Planet. Sci. 4, 187-228.
- Eriksson, E. 1960. The yearly circulation of chloride and sulfur in nature; meteorological, geochemical and pedological implications. Part II. Tellus 12:63-109.
- Ferm, M. & Hultberg, H. 1995. Method to estimate atmospheric deposition of base cations in coniferous throughfall. Water Air Soil Poll. 85: 2229-2234.
- Fowler, D. 1980. Removal of sulphur and nitrogen compounds from the atmosphere in rain and by dry deposition. In D. Drabløs and A.Tollan (sde.), Ecological impact of acid precipitation. SNSF project. Oslo, Norway, 22-32.
- Galloway, J.N & Likens G.E. 1978. The collection of precipitation for chemical analysis. Tellus 30:71-82.
- Gras, J.M. 1993. Investigación sobre las relaciones hídricas en las plantaciones de *Eucalyptus globulus* en Galicia. Tesis Doctoral. Universidad politécnica de Madrid. Escuela Superior de ingenieros de Montes. No publicada. 150 pp.
- Hoffman, W.A., Jr. Lindberg, S.E. & Turner, R.R. 1980. Some observations of organic constituents in rain above and below a forest canopy. Environ. Sci. Technol. 14:999-1002
- Houze, R. & Hobbs, P.V. 1982 Organization and structure of precipitation cloud systems. Adv. Geophys 24: 225-315.
- Johnson, D.W. and Lindberg, S.E., eds. (1992) "Atmospheric deposition and forest nutrient cycling" Springer-Verlag, New York and Berlin.
- Jordan, C.F. 1982. The nutrient balance of an Amazonian rain forest. Ecology 63:647-654
- Kloeti, P. Keller, H.M. & Guecheva, M. 1989. Effects of canopy on throughfall precipitation chemistry. Atmospheric Deposition (Proceedings of the Baltimore Symposium), IAHS Publ. N° 179: 203-209.
- Kozłowski, T.T. & Pallardy, S.G. 1997. Physiology of woody plants. 2º Ed. Academic Press. San Diego.
- Liechty, H.O., Kuuseoks, E. & Mroz, G.D. 1995. Dissolved Organic carbon in northern hardwood stands with differing acidic inputs and temperature regimes.

- Lindberg, S.E. Lovett, G.M. Richter, D.D. & Johnson D.W. 1986. Atmospheric deposition and canopy interactions of major ions in a forest *Science* (Washington D.C.) 231:141-145.
- Lindberg, S.E. and Lovett G.M. 1992. Deposition and forest canopy interactions of airborne sulfur: results from the integrated forest study. *Atmos. Environ.* 26<sup>a</sup>:1477-1492.
- Lovett, G.M., Lindberg, S.E., Richter, D.D. & Johnson, D.W. 1985. The effects of acidic deposition of sulphur dioxide onto several soils from England and Wales. *J. Sci. Food Agr.* 29:739-746.
- Lovett, G.M. Reiners, W.A. & Olson R.K. 1989. Factors controlling throughfall chemistry in a balsam fir canopy: a modelling approach. *Biogeochemistry*, 8: 239-264.
- Lovett, G.M. 1994. Atmospheric deposition of nutrients and pollutants in North America: An ecological perspective. *Ecol. Appl.* 4(4):629-650.
- Loye-Pilot, M.D. Martin, J.M. & Morelli, J. 1986. *Nature* 321,427.
- Loye-Pilot, M.D. & Morelli, J.M. 1988, *J.Aerosol Sci.* 19,577.
- MacDowell, W.H. & Likens, G.E. 1988. Origin, composition, and flux of dissolved organic carbon in the Hubbard brook valley. *Ecol. Monogr.* 58:177-195.
- Matzner, E. & Meiwes, K.J. 1994. Long-Term development of element fluxes with bulk precipitation and throughfall in to German Forests. *Journal of Environmental Quality*, 23:162-166. KNMI/RIV, 1985. Chemical composition of precipitation over the Netherlands. *Ann. Rep. 1983. Royal Met. Inst. De Bilt, the Netherlands.*
- Mesanza, J.M. & Casado H. 1994. Atmospheric deposition at *Pinus radiata* sites in the Spanish Basque country. *J. Environ. Sci. Health A29(4):729-744.*
- Moore, T.R. 1989. Dynamics of dissolved organic carbon in forested and disturbed catchments, westland, New Zealand. *I. Maimai. Wat. Resour. Res.* 25:1310-1321.
- Morales, C. (Ed.) 1979. *Saharan dust.* John Wiley, New York.
- Nativ, R. & Issar, A. 1983. Chemical composition of rainwater and floodwaters in the Negev desert. *Israel. J. Hydrol.* 62, 201-223.
- Neary, A.J. & Gizyn, W.I. 1994. Throughfall and stemflow chemistry under deciduous and coniferous forest canopies in south-central Ontario. *Can. J. For. Res.* 24: 1089-1100.
- Petrov M.P. 1976. *Deserts of the world.* John Wiley (eds.) New York.
- Ranger, J. Colin-Belgrand, M. & Nys, C. 1995. Le cycle biogéochimique des éléments majeurs dans les écosystèmes forestiers. *Étude et Gestion des Sols*, 2,2:119-134.
- Rodà, F. Bellot, J. Avila, A Escarré, A Piñol, J & Terradas, J. 1993. Saharan dust and the atmospheric inputs of elements and alkalinity to Mediterranean ecosystems. *Water Air Soil Poll.* 66:277-288.
- Riley, J.P. 1975. Analytical chemistry of sea water. Pp. 193-524 in Riley, J.P. & Skivrow, G. (eds.), *Chemical oceanography vol. 3, 2nd ed.* Academic Press, London.
- Sequeira R. 1980. Chemistry of precipitation at high altitudes: inter-relation of acid-base components. *Atmos. Environ.* 16: 329-335.
- Sequeira R. 1982. Acid rain: an assessment based on acid-base considerations. *APCA Journal* 32 (3):241-245.
- Sequeira R. 1991. Note on the consumption of acid through cation exchange with clay minerals in atmospheric precipitation. *Atmos. Environ.* 25A (2): 487-490.
- Sequeira R. & Kelkar, D. 1978. Geochemical Implications of summer Monsoonal rainwater composition over India. *J. Appl. Meteorol.* 17:1390-1396.
- Sequeira R. Lung, F. 1995. A critical data analysis and interpretation of the pH, ion loadings and electrical conductivity of rainwater from the territory of Hong Kong. *Atmos. Environ.* 29(18): 2439-2447.
- Sequeira R. Peart, R. 1995. Analysis of the pH of daily rainfall at a rural site in Hong Kong, 1989-1993. *Sci. Total Environ.* 159:177-183.
- Shibata, H. Satoh, F Tanaka, Y & Sakuma T. 1995. The role of organic horizons and canopy to modify the chemistry of acidic deposition in some forest ecosystems. *Water Air Soil Poll.* 85: 1119-1124.

- Steinhardt, U. & Fassbender, H.W. 1979. Características y composición química de las lluvias de los Andes occidentales de Venezuela. *Turrialba* 29:175-182.
- Strigel, G. Ruhayat, D. Prayitno, D. & Sarmina, S. 1994. Nutrient input by rainfall into secondary forests in East Kalimantan, Indonesia. *J. Trop. Ecol.* 10: 285-288.
- Veneklass, E.J. 1990. Nutrient fluxes in bulk precipitation and throughfall in two Montane Tropical rain forest. Colombia. *J. Ecol.* 78: 974-992.
- Vitousek P.M. & Sandford, R.L. Jr. 1986. Nutrient cycling in moist tropical forest. *Ann. Rev. Ecol. Syst.* 17:137-167.



## Capítulo 8. LOS FLUJOS DE NUTRIENTES BAJO CUBIERTA

### 8.1. INTRODUCCIÓN

Los flujos bajo la cubierta del bosque (*BCF*) se componen de dos fracciones: los flujos del escurrido cortical (*EC*), y los flujos de la precipitación penetrante (*Pp*). El agua que fluye a través de las cubiertas vegetales juega un papel fundamental en el transporte de elementos disueltos y sólidos suspendidos, y éste agua dentro de la cubierta vegetal influye en los procesos químicos, físicos y biológicos que ocurren sobre la superficie de las plantas (Hansen, 1995). Los datos sobre la composición química de los flujos bajo cubierta son indispensables para entender los procesos químicos de los contaminantes en las cubiertas vegetales, y para estimar la deposición atmosférica en parcelas de bosque, y para construir los ciclos de nutrientes de los ecosistemas (Fenn *et al.*, 1995).

Existe una aceptación general de las causas que hacen que la composición química de la precipitación se altere considerablemente al pasar por la cubierta hacia el suelo, consistente en que los flujos bajo cubierta representan el efecto combinado de la deposición seca, el lavado y las reacciones de intercambio sobre la cubierta (Lovett y Lindberg, 1984; MacConald *et al.* 1993).

Las cubiertas forestales son una importante fuente de nutrientes (elementos minerales lavados de los tejidos de las plantas, exudados y productos de descomposición (Kozlowski y Pallardy 1997) denominados deposición interna (o lavado de iones *IC*), retornando así la precipitación penetrante y el escurrido cortical nutrientes de la vegetación hacia el suelo (Vitousek y Sandford, 1986). Además estas cubiertas vegetales tienen la capacidad de tomar elementos interceptados por la cubierta (Ulrich, 1983, toma de la precipitación (*UP*). Usualmente, cuando la lluvia pasa a través de la cubierta arbórea, su concentración en nutrientes minerales aumenta Kozlowski y Pallardy (1997).

Ya que el lavado y la deposición seca pueden ser nutricionalmente importantes (Neary y Gizyn, 1994), el conocimiento de los flujos químicos del agua a través del ecosistema del bosque será una pieza importante para completar el conocimiento total del funcionamiento del ecosistema. El intercambio de nutrientes entre la vegetación y la atmósfera, y la transferencia de compuestos orgánicos e inorgánicos al suelo del bosque en la precipitación penetrante, son importantes para los procesos del ciclo de elementos en los ecosistemas (Parker, 1983).

Los nutrientes en el escurrido cortical son generalmente una fracción pequeña (<10%) en la precipitación en el bosque maduro (Parker, 1983), sin embargo la concentración de minerales en el escurrido cortical es comúnmente más alta; no obstante éstas contribuciones de iones en el escurrido cortical, aunque bajas, son generalmente más altas que la contribución de escurrido cortical al flujo hidrológico (Neary y Gizyn, 1994). Sobre una base anual, la precipitación penetrante frecuentemente llega hasta 90% de los nutrientes liberados por lavado de las plantas; a pesar de ello, el retorno de los nutrientes al suelo del bosque por el escurrido cortical es importante porque los deposita en una disolución relativamente concentrada a la base del tronco, y la importancia en la nutrición mineral del bosque de la precipitación penetrante y el escurrido cortical es debida a la alta tasa de disponibilidad para la absorción por las raíces comparado con la lenta tasa debida a la descomposición de la materia orgánica (Kozlowski y Pallardy, 1997) y/o procesos de alteración mineral y difusión de nutrientes a través del suelo.

Los objetivos de este capítulo son:

- i. Determinar los cambios que ocurren en la composición química de precipitación al pasar por la cubierta del bosque y asociarla a los flujos de elementos.

- ii. Comparar los diferentes cambios que ocurren en la composición química en el escurrido cortical de cada especie.

## **8.2. MATERIAL Y MÉTODOS.**

### **8.2.1. INSTRUMENTOS DE CAMPO Y RECOGIDA DE MUESTRAS**

Los colectores de precipitación penetrante, su mantenimiento y procedimiento de recogida fue idéntico al utilizado para la precipitación completa. Los volúmenes de precipitación penetrante fueron medidos tal y como se detalla en el apartado 4.2.1. mediante 40 pluviómetros colocados al azar en lugares fijos, no fue necesario cortar plantas cercanas a los mismos ya que en el bosque no existía un estrato inferior importante y fueron mezclados proporcionalmente para obtener una muestra única que fue depositada en botes limpios de polietileno de 250 ml. Aunque es conocido que la química de la precipitación penetrante es muy variable, tanto en el tiempo como en el espacio (Robson *et al.*, 1994) y en un pequeño número de estudios se ha investigado la heterogeneidad de la precipitación penetrante en escalas espaciales muy pequeñas (Parker, 1983; Seiler y Matzner, 1995), pensamos que el número de pluviómetros fue suficiente para captar la heterogeneidad bajo la cubierta.

A la botella cuya boca se ensambla dentro de la otra se le practicó una sección a unos 5 cm de su parte inferior, y se le puso una fina rejilla de plástico (250 mm) en su cuello interior impidiendo el paso de materiales vegetales y animales; de esta forma esta botella realizó la función de un embudo, minimizando los problemas de pérdidas por salpicaduras debido a sus altas paredes y por la biselación del borde. El material acumulado en la rejilla fue limpiado semanalmente y los filtros se lavaron frecuentemente. Jamás se detectó crecimiento de algas. El conjunto de los dos bidones ensamblados se fijó en el suelo por medio de tres segmentos de acero corrugado de 1 cm de diámetro y de 1,5 m de longitud, con el fin de que el pluviómetro mantuviera una posición perfectamente horizontal respecto al suelo exponiendo la máxima superficie de captación, resultando finalmente que la superficie de captación quedaba 80 cm por encima del suelo, evitando la contaminación por las salpicaduras del suelo.

La recogida del escurrido cortical se detalla en el apartado 3.2.1. y 3.2.2. Se midió en 30 árboles, 5 de cada especie, los volúmenes fueron mezclados proporcionalmente para obtener una muestra única para cada especie que fue depositada en botes limpios de polietileno de 250 ml

Las muestra fueron llevadas al laboratorio en un periodo inferior a 1 hora, e introducidas en un frigorífico a -4°C esperando para ser analizadas. En la semana siguiente 200 ml de agua fueron filtrados a través de filtros de 0,45 mm (Millipore). De cada muestra se conservó una submuestra de 50 ml sin filtrar que fue utilizada para la determinación del COD.

### **8.2.2. ANÁLISIS QUÍMICO**

El análisis químico se halla reseñado en el apartado 7.2.2.

### **8.2.3. ANÁLISIS DE LOS DATOS**

Se calculó la concentración media ponderada por el volumen ( $VWM$ ), el exceso de iones (con el Na como trazador) y el factor de fraccionamiento, tal y como se indica en el apartado 7.2.3.

### 8.3. LOS FLUJOS DE LA PRECIPITACIÓN PENETANTE. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

#### 8.3.1. COMPOSICIÓN QUÍMICA

Los resultados han sido resumidos como concentraciones medias ponderadas por los volúmenes, y medias aritméticas de las concentraciones en la Tabla. 8-1. Si comparamos las V.W.M. con las medias aritméticas, encontramos que las concentraciones medias ponderadas por los volúmenes son menores que las medias aritméticas de las concentraciones, al igual que se encontró en la precipitación completa, este hecho puede ser debido al efecto de los grandes volúmenes de agua en algunos eventos que causan un descenso de la concentración en esos casos. Al comparar las concentraciones sin los eventos posteriores a las semanas de deposición de cenizas del fuego o de calima observamos grandes cambios mayores en las medias sin las dos semanas de fuego que las de sin calima; estos efectos serán estudiados detenidamente a lo largo del presente capítulo.

Tabla. 8-1 Concentración media de los elementos en la precipitación penetrante (media ponderada por el volumen, V.W.M.,  $\text{mg l}^{-1}$  y medias aritméticas  $\text{mg l}^{-1}$ )

	CE	pH	H	Ca	Mg	Na	K	CO <sub>3</sub> H	Cl	S-SO <sub>4</sub>	N-NO <sub>3</sub>	P-PO <sub>4</sub>	C
Media aritmética	322,9	6,3	5,3E-04	4,1	3,5	29,7	24,4	60,6	46,9	2,7	1,0	1,7	110,1
Desv. Típica	420,7	0,5	5,1E-04	3,2	2,7	49,3	39,7	87,5	75,6	1,3	1,2	4,4	124,4
Sin fuego	217,9	6,2	5,8E-04	3,2	3,0	17,6	13,4	39,4	27,1	2,5	0,9	0,5	77,9
Sin calima	325,5	6,3	5,5E-04	4,0	3,5	30,1	24,9	59,8	47,7	2,7	1,0	1,7	111,2
Sin f. Ni c.	215,2	6,2	6,0E-04	3,1	3,0	17,4	13,5	37,3	26,9	2,4	0,8	0,5	77,4
V.W.M.	178,2	6,2	5,8E-04	2,7	2,1	14,8	12,3	33,4	26,2	2,3	0,4	0,5	57,2

Utilizando las concentraciones medias ponderadas por los volúmenes, los cationes variaron del siguiente modo: Na>K>Ca>Mg>H, que al comparar esta secuencia con la de la precipitación completa se observa un incremento de potasio, este elemento es el más lavable, debido a que las causas de los cambios en las concentraciones y las propiedades de la precipitación penetrante están derivadas de las sustancias derivadas desde las hojas y las cortezas (Torii y Kiyaro, 1992; en Inagaki *et al.*, 1995), es lógico el aumento de la concentración de potasio.

Los aniones variaron del siguiente modo: HCO<sub>3</sub>>Cl>SO<sub>4</sub>>NO<sub>3</sub>>PO<sub>4</sub>, esta secuencia tiene el mismo orden que esos elementos en la precipitación completa, pareciendo de este modo que no existen grandes aportes diferenciales de elementos con el paso del agua través de la cubierta.

De acuerdo con otros autores (Caritat y Aamlid, 1995) la existencia en la precipitación penetrante de Al, Fe y Si estuvo por debajo de los límites de detección.

El pH tuvo como media aritmética 6,3 y como concentraciones medias ponderadas por los volúmenes 6,2, este pH es más alto que el medido en la precipitación completa, las causas del descenso de la concentración de protones serán examinadas posteriormente, a través de los flujos netos, pero probablemente son debidas al intercambio catiónico en la superficie de la hoja; sin embargo este alto pH no significa la ausencia de ácidos orgánicos que son proporcionados por las cortezas en la cubierta, modificando la precipitación penetrante (Edmonds *et al.*, 1991).

La concentración de COD en la precipitación penetrante como concentración media ponderada por el volumen fue de 57,2  $\text{mg l}^{-1}$ , con una media aritmética de 110,1; esta gran diferencia es posible que sea debida al gran incendio forestal. Debemos de tener cuidado a la hora

de interpretar estos datos con factores tales como la temperatura y el pH de la precipitación, ya que influyen en la determinación del COD (Liechty *et al.* 1995)

De acuerdo con Liechty *et al.* (1995), tratamos los datos de las concentraciones semanales individuales del COD en la precipitación penetrante, obteniendo resultados similares a los obtenidos por estos autores. La concentración del COD estuvo fuertemente correlacionada con las cantidades de precipitación y precipitación penetrante recogidas ( $p < 0,001$ ), y no estuvo significativamente correlacionada con la acidez de ninguna de las dos soluciones. El transporte de carbono orgánico disuelto (COD) en la precipitación penetrante y soluciones del suelo del bosque es un mecanismo importante para ciclar de C, N, y P desde la biomasa aérea al suelo en ecosistemas de bosques decíduos templados (Liechty *et al.* 1995). No solamente es el COD importante en el ciclado de elementos, ya que una gran porción del COD se compone de ácidos orgánicos que van desde simples como ácidos fórmico, acético u oxálico a complejos como ácidos húmicos o fúlvicos, que son importante en la mediación del lavado de cationes, disolución de metales, en la meteorización de minerales, y absorción-desabsorción de aniones ácidos (Liechty *et al.* 1995).

### 8.3.1.1 PARÁMETROS DE CALIDAD

De nuevo como en el caso de precipitación completa asumimos que los cationes inorgánicos usuales son:  $H^+$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Mg^{2+}$  y  $Ca^{2+}$ , y los aniones,  $HCO_3^-$ ,  $Cl^-$ ,  $NO_3^-$  y  $SO_4^{2-}$  constituyendo casi todo el peso iónico de la precipitación penetrante. Los parámetros utilizados han sido convenientemente reseñados en el apartado 7.3.1.1.

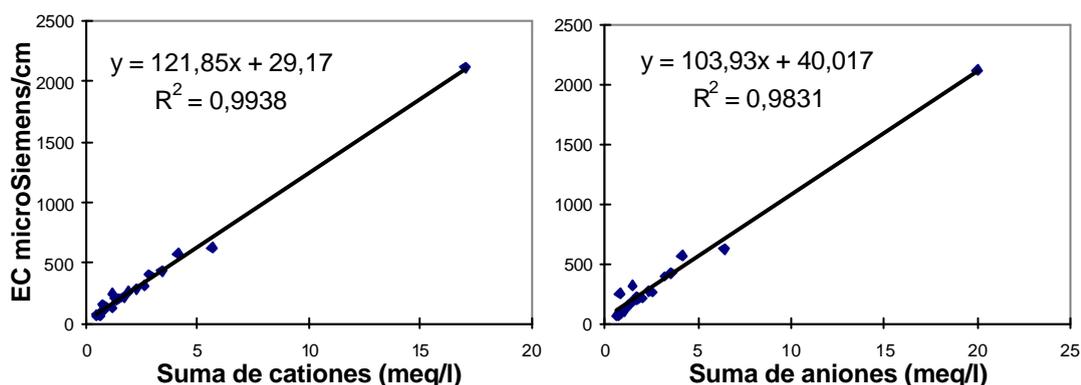


Fig. 8-1 Correlación entre la suma de los cationes y la conductividad eléctrica, y la correlación entre la suma de aniones y la conductividad eléctrica.

Tabla 8-2 Parámetros de calidad de los análisis de la precipitación penetrante.

	$S^-$	$S^+$	CBD	$I_r$	$B_i$
Media aritmética	2,7	2,4	0,3	1,2	7,3
Desviación típica	4,0	3,4	0,7	0,3	13,0
Mediana	1,6	1,4	0,2	1,2	7,6
Máximo	20,0	17,0	3,0	1,8	29,0
Mínimo	0,6	0,4	-1,1	0,6	-28,5
Media ponderada por V.	0,8	1,3	-0,5	0,6	-24,4

Los diferentes criterios de calidad de los parámetros se recogen en la Tabla 8-2 y figura 8-1. Existe una buena concordancia entre la suma de cationes y aniones con la conductividad eléctrica de las disoluciones, en el caso de los aniones mucho mejor que la observada para la precipitación completa. Asimismo el balance iónico resulta más ajustado que en la precipitación

completa, con un desequilibrio de cargas a favor de los aniones, a pesar de no haber incluido el catión amonio. Este exceso de aniones es consistente con el aumento de COD que, de acuerdo con las consideraciones del apartado 7.3.1.1, conducirá a una sobrevaloración del bicarbonato.

### 8.3.1.2. EL EXCESO DE ELEMENTOS

Para la interpretación de los resultados de estos análisis químicos de la precipitación penetrante y para conocer las fuentes suplementarias, el calculo de las ganancias de los elementos no marinos en la precipitación penetrante permite eliminar principalmente las partículas de origen marino, pero otras fuentes de la deposición de partículas y gases pueden contribuir a la química de la precipitación penetrante (Dewalle y Swistock, 1994).

Ya que el Na es el elemento más inerte respecto de la cubierta (Ferm y Hultberg, 1995a) se utilizó como trazador para comparar las relaciones iónicas de la precipitación penetrante con las de la precipitación completa. Sin embargo, es posible encontrar contaminación debida al sodio, posiblemente por partículas de polvo de origen continental en climas áridos (como polvo eólico de origen sahariano transportado por el Siroco a través del mar) (Fowler, 1980; Nativ e Issar, 1983; Sequeira, 1991)

Para este año hidrológico la relación media (en miliequivalentes) entre los principales elementos y el sodio se muestra en la Tabla. 8-3. Se puede observar un déficit de cloruros y de magnesio, y un exceso de calcio, potasio, sulfatos, nitratos y fosfatos. El valor del déficit de cloruros representado como media fue de un -14,3% en la precipitación penetrante, no siendo un valor bajo, y comparándolo con el valor positivo de la precipitación completa, lo que nos permite pensar en una toma de este elemento desde la cubierta, hecho que será ratificado posteriormente con los balances netos. El valor del déficit de magnesio representado como media fue de un -3,3% en la precipitación penetrante, siendo este valor similar al obtenido en la precipitación completa. Los valores de los excesos de calcio y de potasio representados como medias fueron de un 71,1% y de un 95,6% respectivamente, en la precipitación penetrante, esto puede significar una importante influencia del polvo de origen terrestre o un importante lavado de la cubierta, debemos de prestar especial atención al incremento de potasio, de acuerdo con la propiedad de lavable que presenta este ion. El valor del exceso de sulfatos representado como valor medio fue de un 8,3% de sulfatos en la precipitación penetrante, un importante descenso comparado con la precipitación completa. Y para finalizar los excesos de nitratos y fosfatos tuvieron valores medios de 99,9% y 100% respectivamente, en la precipitación penetrante, los mismos valores que en la precipitación completa.

Tabla. 8-3 Medias (meq l<sup>-1</sup>), desviaciones típicas del exceso de elementos utilizando el Na<sup>+</sup> como trazador, y el porcentaje del exceso sobre la cantidad total del elemento en la precipitación penetrante.

	Ca	Mg	K	CO <sub>3</sub> H	Cl	SO <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub>	PO <sub>4</sub>
Media	0,14	-0,01	0,60	0,99	-0,19	0,01	0,07	0,16
Desviación típica	0,11	0,36	0,97	1,42	0,67	0,20	0,08	0,43
% sobre Pp	71,1	-3,3	95,6	99,3	-14,3	8,3	99,9	100,0

Los factores de fraccionamiento son relativos al sodio (*F<sub>Na</sub>*), se muestran en la tabla 8-4 como valores medios con sus desviaciones típicas, podemos observar que el valor de los cloruros está cercano a la unidad, esto significa que los valores medios a lo largo del año de las relaciones de la precipitación penetrante están cercanas a las del agua el mar. Para el magnesio obtuvimos un valor de 1,4; para el calcio y los sulfatos obtuvimos un moderado incremento de estos elementos, que se muestran en las relaciones de 5,3 y 2,1 respectivamente. Para el potasio encontramos un valor altísimo para el incremento de este elemento (relación de 23,5) y para los

nitratos y los fosfatos los incrementos más altos. Es posible remarcar que en los casos de los nitratos y de los fosfatos la desviación típica fue la mayor, debido a que hubo semanas sin la presencia de estos elementos que aparecieron en altas concentraciones otras semanas.

Tabla. 8-4 Factores de fraccionamiento medio y desviaciones típicas de los principales elementos de la precipitación penetrante.

	Ca	Mg	K	CO <sub>3</sub> H	Cl	SO <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub>	PO <sub>4</sub>
Media	5,3	1,4	23,5	201,7	0,9	2,1	1106,4	4607,9
Desviación típica	2,7	1,0	9,6	183,8	0,3	1,2	1511,1	5760,4

### 8.3.1.2.1. LAS FLUCTUACIONES TEMPORALES DE LAS CONCENTRACIONES IÓNICAS Y DEL pH. EL INCENDIO FORESTAL Y LAS INVASIONES DE AIRE DEL SAHARA.

Al igual que en el caso de la precipitación completa existieron dos eventos importantes que cambiaron la concentración de la precipitación penetrante: las invasiones del polvo del Sahara y el incendio forestal. La concentración de los elementos y del pH correspondiente a estos periodos se muestra en la Tabla. 8-5.

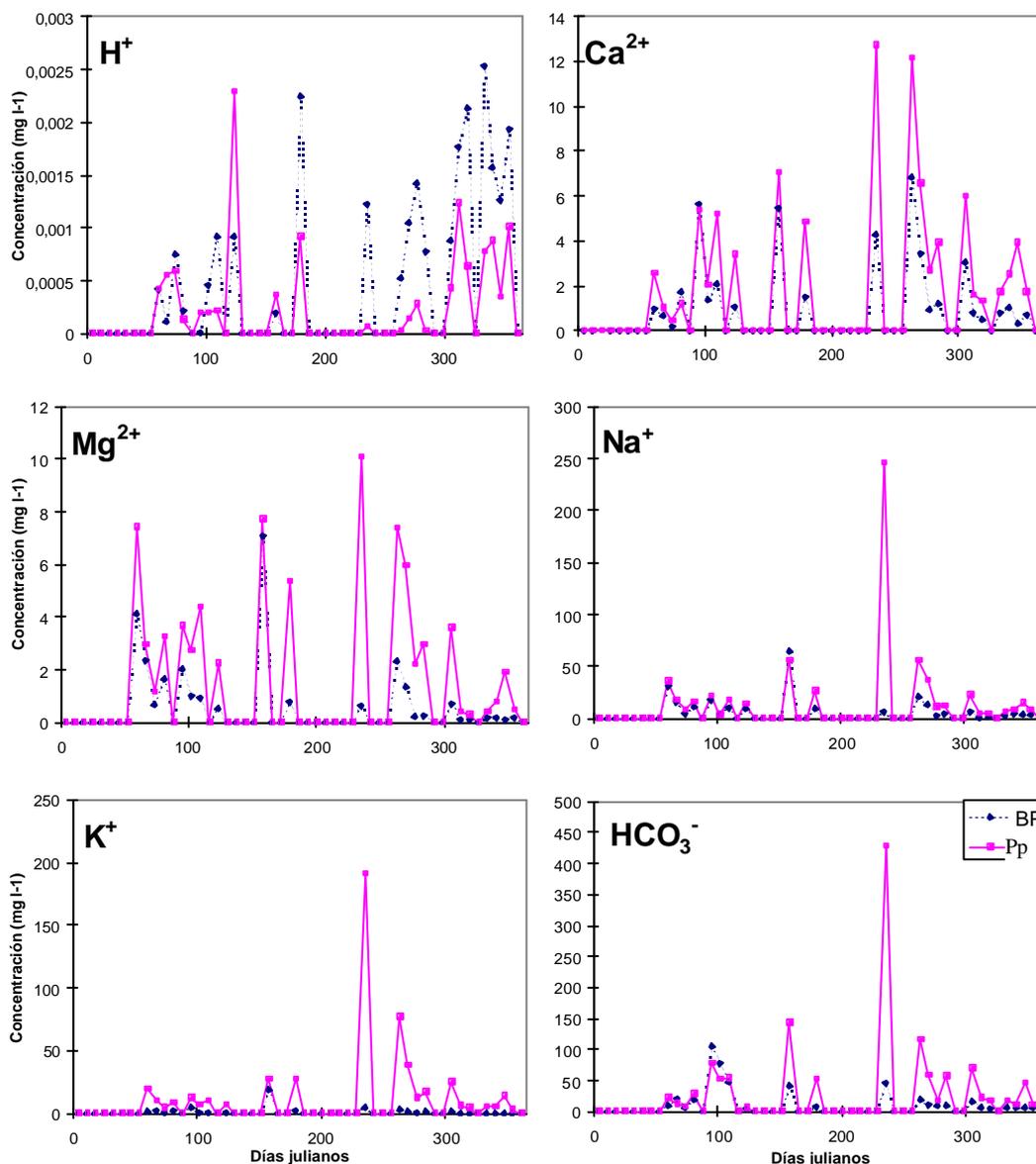


Fig. 8-2 Fluctuaciones temporales de pH y de concentraciones de distintos iones en la precipitación completa (BP, rombos) y la precipitación penetrante (Pp, cuadrados). Nótese la diferencia de escalas en el eje de ordenadas.

Tabla. 8-5 Concentración media de los elementos en la precipitación penetrante ( $\text{mg l}^{-1}$ , medias aritméticas) y concentración media de las semanas tras el incendio y tras la calma, en la precipitación penetrante.

	CE	pH	H	Ca	Mg	Na	K	CO <sub>3</sub> H	Cl	S-SO <sub>4</sub>	N-NO <sub>3</sub>	P-PO <sub>4</sub>	C
Media aritmética	322,9	6,3	5,3E-04	4,1	3,5	29,7	24,4	60,6	46,9	2,7	1,0	1,7	110,1
Semanas incendio	1373,5	7,3	4,5E-05	12,4	8,7	150,9	134,0	272,7	245,1	5,6	2,1	13,7	432,1
Semanas calma	269,0	6,7	2,0E-04	5,4	3,7	21,9	12,6	78,1	29,8	2,8	2,0	0,6	86,8

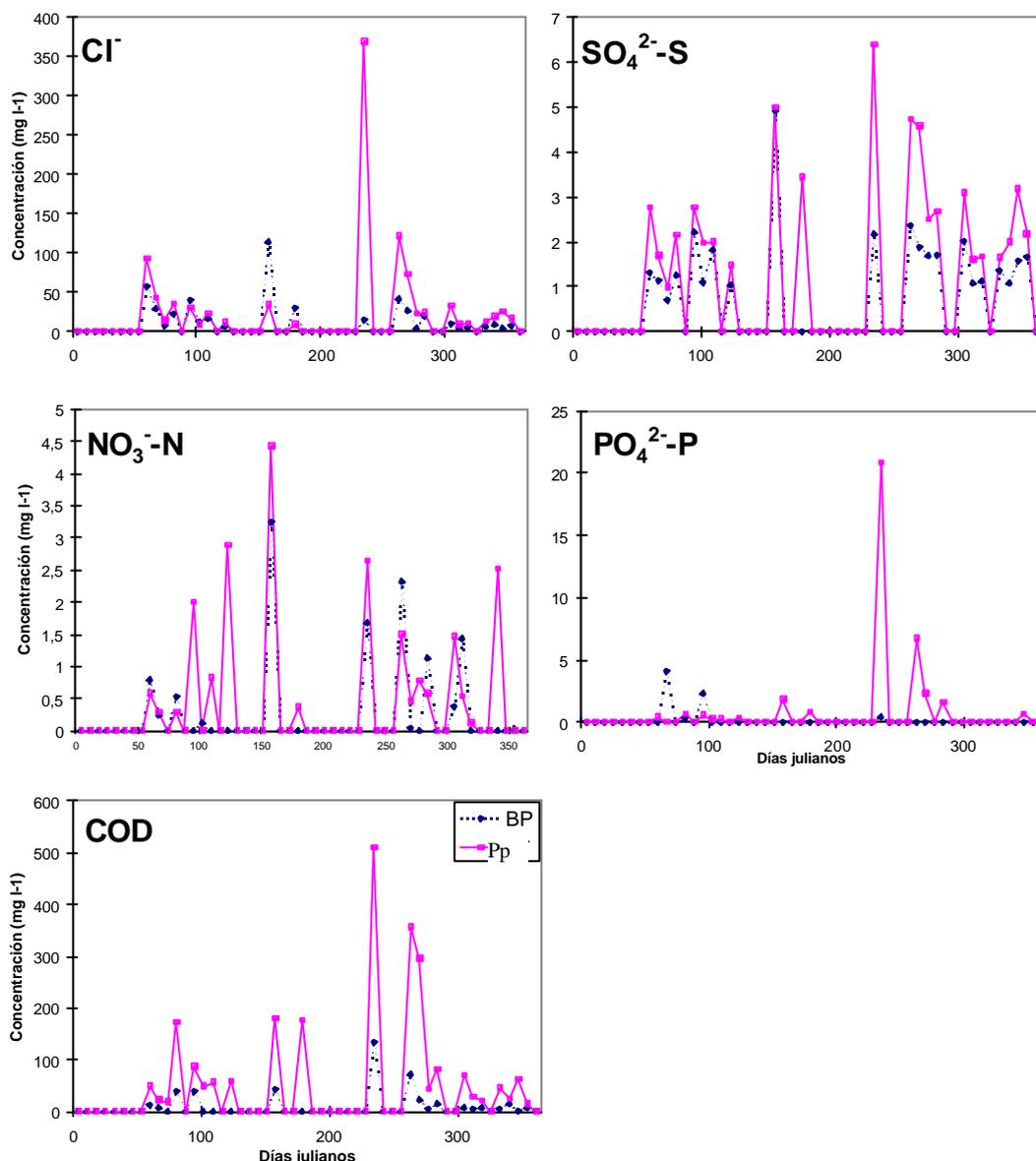


Fig. 8-3 Fluctuaciones temporales de pH y de concentraciones de distintos iones en la precipitación completa (BP, rombos) y la precipitación penetrante (Pp, cuadrados). Nótese la diferencia de escalas en el eje de ordenadas.

Un importante incremento en la concentración de ciertos elementos ocurrió tras el gran incendio forestal ocurrido en las proximidades de la parcela, que produjo grandes cantidades de cenizas, que cubrieron de modo claro y visible la cubierta, afectando la química de la precipitación penetrante en las siguientes semanas que llovió y se lavaron las cenizas. La variación temporal del pH y de la concentración de los diferentes iones se puede apreciar en la Figuras. 8-2 y 8-3. Los elementos que tuvieron un alto incremento fueron: Na, K, CO<sub>3</sub>H, Cl, PO<sub>4</sub> y COD, como podemos observar en dichas figuras. Es posible pensar que este incremento es debido a los pequeños volúmenes recogidos y al largo periodo transcurrido antes de la precipitación.

El evidente patrón existente entre el sodio, el magnesio y los cloruros, y las diferencias en concentración a lo largo del año, en ausencia de un patrón estacional puede ser debido a que durante los periodos secos, las concentraciones de la precipitación completa, y por ello las de la precipitación penetrante son usualmente mayores (este principio es aplicable a todos los elementos)

En cuanto al calcio existe un gran pico correspondiente a la semana posterior al incendio, hay también dos picos correspondientes a las semanas de calima, y por último otro pico correspondiente a la semana que tuvo altos valores de sodio y cloruros, y por ello este no se corresponde a un gran pico de exceso de calcio. Algo similar ocurre al potasio, pero en este caso el gran pico se corresponde con el de los elementos de origen marino, correspondiente a una semana con una gran cantidad de agua recogida. En cuanto al bicarbonato el patrón fue muy similar.

Sin embargo podemos apreciar que para los fosfatos hay un gran pico en una semana que no se contempló por el I.N.M. como una de las semanas de calima, esto puede ser un error de los datos provenientes de I.N.M. o bien el efecto del periodo antecedente sin que lloviera.

En el caso de los nitratos debemos de prestar atención a la alta concentración en la semana correspondiente con el alto pico de elementos de origen marino y un pico secundario tras el incendio. La concentración de los sulfatos fue homogénea a lo largo de año excepto para la semana que se corresponde de nuevo con el alto pico de los elementos de origen marino.

Finalmente el COD fue relativamente homogéneo a lo largo de todo el año excepto la alta concentración medida tras el incendio, originada sin duda por la gran cantidad de cenizas de madera que llegaron a la parcela, debido a la proximidad del incendio.

### 8.3.2. LOS FLUJOS DE ELEMENTOS QUÍMICOS

Los flujos de los elementos químicos de la precipitación penetrante se corresponden con un 146% de los flujos de la precipitación completa y con un 79% de los del flujo bajo cubierta (el otro 21% corresponde al escurrido cortical). Los flujos de nutrientes en la precipitación penetrante son mucho mayores en los bosques tropicales que en los bosques templados (Cole y Rapp, 1981 y Kozlowski y Pallardy, 1997).

Tabla. 8-6 Flujos anuales ( $\text{kg ha}^{-1}$  año) y porcentajes de los mismos durante el año 1995 en la parcela de Agua García

	H	Ca	Mg	Na	K	CO <sub>3</sub> H	Cl	SO <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub>	PO <sub>4</sub>	C
Flujos anuales	1,8E-03	8,8	6,8	47,6	39,4	107,0	84,0	21,8	5,8	4,9	183,4
Porcentaje	0,0	1,7	1,3	9,3	7,7	21,0	16,5	4,3	1,1	1,0	36,0

El COD y el bicarbonato fueron los elementos mayoritarios de la precipitación penetrante (Tabla. 8-6), (35% y 21% del flujo total de nutrientes respectivamente) seguidos de los cloruros (16,5%), así siendo esto igual al escurrido cortical y la precipitación completa, debiendo de prestar atención al incremento del porcentaje de COD en la precipitación penetrante respecto de la completa; siendo el resto de los aniones los sulfatos (4,3%), nitratos (1,1%) y finalmente los fosfatos (1,0%). Entre los cationes el sodio fue el principal (9,3% del total de nutrientes anual) seguido del potasio (7,7%) que tuvo un gran incremento en comparación con el flujo de la precipitación completa, este resultado está de acuerdo con lo postulado por Parker (1983), que afirma que generalmente la precipitación penetrante es la mayor vía de transferencia del potasio, generalmente se incrementa incluso más, y usualmente

más de 10 veces; seguido del calcio y el magnesio (1,7 y 1,3 respectivamente) La cantidad de estos elementos también es mayor que la existente en el escurrido cortical, pero la diferencia es que este último concentra grandes cantidades de agua en la base de los troncos (Capítulo 3), aumentando la disponibilidad de estos elementos a concentrarlos en la zona de las raíces. Sin embargo la precipitación penetrante se constituye como la mayor fracción en cuanto al volumen que moja el suelo del bosque produciendo un importante efecto en la química de los flujos bajo cubierta.

Sin embargo está claro que la precipitación penetrante es generalmente un vector relativamente menor, respecto al desfronde, para la transferencia de fosfatos, calcio y nitratos en los bosques tropicales (Parker, 1983).

Los flujos de cada semana de COD en la precipitación penetrante están fuertemente correlacionados con las cantidades de precipitación y precipitación penetrante (ambos con un coeficiente de correlación con una significación para  $p < 0,001$ ). Los flujos de COD en la precipitación penetrante no estuvieron correlacionados con la acidez de ambas disoluciones al igual que en el caso registrado por Liechty *et al.* (1995).

### 8.3.2.1. CURSO DE LOS FLUJOS IÓNICOS

El porcentaje y cantidades de flujo de nutrientes correspondiente a estos periodos se muestra en la Tabla. 8-7 y las Figuras 7-5 y 7-6. De nuevo hubo dos hechos importantes que modificaron las concentraciones de la precipitación completa. Se debe de prestar especial interés al efecto del incendio, con especial atención al alto porcentaje de Fosfato, el cual fue casi la mitad del flujo anual de fosfato. El porcentaje de los flujos debidos a los eventos de calima es bajo comparado con las altas concentraciones descritas anteriormente, siendo la causa, de acuerdo con Veneklass (1990), que afirma que “durante los periodos secos, las concentraciones de la precipitación completa son usualmente menores, pero al convertir a flujos, son mayores en los periodos de lluvia, debido a los grandes volúmenes de precipitación.

Tabla. 10-7 Porcentajes anuales del flujo de nutrientes de las semanas tras el incendio y en las que acontecieron invasiones de polvo con origen en el Sahara en la precipitación penetrante.

	H	Ca	Mg	Na	K	CO <sub>3</sub> H	Cl	S-SO <sub>4</sub>	N-NO <sub>3</sub>	P-PO <sub>4</sub>	C
%incendio	0,1	11,1	9,3	15,4	20,0	13,1	16,0	5,5	10,4	46,8	16,7
%calima	0,5	4,3	3,9	3,0	2,9	5,1	2,6	3,0	8,3	5,0	3,7

## 8.4. LOS FLUJOS DEL ESCURRIDO CORTICAL. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 8.4.1. COMPOSICIÓN QUÍMICA

Los resultados se presentan como concentraciones medias ponderadas por los volúmenes y como la media aritmética de las concentraciones en la Tabla. 8-8 para cada una de las especies arbóreas existentes en la parcela. Al comparar la media de las concentraciones ponderadas por el volumen con la media aritmética, encontramos que las primeras son mucho menores que las segundas, mucho más que lo encontrado en la precipitación completa y en la precipitación penetrante, esto puede ser debido al efecto de los grandes volúmenes de agua en algunas semanas que supusieron un descenso de las concentraciones de los elementos en esos casos, lo que parece significar un efecto de concentración o de mayor lavado en las semanas con pequeños volúmenes recogidos.

Tabla. 8-8 Concentración media de los elementos en el escurrido cortical de las seis especies estudiadas (media ponderada por el volumen, V.W.M., mg l<sup>-1</sup> y medias aritméticas mg l<sup>-1</sup>). Conductividad eléctrica en μSiemens/cm).

		CE	pH	H	Ca	Mg	Na	K	CO <sub>3</sub> H	Cl	S-SO <sub>4</sub>	N-NO <sub>3</sub>	P-PO <sub>4</sub>	C
<i>E. arborea</i>	Med. aritmét.	332,5	5,2	6,3E-03	7,2	5,1	25,7	21,2	27,6	51,8	4,6	0,9	1,0	150,9
	Desv. típica	258,9	0,7	7,7E-03	8,6	5,0	20,6	14,0	26,2	56,8	3,0	1,0	1,6	154,9
	Sin fuego	277,5	5,2	6,8E-03	5,4	4,4	23,1	19,2	24,1	38,9	4,1	0,8	0,8	106,4
	Sin calima	329,5	5,2	6,6E-03	7,3	5,0	25,4	21,0	24,4	50,6	4,5	0,8	1,0	150,7
	Sin f. Ni c.	271,3	5,1	7,2E-03	5,4	4,4	22,6	18,9	20,4	36,9	4,0	0,8	0,8	103,7
	V.W.M.	120,5	5,1	7,4E-03	1,6	1,5	9,4	9,2	9,8	20,2	2,1	0,3	0,2	50,6
<i>I. canariensis</i>	Med. aritmét.	250,8	6,4	3,6E-04	6,2	3,3	16,3	26,6	57,1	25,6	3,6	0,7	3,6	117,4
	Desv. típica	181,5	0,4	2,6E-04	7,7	2,8	13,9	22,0	38,0	26,5	1,9	0,9	3,6	101,9
	Sin fuego	214,7	6,4	3,8E-04	3,8	2,7	14,7	22,0	49,3	20,1	3,3	0,5	3,4	93,1
	Sin calima	248,5	6,4	3,7E-04	6,3	3,3	16,0	26,5	55,2	25,6	3,6	0,7	3,6	118,3
	Sin f. Ni c.	210,3	6,4	4,0E-04	3,8	2,7	14,2	21,6	46,8	19,8	3,3	0,5	3,3	92,9
	V.W.M.	125,9	6,5	3,2E-04	1,9	1,2	9,0	14,9	29,2	12,2	2,5	0,3	2,1	51,3
<i>I. perado</i>	Med. aritmét.	350,0	6,5	3,2E-04	9,8	5,8	21,8	29,6	62,9	47,1	5,1	0,7	0,9	132,8
	Desv. típica	230,8	0,4	2,5E-04	11,8	5,3	17,3	21,9	38,3	50,4	3,5	0,9	1,5	121,2
	Sin fuego	308,7	6,5	3,2E-04	6,9	5,1	18,4	26,6	61,1	34,4	4,5	0,5	0,7	102,6
	Sin calima	348,9	6,5	3,3E-04	10,0	5,9	21,9	30,0	57,9	47,8	5,2	0,7	1,0	130,6
	Sin f. Ni c.	305,3	6,5	3,4E-04	7,0	5,2	18,3	26,9	55,5	34,5	4,6	0,5	0,7	98,5
	V.W.M.	145,4	6,4	4,4E-04	2,1	1,1	7,7	20,4	27,9	16,7	2,8	0,2	0,1	45,2
<i>L. azorica</i>	Med. aritmét.	218,4	6,3	5,2E-04	6,5	2,9	10,9	20,7	51,3	30,3	2,8	0,8	0,4	65,3
	Desv. típica	160,3	0,6	6,8E-04	7,5	2,9	7,3	21,8	45,1	27,0	2,1	1,7	0,6	82,5
	Sin fuego	183,6	6,3	5,5E-04	4,9	2,3	9,8	15,1	46,2	25,1	2,2	0,8	0,3	42,2
	Sin calima	217,0	6,3	5,4E-04	6,6	2,9	10,8	21,0	49,0	30,7	2,8	0,8	0,4	66,5
	Sin f. Ni c.	180,3	6,2	5,8E-04	4,9	2,2	9,6	15,1	43,4	25,3	2,2	0,7	0,3	42,5
	V.W.M.	94,2	6,1	8,0E-04	2,2	1,0	5,8	7,7	22,1	14,6	1,7	0,3	0,1	19,0
<i>M. faya</i>	Med. aritmét.	470,3	4,5	3,2E-02	8,7	6,0	33,7	10,7	56,6	78,8	4,5	1,7	2,0	177,2
	Desv. típica	408,3	1,2	4,7E-02	9,4	6,0	21,0	9,5	112,7	79,3	3,6	2,6	4,2	172,2
	Sin fuego	439,3	4,5	3,1E-02	7,1	5,3	32,3	8,8	58,8	72,2	4,6	1,3	1,4	136,2
	Sin calima	463,6	4,5	3,3E-02	8,7	6,1	32,9	10,4	49,7	77,4	4,5	1,5	2,0	178,1
	Sin f. Ni c.	430,2	4,5	3,3E-02	7,0	5,3	31,4	8,4	51,3	70,3	4,6	1,0	1,4	135,9
	V.W.M.	121,3	4,6	2,5E-02	1,8	1,5	13,5	2,4	5,5	21,5	2,1	0,3	0,0	54,0
<i>P. indica</i>	Med. aritmét.	230,9	6,4	4,0E-04	4,0	2,6	12,2	24,8	55,6	33,6	2,4	0,7	1,3	87,5
	Desv. Típica	249,2	0,4	2,9E-04	5,0	3,2	10,1	21,8	63,7	37,0	1,3	1,2	3,2	123,3
	Sin fuego	165,7	6,4	4,2E-04	2,8	1,8	10,8	20,0	41,2	23,9	2,0	0,5	0,6	53,4
	Sin calima	230,6	6,4	4,1E-04	4,0	2,6	12,1	25,1	53,7	34,7	2,4	0,5	1,3	90,5
	Sin f. Ni c.	161,9	6,4	4,4E-04	2,8	1,8	10,7	20,1	38,4	24,6	2,0	0,2	0,6	55,0
	V.W.M.	70,6	6,2	6,3E-04	0,7	0,4	5,1	9,2	17,9	11,7	1,4	0,1	0,1	20,6

La conductividad eléctrica varío entre especies del siguiente modo: *M.faya*>*I.perado*>*E.arborea*>*I.canariensis*>*P.indica*>*L.azorica* este patrón es muy similar a registrado anteriormente para las relaciones de encauzamiento, y puede significar de nuevo que las grandes cantidades de precipitación en algunas semanas pueden suponer un descenso de las concentraciones de los elementos en esos casos. El análisis de varianza para la conductividad eléctrica para una p<0,05 mostró diferencias significativas para *M.faya* y *L.azorica*, y para *M.faya* y *P.indica* a lo largo del año de medición; lo cual significa que independientemente de la precipitación completa existen diferencias en las conductividades entre estas especies.

Utilizando las concentraciones medias ponderadas por los volúmenes, los cationes variaron del siguiente modo: para *E.arborea* y *M.faya* Na>K>Ca>Mg>H, la misma que la precipitación penetrante, y para el resto de las especies K>Na>Ca>Mg>H pudiendo observar un incremento de potasio, el elemento más lavable, estos datos están en consonancia con los registrados por Crockford *et al.* (1996b), que afirmaron que la composición del escurrido cortical estaba dominada por el potasio. Debemos de prestar atención al hecho de que las dos especies *M.faya* y *E.arborea* son las especies con el menor tamaño de hoja (pudiendo recoger mayor cantidad de deposición seca) y las pioneras en este ecosistema. Las causas de estos cambios en las concentraciones y las propiedades de la precipitación penetrante están derivadas de las sustancias lavadas desde las hojas y las cortezas (Torii y Kiyaro, 1992; en Inagaki *et al.*, 1995).

La alta tasa de lavado de todas las especies, es lógica de acuerdo con Köhl *et al.* (1996), el potasio es el único catión que en las hojas de los árboles de laurisilva tiene un descenso de las hojas jóvenes a las maduras, lo que claramente es señal de un lavado que tiene que ser detectado en los flujos bajo cubierta. Además el contenido en potasio foliar de *M.faya* (media < 200 mmol kg p.s.<sup>-1</sup>, en hojas jóvenes y maduras) es mucho menor que el de *I.perado*, *I.canariensis* y *L.azorica* (media > 200 mmol kg p.s.<sup>-1</sup>, en hojas jóvenes y maduras, incluso > 500 mmol kg p.s.<sup>-1</sup>, en hojas jóvenes de *I.canariensis*) lo que puede ser la razón de la diferente secuencia catiónica; ahondando en esta diferencia la tasa de reducción de la concentración de potasio de hojas jóvenes a hojas adultas de concentración de potasio es menor para *M.faya* que para de *I.perado*, *I.canariensis* y *L.azorica*, lo que también conllevaría a concluir que una menor pérdida de concentración teniendo una menor concentración inicial se traduce como una menor cantidad de potasio lavado y lógicamente menor cantidad detectada en el escurrido cortical. No obstante la movilidad del potasio en el floema puede ser otra causa para el descenso del potasio foliar sin que este haya de ser atribuido al lavado, o posiblemente puedan ser ambas causas a un mismo tiempo.

El calcio sin embargo sólo se transporta por el xilema en dirección ascendente por la corriente de transpiración sin posibilidad de retorno posterior vía floema, es por ello por lo que tiende a concentrarse en las hojas adultas posibilitando el lavado desde las mismas, siendo no obstante las concentraciones en las hojas menores a las del potasio, de manera ostensible en las hojas jóvenes con tendencia a igualarse en las hojas maduras, lo que podría explicar la mayor concentración en el escurrido cortical del potasio que del calcio. La secuencia también se vería apoyada en el hecho de que el magnesio presenta menor contenido foliar que el calcio y el potasio sin superar en ninguna especie ni en hojas jóvenes ni maduras como media los 200 mmol kg p.s.<sup>-1</sup>. No obstante la diferencia con respecto de la precipitación completa de la secuencia de cationes sólo es por el incremento en potasio, no pudiendo afirmarse que el orden de la secuencia se deba enteramente al lavado de los cationes.

Los aniones variaron del siguiente modo: para *E.arborea* y *M.faya* Cl>HCO<sub>3</sub>>SO<sub>4</sub>>NO<sub>3</sub>>PO<sub>4</sub>, esta secuencia está en estrecha consonancia a la de los cationes, en ambos casos en sodio y los cloruros son los primeros, pudiendo ser la explicación de que debido a la morfología de las dos especies estas sean capaces de retener mayor cantidad de aerosoles marinos que el resto de las especies. Para el resto de las especies la secuencia tomó el siguiente orden: HCO<sub>3</sub>>Cl>SO<sub>4</sub>>NO<sub>3</sub>>PO<sub>4</sub>, excepto para el *I.canariensis* en donde el PO<sub>4</sub> tiene mayor concentración que los NO<sub>3</sub>. No se encontró presencia de Al, Fe ni Si para ninguna de las especies estudiadas, estos elementos se presentan bajas concentraciones foliares (Köhl *et al.*, 1996), sin sobrepasar el hierro los 10 mmol kg p.s.<sup>-1</sup>, y el aluminio los 20 mmol kg p.s.<sup>-1</sup>, que aunque relativamente alta no es comparable en términos absolutos a los macronutrientes, a efectos del lavado cortical, por lo que lo que no fueron detectados en el escurrido cortical, ya que tampoco provienen de la precipitación completa.

Hay que prestar atención a los altos valores de los nitratos para la especie *M.faya*, y hay que denotar, que esta especie puede estar ectomicorizada y además probablemente pueda fijar N<sub>2</sub> por asociación con actinomicetes en nódulos radicales. Este hecho seguramente le permita disminuir la eficiencia en el uso de los nitratos en comparación con el resto de las especies. Este comportamiento concuerda con los datos registrados de fijación de nitrógeno en el archipiélago de Hawaii por esta planta con valores cercanos a 18 kg ha<sup>-1</sup> año (Vitousek & Walker, 1989), convirtiendo a esta especie en una "bomba de nitrógeno".

No obstante, hay que reseñar el hecho de los altos contenidos en Aluminio presentes en el género *Ilex*, llegando en ambas a los 20 mmol kg p.s.<sup>-1</sup>, y el hecho de que en el *I.canariensis* se den altas concentraciones de fosfatos, ya que en los suelos con propiedades ándicas como el presente en la parcela de estudio el aluminio y el fósforo se complejan frecuentemente, el aluminio tiende a acumularse en las hojas adultas con una concentración que duplica la de las hojas jóvenes, y es posible que se deba a la posibilidad de que estas plantas adquieran conjuntamente

fósforo y aluminio, que al ser menos lavable se acumule, y el fósforo sea lavado desde las superficies de estas plantas.

Los valores de pH como media aritmética y media ponderada por el volumen se pueden observar en la Tabla. 8-8, para *M.faya* y *E.arborea* de nuevo este pH fue menor, que el medido en la precipitación completa y la precipitación penetrante; pudiendo sugerir los menores valores de pH la presencia de ácidos orgánicos que son aportados por las cortezas y la cubierta, cambiando la química del escurrido cortical (Edmonds *et al.*, 1988; Torii y Kiyaro (1992) en Inagaki *et al.* 1995), las sustancias orgánicas pueden tener una relación con los ácidos fuertes e influir en la acidez del escurrido cortical de forma indirecta. Sin embargo el bajo pH puede ser atribuido al lavado de las sustancias provenientes de la deposición seca desde las hojas de estas especies, que son para ambas especies de superficie pequeña, aumentándose por ello la rugosidad de las copas de estas especies; esta posibilidad para otras especies fue registrada por Baba *et al.* (1995). Hay que destacar que estas dos especies son las pioneras y las primeras en implantarse, lo que conlleva que se asentarían en suelos poco evolucionados, la capacidad de producir estos bajos pH engendraría una mayor aceleración de la edafogénesis con una ventaja en los estadios primarios de la sucesión que podría ser aprovechada posteriormente por el resto de las especies.

El resto de las especies están en el mismo rango, o a veces mayor, como las dos especies del género *Ilex*. Las causas del descenso de la concentración de protones serán examinadas posteriormente, a través de los flujos netos bajo cubierta, pero probablemente se deben al intercambio catiónico sobre las superficies de las hojas.

La concentración del COD en el escurrido cortical fue como media ponderada por el volumen para *E.arborea* 50,6 mg l<sup>-1</sup>, para *I.canariensis* 51,3 mg l<sup>-1</sup>, para *I.perado* 45,2 mg l<sup>-1</sup>, para *L.azorica* 19,0 mg l<sup>-1</sup>, para *M.faya* 54,0 mg l<sup>-1</sup> y para *P.indica* 20,6 mg l<sup>-1</sup>, siempre menores que en la precipitación penetrante, sin embargo como podemos observar en la Tabla 8-8 las medias aritméticas son mayores que las obtenidas en la precipitación penetrante, en consonancia con lo registrado por Inagaki *et al.* (1995), y es mucho mayor que en la precipitación completa, tomando valores máximos, de nuevo en el caso de la *M.faya* 177,2 mg l<sup>-1</sup> y de *E.arborea* 150,9 mg l<sup>-1</sup>; de nuevo esta gran diferencia entre las dos medias se deba al efecto del referido incendio forestal.

Como ya se apuntó anteriormente el transporte de carbono orgánico disuelto (COD) en la precipitación penetrante y soluciones del suelo del bosque es un mecanismo importante para ciclar de C, N, y P desde la biomasa aérea al suelo y además cumple una importante labor en el lavado de cationes (Liechty *et al.* 1995).

Tabla. 8-9 Medias aritméticas de los principales elementos en la precipitación penetrante (mg l<sup>-1</sup>) y precipitación (Prec.) en mm. (0) Neal *et al.* (1994) (1) Crockford *et al.* (1996a) (2) Inagaki *et al.* (1995), original microeq/l. (3) Strigel *et al.* (1994) Original T/km<sup>2</sup>.

	Prec.	H	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO <sub>4</sub> -S	NO <sub>3</sub> -N	PO <sub>4</sub> -P
<i>Fagus sylvatica</i> Inglaterra (0)	800	6,4E-02	2,8	1,4	9,7	7,0	17,7	5,9	1,1	0,02
<i>E.rossii</i> Australia (1)		3,2E-04	0,5	0,9	0,7	3,7				
<i>E. mannifera</i> Australia (1)		1,0E-02	0,7	1,6	0,7	7,3				
<i>E.macrorhyncha</i> Australia (1)		5,0E-02	0,8	1,1	1,2	6,8				
<i>E.melliodora</i> Australia (1)		7,9E-02	2,3	3,7	0,8	9,3				
Japan <i>Castanopsis cuspidata</i> (2)	1968	2,1E-02	1,0	0,4	0,9	2,8	4,0	1,6	0,3	
Butkit Soeharto, Indonesia (3)	2465	1,3E-04	1,4	0,9	0,5	2,4				0,1
Lempake, Indonesia (3)	2030	5,0E-05	1,3	0,1	0,5	2,7				0,1

Podemos comparar estos resultados con el de otros árboles existentes en bosques de laurisilva, frondosas caducas o de frondosas siempreverdes subtropicales similares al estudiado en la Tabla. 8-9. Podemos observar cómo todos los valores son similares a excepción de las altas cantidades de Na y Cl detectadas en el bosque de estudio, posiblemente

debidas a su cercanía a la costa y las altas cantidades de potasio. En las especies estudiadas en Japón la conductividad eléctrica varió entre 39,3 y 69,5  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y el COD entre 7,1 y 12,3, las abultadas diferencias pueden ser debidas a las diferencias en los volúmenes recogidos que al ser mayores ejercen un descenso en la concentración de las diferentes especies.

Aplicamos un análisis de varianza entre las diferentes especies con el fin de encontrar diferencias significativas entre las concentraciones de los elementos analizados, posteriormente aplicamos un test *post hoc* de rango múltiple de *Tuckey-Honestly Significant Difference*, con una significación para la prueba de un nivel de  $p \leq 0,05$ , encontrando diferencias significativas y formándose los siguientes subgrupos de especies para cada elemento:

#### **Protones**

Existieron diferencias significativas entre la especie *M.faya* y el resto de las especies.

#### **Sodio**

Existieron tres subgrupos, el primero compuesto por *L.azorica*, *P.indica*, *I.canariensis* e *I.perado*; el segundo por *P.indica*, *I.canariensis*, *I.perado* y *E.arborea* y finalmente el tercer subgrupo formado por *I.perado*, *E.arborea* y *M.faya*.

#### **Potasio**

Existieron dos subgrupos, el primero compuesto por *M.faya*, *L.azorica*, *E.arborea*, *P.indica* e *I.canariensis*; y el segundo por *L.azorica*, *E.arborea*, *P.indica*, *I.canariensis* e *I.perado*. Las causas de la baja concentración de potasio pueden ser debidas a que a bajos pH el potasio se insolubiliza, y como hemos visto anteriormente la *M.faya* es la especie con el pH más bajo en el escurrido cortical de todas las estudiadas, pudiendo de este modo disminuir el pH de la zona cercana a sus raíces y dificultando de este modo, la disponibilidad de potasio para esta especie.

#### **Cloruros**

De nuevo se formaron dos subgrupos, el primero de ellos formado por *I.canariensis*, *L.azorica*, *P.indica*, *I.perado*, y *E.arborea* y el segundo formado por *I.perado*, *E.arborea* y *M.faya*.

#### **Sulfatos**

Una vez más se formaron dos subgrupos, el primero de ellos formado por *P.indica*, *L.azorica*, *I.canariensis*, *E.arborea* y *M.faya* y el segundo formado por *L.azorica*, *I.canariensis*, *E.arborea*, *M.faya* e *I.perado*.

#### **Nitratos**

Existieron diferencias significativas entre la especie *M.faya* y el resto de las especies.

#### **Fosfatos**

Una vez más se formaron dos subgrupos, el primero de ellos formado por *L.azorica*, *I.perado*, *E.arborea*, *P.indica* y *M.faya* y el segundo formado por *P.indica*, *M.faya* e *I.canariensis*.

Las diferencias pueden ser atribuibles principalmente a tres factores, el primero de ellos el efecto de las superficies de las copas en capturar partículas atmosféricas, aerosoles y gases con mayor eficiencia por parte de algunas especies; el segundo la diferencia entre las especies de la cantidad de materiales minerales lavados de los tejidos de los vegetales, como los exudados y productos de descomposición denominados deposición interna; y finalmente el tercero de los el efecto de las diferencias en interceptación y la capacidad de encauzamiento de las diferentes especies, permitiendo la concentración de los elementos en el agua que escurre por los troncos.

El primer factor puede ser debido a la principal diferencia entre las dos especies diferentes y el resto, el tamaño de la hoja: *E.arborea* con una media aproximada de 0,08  $\text{cm}^2$  (Ruiz de la Torre, 1979) y *M.faya* con 17,19  $\text{cm}^2$  (Morales *et al.* 1996), siendo el resto de las hojas mayores tales como *I.canariensis* 22,95  $\text{cm}^2$ , *I.perado* 54,20  $\text{cm}^2$  (Bañares y Barquín, 1982), *L.azorica* 27,04

cm<sup>2</sup> y *P.indica* cm<sup>2</sup> (Morales *et al.* 1996); y como otro factor la rugosidad del tronco, mayor de nuevo para las dos especies con gran diferencia respecto al resto de las especies. La superficie de la hoja puede variar el área de contacto de la copa de las especies, así Inagaki *et al.* (1995) encontraron mayores concentraciones de COD en las especies de coníferas que en las especies de frondosas, estando este hecho de acuerdo con las superficie de contacto. Crockford *et al.* (1996a) sugirieron que el tipo de corteza aparece como el gran responsable de las diferencias de concentraciones de cationes en el escurrido cortical para diferentes especies del género *Eucalyptus* y para el *Pinus radiata*.

Los elementos macronutrientes que son esenciales para el metabolismo y crecimiento de las plantas, como el calcio (fundamental importancia para la permeabilidad de la membrana y el transporte de iones), el magnesio (constituyente de la clorofila y se comporta comúnmente como un activador de las enzimas envueltas en el metabolismo energético) o el potasio (activador de las enzimas que controlan la osmoregulación y las relaciones hídricas de las plantas). El uso eficiente de estos nutrientes para la producción primaria de las plantas es una adaptación que presumiblemente confiere a las plantas que la poseen una capacidad adaptativa en suelos con características limitantes (Birk y Vitousek, 1986), de modo que si las diferencias son debidas a el lavado de exudados las especies que pierden grandes cantidades de elementos vía escurrido cortical, en caso de que el elemento sea limitante, tendrán una serie desventaja a la hora de la competición respecto de otras que no pierdan grandes cantidades de esos elementos. No obstante si las diferencias fueran debidas a una mayor capacidad de atrapar partículas de la deposición seca, las especies que mayores cantidades de elementos fueran capaces de enviar a la base de sus troncos tendrían una ventaja sobre las otras especies.

#### 8.4.1.1. PARÁMETROS DE CALIDAD

De nuevo como en los casos anteriores se asume que los usuales iones inorgánicos son: H<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup> y Ca<sup>2+</sup>, y los aniones: HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> y SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> que constituyen casi toda la carga iónica del escurrido cortical.

Los diferentes criterios de calidad de los parámetros se recogen en la Tablas. 8-11 a 8-16 y la Fig. 8-4.

La concordancia entre suma de aniones y cationes con la conductividad eléctrica es menos buena que en el caso de la precipitación penetrante, encontrándose mayor dispersión de datos para los aniones; y en el caso de *M.faya* y *P.indica*, también para los cationes. La suma de aniones es superior a la suma de cationes, excepto en la *E.arborea* que presenta un balance iónico ajustado.

Destacamos que las aguas de escurrido permanecieron coloreadas después de la filtración por Millipore, por lo que posiblemente se hayan podido valorar aniones orgánicos

Tabla.8-11 Parámetros de calidad de los análisis de la especie *E.arborea*.

	S <sup>-</sup>	S <sup>+</sup>	CBD	ANC	Ri	B <sub>i</sub>
Media aritmética	2,4	2,4	-0,1	0,9	1,1	-1,1
Desviación típica	2,1	2,0	1,1	1,3	0,4	19,7
Mediana	1,6	2,0	0,0	0,3	1,0	-0,3
Máximo	7,2	6,9	3,0	3,8	1,7	26,6
Mínimo	0,4	0,2	-2,1	-0,9	0,4	-47,5
Media ponderada por V.	0,0	0,9	-0,8	0,1	0,0	-96,8

Tabla. 8-12 Parámetros de calidad de los análisis de la especie *I.canariensis*.

	S <sup>-</sup>	S <sup>+</sup>	CBD	ANC	Ri	B <sub>i</sub>
Media aritmética	2,3	2,0	0,3	0,6	1,3	10,5
Desviación típica	1,5	1,6	0,5	1,1	0,4	12,6
Mediana	2,0	1,2	0,2	0,4	1,2	7,4
Máximo	6,8	6,2	1,7	3,8	2,5	43,5
Mínimo	0,7	0,5	-0,4	-2,0	0,9	-7,9
Media ponderada por V.	0,0	0,1	-0,1	0,0	0,0	-96,2

Tabla. 8-13 Parámetros de calidad de los análisis de la especie *I.perado*.

	S <sup>-</sup>	S <sup>+</sup>	CBD	ANC	Ri	B <sub>i</sub>
Media aritmética	2,8	2,7	0,2	1,4	1,1	4,2
Desviación típica	2,0	2,0	0,7	1,2	0,3	11,4
Mediana	2,2	2,0	0,1	1,2	1,1	2,9
Máximo	7,5	8,2	1,9	4,5	1,9	32,0
Mínimo	0,5	0,4	-1,2	0,0	0,7	-17,9
Media ponderada por V.	0,0	1,0	0,1	0,4	0,0	-99,9

Tabla. 8-14 Parámetros de calidad de los análisis de la especie *L.azorica*.

	S <sup>-</sup>	S <sup>+</sup>	CBD	ANC	Ri	B <sub>i</sub>
Media aritmética	2,0	1,6	0,4	0,8	1,5	14,4
Desviación típica	1,3	1,3	0,6	1,0	0,7	15,6
Mediana	1,7	1,3	0,2	0,5	1,2	10,7
Máximo	5,8	5,9	2,1	3,4	3,9	59,6
Mínimo	0,4	0,3	-0,3	-0,6	0,9	-5,2
Media ponderada por V.	0,0	0,6	0,3	0,1	0,0	-91,0

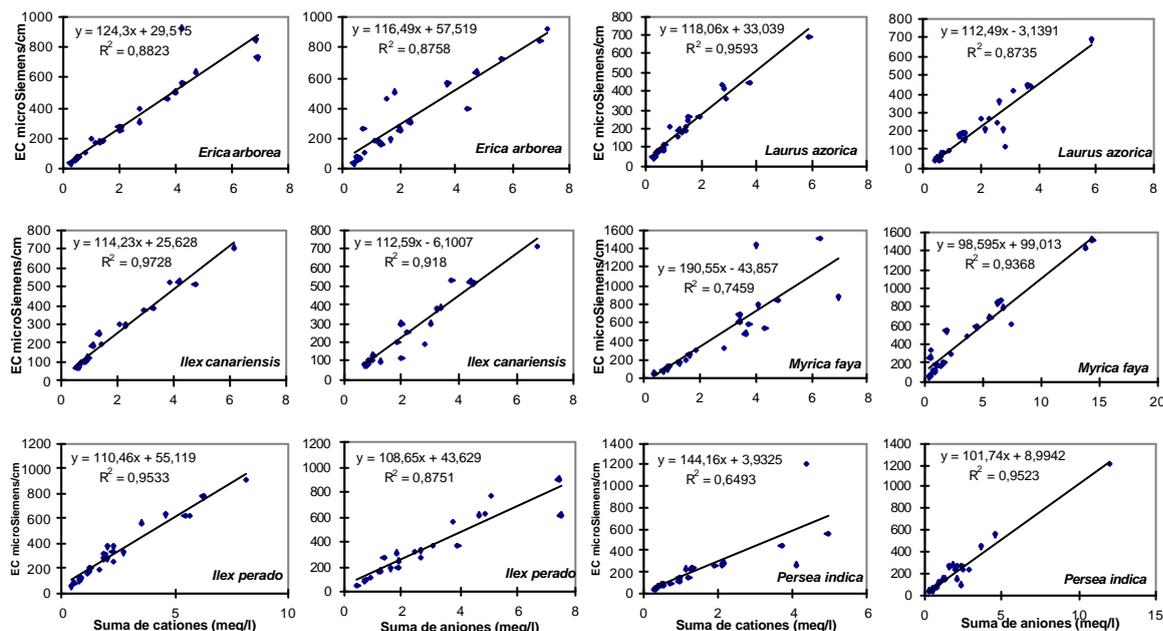


Fig. 8-4 Correlación entre la suma de cationes y la conductividad eléctrica, y la correlación entre la suma de aniones y la conductividad eléctrica para las especies presentes en la parcela.

Tabla. 8-15 Parámetros de calidad de los análisis de la especie *M.faya*.

	S <sup>-</sup>	S <sup>+</sup>	CBD	ANC	Ri	B <sub>i</sub>
Media aritmética	3,8	2,7	1,1	0,3	1,2	2,8
Desviación típica	4,0	1,9	2,9	1,6	0,7	27,2
Mediana	1,8	2,4	0,1	0,1	1,1	5,1
Máximo	14,4	7,0	9,8	3,7	3,4	54,9
Mínimo	0,4	0,4	-2,4	-4,2	0,2	-65,2
Media ponderada por V.	0,0	0,8	-0,1	0,2	0,0	-96,8

Tabla. 8-16 Parámetros de calidad de los análisis de la especie *P.indica*.

	S <sup>-</sup>	S <sup>+</sup>	CBD	ANC	Ri	B <sub>i</sub>
Media aritmética	2,2	1,6	0,6	0,4	1,5	15,7
Desviación típica	2,4	1,4	1,7	1,1	0,7	19,8
Mediana	1,8	1,1	0,2	0,2	1,4	18,3
Máximo	12,0	4,9	7,6	3,0	3,2	52,2
Mínimo	0,3	0,3	-2,0	-2,7	0,5	-33,0
Media ponderada por V.	0,0	0,5	0,2	0,1	0,0	-94,1

#### 8.4.1.2. EXCESO DE ELEMENTOS

Para la interpretación de estos análisis del escurrido cortical y para vislumbrar cuáles son las fuentes suplementarias, el cálculo de las ganancias de elementos “no marinos” en el escurrido cortical permitiendo en principio eliminar las partículas derivadas del mar.

Ya que el sodio es elemento más inerte a través de la cubierta (Ferm y Hultberg, 1995a y b) se utilizó como trazador para comparar las relaciones iónicas del escurrido cortical con los de la precipitación completa. Sin embargo, es posible encontrar contaminación por sodio debida probablemente a partículas de polvo de los suelos continentales en climas áridos (como polvo eólico de origen sahariano transportado por el Siroco a través del océano) (Fowler, 1980; Nativ e Issar, 1983; Sequeira, 1991)

Para el año de estudio la relación media (equivalentes) entre los principales elementos y el sodio están en la Tabla. 8-17.

Tabla. 8-17 Medias (meq/l), desviaciones típicas del exceso de elementos utilizando el Na<sup>+</sup> como trazador, y el porcentaje del exceso sobre la cantidad total del elemento, para cada una de las especies de la parcela.

		Ca	Mg	K	CO <sub>3</sub> H	Cl	SO <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub>	PO <sub>4</sub>
<i>E.arborea</i>	Media	0,31	0,16	0,52	0,45	0,16	0,15	0,06	0,10
	Desviación típica	0,40	0,25	0,34	0,43	1,17	0,11	0,07	0,16
	% sobre BP	85,8	37,8	95,6	98,8	10,6	52,5	99,9	100,0
<i>I.canariensis</i>	Media	0,28	0,11	0,67	0,93	-0,11	0,14	0,05	0,35
	Desviación típica	0,37	0,14	0,55	0,62	0,72	0,06	0,06	0,35
	% sobre BP	89,5	39,5	97,8	99,6	-14,9	61,8	99,9	100,0
<i>I.perado</i>	Media	0,45	0,26	0,74	1,03	0,22	0,21	0,05	0,09
	Desviación típica	0,56	0,30	0,55	0,63	0,86	0,13	0,06	0,15
	% sobre BP	91,2	53,9	97,3	99,5	16,7	64,2	99,9	100,0
<i>L.azorica</i>	Media	0,30	0,13	0,52	0,84	0,30	0,12	0,06	0,04
	Desviación típica	0,37	0,17	0,55	0,74	0,46	0,11	0,12	0,06
	% sobre BP	93,4	54,1	98,1	99,7	35,1	67,3	99,9	100,0
<i>M.faya</i>	Media	0,37	0,16	0,24	0,92	0,51	0,10	0,12	0,20
	Desviación típica	0,44	0,36	0,23	1,84	1,66	0,16	0,18	0,41
	% sobre BP	84,6	32,0	88,5	99,2	23,0	37,1	99,9	100,0
<i>P.indica</i>	Media	0,18	0,09	0,62	0,91	0,33	0,08	0,05	0,13
	Desviación típica	0,24	0,20	0,55	1,04	0,82	0,07	0,09	0,31
	% sobre BP	88,0	41,9	98,2	99,7	34,7	56,3	99,9	100,0

Para el calcio se observó exceso en todas las especies, los valores representados como medias variaron entre 84,6% y 93,4%, lo que significa un gran incremento en comparación con la precipitación completa y la precipitación penetrante; evidenciando una gran influencia del polvo del suelo o del lavado de cubierta sobre el escurrido cortical.

Para el magnesio, también se observa un exceso en todas las especies, con valores que representados como las medias variaron entre 32,0% y 54%, significando de nuevo un gran incremento respecto de la precipitación completa y la precipitación penetrante, ya que ambas tuvieron valores negativos.

Para el potasio también observamos exceso para todas las especies, con valores que representados como la media variaron entre 88,5% y 98,2%, todos los valores fueron similares excepto los obtenidos para la especie *M.faya* (88,5%), y muy similares a los obtenidos para la precipitación penetrante (95,6%), sin embargo e incluyendo a la *M.faya* observamos un incremento en relación con la precipitación completa; lo que puede significar de nuevo una gran influencia del polvo del suelo o del lavado de cubierta sobre el escurrido cortical, de acuerdo esto último con la propiedad de lavable del K.

Para los cloruros obtuvimos un déficit para *I.canariensis* representado como valor medio un -14,9% muy parecido al -14,3% de la precipitación penetrante; que comparados con los valores positivos de exceso de cloruros en la precipitación completa, nos permite pensar en una toma por parte de la vegetación.

El exceso de sulfatos vario con valores medios entre 37,1% y 67,3%, de nuevo existió un gran incremento en comparación con el 8,3% de SO<sub>4</sub> en la precipitación penetrante, muy parecido al valor obtenido para la precipitación completa.

Y finalmente los excesos de nitratos y fosfatos representaron como valores medios 99,9 y 100,0 de NO<sub>3</sub> y PO<sub>4</sub>, respectivamente, en el escurrido cortical, siendo los mismos valores que en la precipitación completa y la precipitación penetrante.

Los factores de fraccionamiento están relativizados respecto de sodio (FNa), y se muestran en la Tabla 8-18 como valores medios y desviaciones típicas.

Tabla. 8-18 Factores de fraccionamiento medio y desviaciones típicas de los principales elementos del escurrido cortical para cada una de las especies.

		Ca	Mg	K	CO <sub>3</sub> H	Cl	SO <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub>	PO <sub>4</sub>
<i>E.arborea</i>	Media	6,3	1,4	27,1	112,5	1,1	2,7	810,9	5364,0
	Desv. típica	4,5	0,9	14,5	150,1	0,6	1,3	937,0	7323,6
<i>I.canariensis</i>	Media	11,1	1,6	47,5	334,1	1,0	3,4	912,1	33066,8
	Desv. típica	8,7	0,9	12,3	187,5	0,5	1,3	1440,9	44453,7
<i>I.perado</i>	Media	10,7	1,9	48,0	272,8	1,1	3,3	744,4	5986,3
	Desv. típica	6,0	1,0	31,3	144,1	0,5	1,1	1007,7	8425,6
<i>L.azorica</i>	Media	16,6	1,8	49,5	433,6	1,5	3,7	2598,1	7413,9
	Desv. típica	17,8	1,1	22,8	453,6	0,7	1,7	6405,0	19300,7
<i>M.faya</i>	Media	6,2	1,3	8,4	110,3	1,2	1,7	1092,3	8569,8
	Desv. típica	5,5	0,9	7,2	243,5	0,7	0,8	1897,9	21589,7
<i>P.indica</i>	Media	7,7	1,3	58,9	385,8	1,5	3,2	1302,3	11247,0
	Desv. típica	5,9	1,0	22,3	231,5	0,8	1,7	2279,0	21016,0

Para el Ca encontramos una gran variación, con factores de fraccionamiento que variaron entre 6,2 a 16,6, siendo de nuevo los menores incrementos para *E.arborea* y *M.faya*, con valores muy similares a los obtenidos para la precipitación completa.

Para el Mg tuvimos valores que variaron entre 1,3 a 1,9 en estrecha consonancia con el 1,4 de la precipitación penetrante.

Para el K encontramos altos incrementos de este elemento, el cual mostró relaciones entre 27,1 a 58,9 excepto para *M.faya* que tuvo un pequeño factor fraccionamiento de 8,4.

Podemos observar que el valor para los cloruros está cercano a la unidad, esto significa que la media a lo largo del año de las relaciones del escurrido cortical están cercanas a las del agua del mar, excepto para *L.azorica* y *P.indica* en las cuales hay un incremento del factor de fraccionamiento de 1,5 para ambas.

Para los sulfatos encontramos un incremento moderado, similar al encontrado en la precipitación penetrante y en la precipitación completa, excepto para *M.faya* con un menor incremento de 1,7.

Para los nitratos y los fosfatos encontramos un altísimo incremento en la cantidad de estos elementos. Es posible reseñar que de nuevo en estos casos las desviaciones típicas fueron las mayores, debido a las semanas en las que no hubo presencia de estos elementos y otras en las que aparecieron con grandes concentraciones. En el caso de los fosfatos recordar que con el método analítico empleado se puede estar determinando fósforo orgánico en estas disoluciones coloreadas.

Se aplicó, del mismo modo que lo efectuado anteriormente con las concentraciones un análisis de varianza entre las especies en busca de diferencias significativas de los factores de fraccionamiento de los elementos analizados; posteriormente aplicamos un test *post hoc* de rango múltiple de *Tuckey-Honestly Significant Difference*, con una significación para la prueba de un nivel de  $p \leq 0,05$ , encontrando diferencias significativas y formándose los siguientes subgrupos de especies para cada elemento:

#### **Calcio**

Encontramos dos subgrupos compuestos por *M.faya*, *E.arborea*, *P.indica*, *I.perado* e *I.canariensis*; y el segundo por *I.perado*, *I.canariensis* y *L.azorica*.

#### **Potasio**

Encontramos tres subgrupos compuestos por *M.faya*; el segundo por *E.arborea*; y el tercero por *I.canariensis*, *I.perado*, *L.azorica* y *P.indica*.

#### **Cloruros**

Encontramos dos subgrupos, el primero compuesto por *M.faya*, *E.arborea*, *I.perado* e *I.canariensis*; y el segundo por *I.perado*, *I.canariensis*, *P.indica* y *L.azorica*.

#### **Sulfatos**

Encontramos, de nuevo, dos subgrupos, el primero compuesto por *M.faya* y *E.arborea*; y el segundo por *E.arborea*, *P.indica*, *I.perado*, *I.canariensis* y *L.azorica*.

#### **Fosfatos**

Por último, para los fosfatos, encontramos dos subgrupos, el primero compuesto por *E.arborea*, *I.perado*, *L.azorica*, *M.faya*, *P.indica* y *M.faya*; y el segundo por *I.canariensis*.

### **8.4.1.3. LAS FLUCTUACIONES TEMPORALES DE LAS CONCENTRACIONES IÓNICAS Y DEL pH. EL INCENDIO FORESTAL Y LAS INVASIONES DE AIRE DEL SAHARA.**

Al igual que en el caso de la precipitación completa, existieron dos eventos importantes que cambiaron la concentración de la precipitación penetrante: las invasiones del polvo del Sahara y el incendio forestal. La concentración de los elementos y del pH correspondiente a estos periodos se muestra en la Tabla 8-19.

Tabla. 8-19 Concentración media de los elementos en el escurrido cortical de cada una de las especies (mg l<sup>-1</sup>, medias aritméticas) y concentración media de las semanas tras el incendio y tras la calima, en el escurrido cortical.

		CE	pH	Ca	Mg	Na	K	CO <sub>3</sub> H	Cl	S-SO <sub>4</sub>	N-NO <sub>3</sub>	P-PO <sub>4</sub>	C
<i>E.arborea</i>	Media aritmética	332,5	5,2	7,2	5,1	25,7	21,2	27,6	51,8	4,6	0,9	1,0	150,9
	semanas incendio	882,0	6,3	24,9	11,7	51,9	41,1	62,5	180,8	9,6	1,1	3,2	573,4
	semanas calima	395,0	6,8	5,0	5,1	32,0	24,4	93,4	77,3	5,3	2,4	2,2	154,6
<i>I.canariensis</i>	Media aritmética	250,8	6,4	6,2	3,3	16,3	26,6	57,1	25,6	3,6	0,7	3,6	117,4
	semanas incendio	611,5	6,8	29,4	8,8	33,1	73,0	134,4	80,9	6,5	2,3	6,1	360,3
	semanas calima	299,0	7,2	4,2	4,0	23,3	29,6	97,0	25,2	4,6	0,4	4,3	96,8
<i>I.perado</i>	Media aritmética	350,0	6,5	9,8	5,8	21,8	29,6	62,9	47,1	5,1	0,7	0,9	132,8
	semanas incendio	763,0	6,6	38,6	12,6	55,8	60,1	80,8	173,8	11,4	2,5	3,5	435,1
	semanas calima	374,0	7,5	6,1	3,6	20,1	21,6	167,2	32,6	3,7	0,5	0,1	179,8
<i>L.azorica</i>	Media aritmética	218,4	6,3	6,5	2,9	10,9	20,7	51,3	30,3	2,8	0,8	0,4	65,3
	semanas incendio	566,0	7,0	22,7	9,3	21,9	77,1	102,0	81,4	8,6	1,6	1,2	295,4
	semanas calima	246,0	7,2	5,5	3,0	13,8	15,8	100,1	22,0	2,3	2,0	0,3	38,4
<i>M.faya</i>	Media aritmética	470,3	4,5	8,7	6,0	33,7	10,7	56,6	78,8	4,5	1,7	2,0	177,2
	semanas incendio	781,0	5,1	24,4	13,4	47,7	29,5	34,7	145,0	3,4	5,9	8,1	587,8
	semanas calima	611,0	7,4	8,3	5,5	48,8	16,1	201,4	107,1	5,6	6,9	2,6	159,8
<i>P.indica</i>	Media aritmética	230,9	6,4	4,0	2,6	12,2	24,8	55,6	33,6	2,4	0,7	1,3	87,5
	semanas incendio	883,0	6,9	16,0	10,5	26,0	72,8	199,0	130,5	5,6	2,7	8,4	428,3
	semanas calima	237,0	7,2	4,2	1,7	12,7	16,6	95,8	11,3	1,9	5,1	1,4	24,1

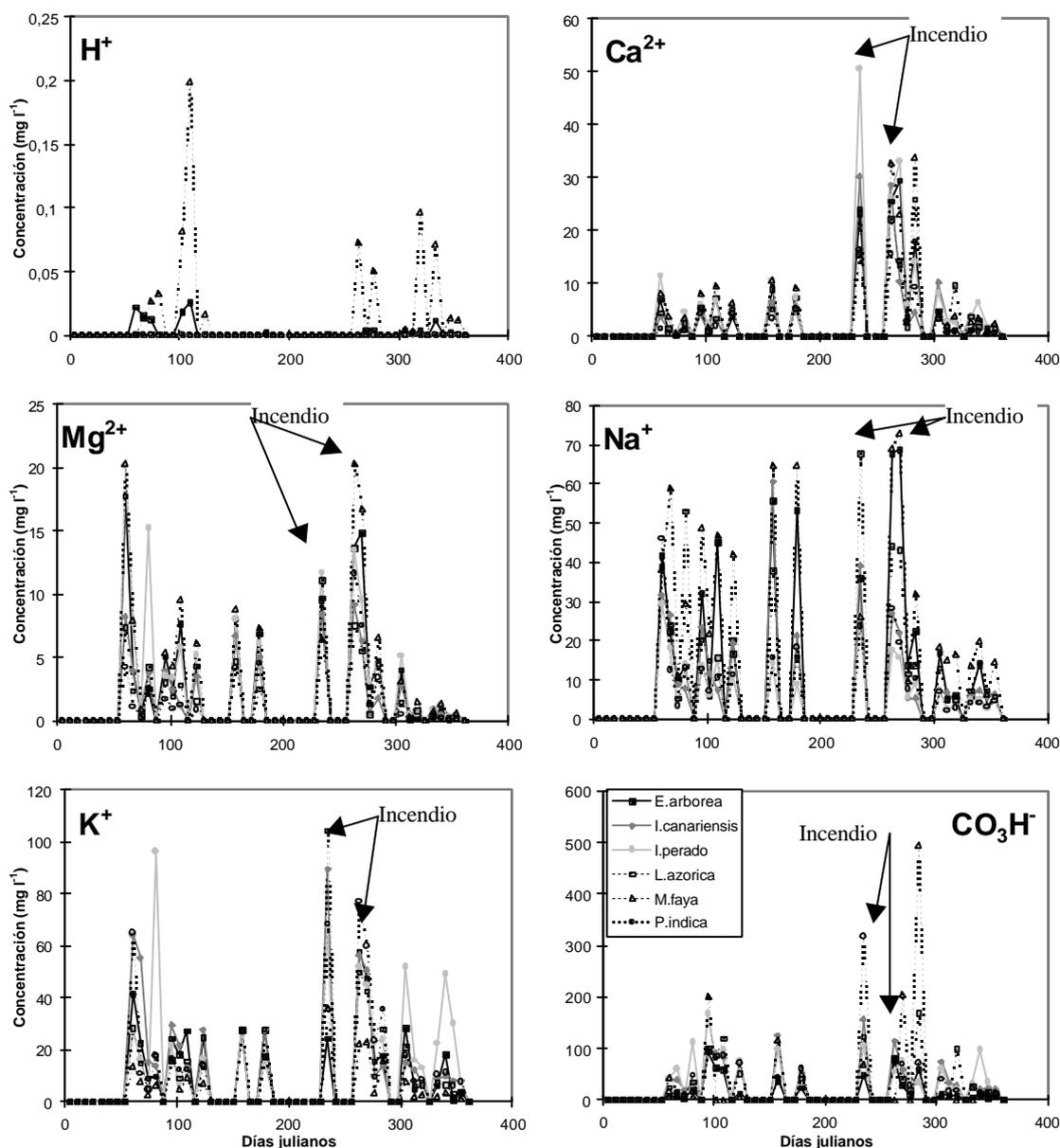


Fig. 8-5 Fluctuaciones temporales en las concentraciones de los distintos iones en el escurrido cortical de las seis especies estudiadas.

Hay que reseñar el gran aumento de la concentración de todos los elementos que se debió a las lluvias posteriores al incendio. Teniendo mayor aumento durante la semanas de calma el pH y los bicarbonatos. En las Figuras 8-5 y 8-6 se puede visualizar el comportamiento de estos elementos a lo largo del año de estudio.

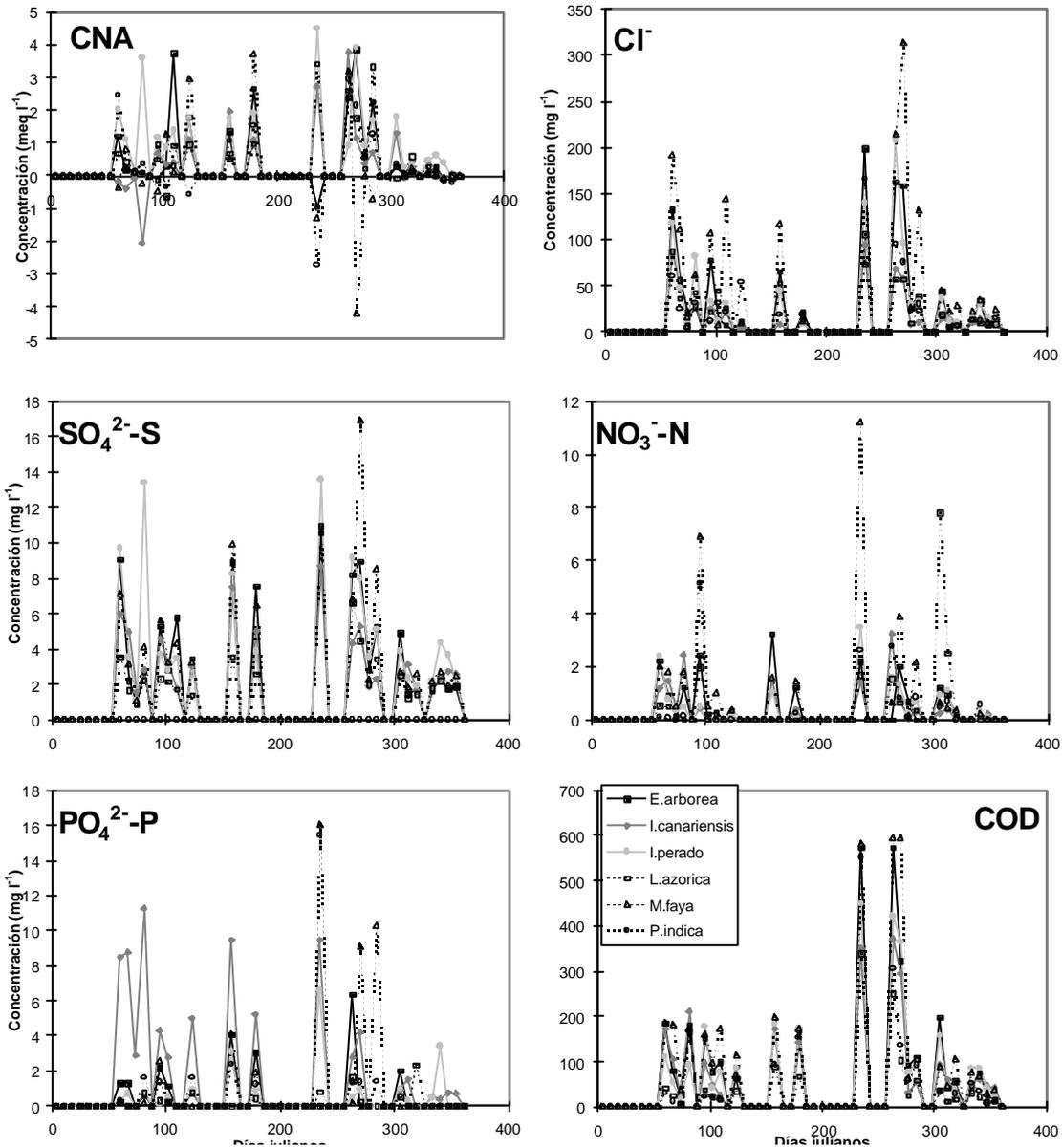


Fig. 8-6 Fluctuaciones temporales en las concentraciones de los distintos iones y la capacidad neutralizadora de ácidos (ACN) en el escurrido cortical de las seis especies estudiadas.

Podemos observar respecto a la concentración de protones que todas las especies menos *M. faya* y *E. arborea* se comportan con patrones muy similares, y sin picos a lo largo del año a diferencia de estas dos especies, estos picos pueden ser debidos al lavado de ácidos orgánicos, o podría ser también debido al incremento de contaminantes antrópicos con el consiguiente descenso de pH, y la posibilidad de que estas dos especies capturasen mayores cantidades de partículas de deposición seca.

Se observan acusados picos de calcio en las semanas posteriores al incendio, destacando a lo largo del año los más pronunciados picos de *I.perado*.

En cuanto al Mg y al Na se observan altas cantidades a lo largo del todo el año, posiblemente debidas a los aportes marinos, o debido al exceso que presentó el Mg en los ciclos internos del bosque, sin que se acuse ningún fuerte patrón de estacionalidad, debido principalmente a la perennidad de las hojas de estas especies.

El K presenta picos para todas las especies coincidiendo con los periodos de mayor pluviosidad, poniendo de manifiesto la capacidad de lavado de esta especie que le confiere esos picos debidos a los grandes volúmenes de precipitación y de escurrido cortical consiguiente.

Con respecto del fósforo denotar las altas concentraciones durante el año de *I.canariensis* y el pico tras el incendio de todas las especies. Referente a los nitratos llama la atención las altas concentraciones de la *M.faya* durante todo el año y de nuevo el pico tras el incendio.

Al respecto del resto de los elementos seguimos encontrando los grandes picos en las semanas posteriores al incendio cuando las cenizas depositadas sobre las hojas fueron lavadas; no obstante en especies como los sulfatos mantienen altos niveles durante todo el año, posiblemente consecuencia del mismo comportamiento de los sulfatos en la precipitación completa. El COD es otro de los elementos que mantiene estos altos niveles durante todo el año con excepción de los altos picos debidos al ya nombrado incendio.

#### 8.4.2. LOS FLUJOS DE ELEMENTOS QUÍMICOS

Las contribuciones a los flujos químicos del escurrido cortical, aunque pequeñas, son generalmente más altas que las contribuciones del escurrido cortical a los flujos hidrológicos (Neary y Gyzin, 1994) (18,7% de la precipitación completa y 21,3% de la bajo cubierta en cuanto a los elementos químicos). Los flujos de nutrientes en el escurrido cortical son mucho mayores en los bosques tropicales que en los bosques templados (Cole y Rapp, 1981 y Kozlowski y Pallardy, 1997).

Tabla. 8-20 Flujos anuales ( $\text{kg ha}^{-1} \text{ año}$ ) y porcentajes de los mismos durante el año 1995 en la parcela de Agua García.

		H	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub>	PO <sub>4</sub>	C
<i>E.arborea</i>	Flujos anuales	7,0E-04	0,2	0,1	0,9	0,9	1,9	0,6	0,1	0,1	4,8
	Porcentaje	0,0	1,4	1,3	8,5	8,4	18,3	5,6	1,2	0,7	45,8
<i>I.canariensis</i>	Flujos anuales	3,9E-06	0,0	0,0	0,1	0,2	0,1	0,1	0,0	0,1	0,6
	Porcentaje	0,0	1,4	0,9	6,7	11,0	9,0	5,6	1,1	4,7	38,0
<i>I.perado</i>	Flujos anuales	1,9E-06	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,2
	Porcentaje	0,0	1,6	0,8	5,8	15,6	12,8	6,5	0,8	0,3	34,5
<i>L.azorica</i>	Flujos anuales	1,6E-04	0,4	0,2	1,2	1,6	3,0	1,1	0,3	0,1	3,8
	Porcentaje	0,0	2,7	1,2	7,3	9,7	18,4	6,6	1,9	0,5	23,9
<i>M.faya</i>	Flujos anuales	2,7E-03	0,2	0,2	1,5	0,3	2,3	0,7	0,2	0,0	5,9
	Porcentaje	0,0	1,6	1,4	12,5	2,3	19,9	5,7	1,4	0,1	50,1
<i>P.indica</i>	Flujos anuales	8,7E-05	0,1	0,1	0,7	1,3	1,6	0,6	0,0	0,0	2,8
	Porcentaje	0,0	0,9	0,6	7,3	13,0	16,6	6,2	0,4	0,3	29,3

De nuevo los dos sucesos que marcaron las diferencias de concentraciones temporales tiene repercusión en las cuantías anuales de los elementos, no obstante respecto a los grandes porcentajes producidos por estos eventos en la precipitación completa y en la precipitación penetrante, en el escurrido cortical los porcentajes tienden a ser bajos, produciéndose bien un efecto de retraso o almacenamiento en los troncos de los aportes de la precipitación completa con una liberación posterior, es decir, un lapso de tiempo entre el aporte y la llegada al suelo vía escurrido cortical del mismo, o bien una mayor independencia del escurrido cortical respecto a los aportes, lo que significaría que estaría regido por los ciclos de nutrientes internos del bosque y primaría el lavado de las hojas sobre el lavado de la deposición sobre las hojas o la precipitación completa.

Como ya se mencionó anteriormente, la importancia del escurrido cortical en el flujo de elementos consiste en concentrar los mismos en la base de los troncos. Sirva de comparación entre especies los datos expuestos en la Tabla 8-10 donde se calcula con base al volumen que cae por el tronco lo que correspondería al árbol ideal cilíndrico de diámetro medio de la parcela para cada especie, y la concentración que supone en el área de infiltración.

Tabla. 8-10 Cantidades anuales de elementos ( $\text{kg ha}^{-1} \text{año}^{-1}$ ) perdidos como escurrido cortical, en el área de infiltración del árbol ideal cilíndrico de diámetro medio de la parcela para cada una de las especies.

	H	Ca	Mg	Na	K	CO <sub>3</sub> H	Cl	S-SO <sub>4</sub>	N-NO <sub>3</sub>	P-PO <sub>4</sub>	C
<i>E.arborea</i>	3,0E-01	64,44	59,21	380,40	375,23	396,24	819,74	83,64	12,65	9,77	2.055,2
<i>I.canariensis</i>	5,3E-02	308,20	196,76	1.480,3	2.452,8	4.798,0	2.002,1	417,41	53,63	340,04	8.441,0
<i>I.perado</i>	1,6E-02	73,50	38,29	272,21	726,87	993,50	595,70	100,44	8,64	4,48	1.608,6
<i>L.azorica</i>	5,5E-02	149,13	66,28	397,88	525,25	1512,7	998,44	119,33	23,56	8,23	1.298,8
<i>M.faya</i>	9,5E-01	67,76	56,68	520,69	94,56	211,34	832,04	79,98	12,80	1,24	2.088,7
<i>P.indica</i>	4,6E-02	47,77	28,41	376,03	671,96	1311,6	856,53	106,09	5,15	4,70	1.509,9

Tabla. 8-21 Porcentajes anuales del flujo de nutrientes de las semanas tras el incendio y en las que acontecieron invasiones de polvo con origen en el Sahara en el escurrido cortical.

		H	Ca	Mg	Na	K	CO <sub>3</sub> H	Cl	S-SO <sub>4</sub>	N-NO <sub>3</sub>	P-PO <sub>4</sub>	C
<i>Erica arborea</i>	%incendio	0,0	4,7	2,7	2,0	1,7	2,2	2,4	1,2	0,2	7,1	3,3
	%calima	0,0	1,7	1,7	1,7	1,3	4,6	1,9	1,3	3,7	4,3	1,5
<i>Ilex canariensis</i>	%incendio	0,2	5,2	2,6	1,1	1,3	1,4	2,0	0,6	3,3	0,5	2,5
	%calima	0,3	3,2	4,5	3,4	2,7	4,4	2,8	2,4	1,9	2,7	2,6
<i>Ilex perado</i>	%incendio	0,3	4,8	4,2	2,1	0,9	0,7	4,1	1,2	2,5	3,1	3,2
	%calima	0,1	1,2	0,9	0,4	0,2	0,6	0,4	0,4	0,6	0,1	0,6
<i>Laurus azorica</i>	%incendio	0,3	11,1	9,2	3,6	8,4	4,4	4,9	4,6	4,9	13,6	15,2
	%calima	0,1	9,0	5,7	3,3	4,1	8,8	2,4	2,4	6,5	2,6	3,8
<i>Myrica faya</i>	%incendio	0,6	4,1	3,0	1,1	2,1	0,0	2,2	0,7	0,5	2,0	2,4
	%calima	0,0	1,5	1,1	1,0	1,9	11,1	1,4	0,8	5,6	26,1	0,8
<i>Persea indica</i>	%incendio	0,1	3,8	4,7	0,9	1,3	0,8	1,3	0,5	6,2	4,5	2,4
	%calima	0,1	4,4	3,0	1,5	1,2	3,3	0,7	0,9	42,9	13,5	0,9

## 8.5. CONCLUSIONES.

- La composición química de la precipitación completa se ve alterada a su paso por la cubierta siendo significativo el aumento de la concentración de potasio con un cambio en la secuencia de cationes. La secuencia de aniones permaneció igual que en la precipitación completa.
- El pH sufre tras pasar por la cubierta un incremento de hasta el 6,5 como media aritmética.
- El COD se muestra como función de los volúmenes de precipitación y de precipitación penetrante y no así del pH.

- Utilizando el Na como trazador se observa un déficit de Cl, y un exceso de Ca y K, siendo mayor en el potasio el elemento más lavable dentro de la cubierta. El resto de los aniones permaneció con incrementos similares a los de la precipitación completa a excepción de los sulfatos que sufren un menor exceso.
- Los elementos que tuvieron un alto incremento de concentración fueron: Na, K, CO<sub>3</sub>H, Cl, PO<sub>4</sub> y COD. Los elementos que tuvieron un aumento en la concentración provocado por la calima fueron principalmente el calcio y los fosfatos.
- Los flujos de los elementos químicos de la precipitación penetrante se corresponden con un 146% de los de la precipitación completa y con un 79% de los del flujo bajo cubierta, siendo el COD y los bicarbonatos los constituyentes mayoritarios.
- El incendio provocó más del 50% de los flujos de fosfatos, así como altos porcentajes en el resto de los elementos.
- El porcentaje de los flujos debidos a los eventos de calima es bajo comparado con las altas concentraciones descritas anteriormente.
- Existen grandes diferencias entre las medias y las medias ponderadas por el volumen para las concentraciones del escurrido cortical, denotando la influencia del lavado sobre la misma (volúmenes de precipitación).
- Para *E.arborea* y *M.faya* la secuencia catiónica del escurrido cortical es la misma que para la precipitación penetrante; pero para el resto de las especies se altera por el incremento del potasio, lo que concuerda con la posibilidad del lavado foliar debido a las diferencias de concentraciones foliares de hojas jóvenes y adultas de esos elementos encontradas por Köhl *et al.* (1996).
- Respecto a los aniones se observa un incremento del Cl para *E.arborea* y *M.faya*, pudiendo deberse a una mayor facilidad de captación de aerosoles marinos debido al tamaño de sus hojas y las rugosidades de sus troncos.
- Para el *I.canariensis* se observa un alto incremento de fosfatos, pudiendo estar relacionado con el metabolismo del Al, ya que estos dos elementos están fuertemente asociados en el tipo de suelo que sustenta a esta vegetación.
- La especie *M.faya* presenta altos valores de NO<sub>3</sub>, posiblemente debido a que estas plantas se hallan micorrizadas, y la procedencia de estos nitratos se deba a la circulación interna.
- El pH fue menor para *M.faya* y *E.arborea*, pudiendo suponer una ventaja en los primeros estadios de la sucesión para ambas especies. El COD tuvo también valores máximos en estas dos especies.
- A excepción de los altos valores de Na y Cl los datos obtenidos para el bosque de estudio son comparables a los de otras especies afines encontrados en la bibliografía.
- Un análisis de varianza confirmó las diferencias de las concentraciones a lo largo de año entre especies.
- Para los excesos de elementos se observa un gran incremento de Ca y Mg respecto de la precipitación completa y de la precipitación penetrante, mostrando este último elemento valores negativos anteriormente para ambas. Los valores del enriquecimiento de K fueron similares a los de la precipitación penetrante, con excepción de *M.faya* corroborando lo expuesto con base en las concentraciones. Existió un detrimento de cloruros en *I.canariensis* y un enriquecimiento en el resto de la especies.
- Existieron diferencias significativas para los factores de fraccionamiento para las diferentes especies con base a los valores a lo largo del año de estudio.
- El incendio causó altos picos de concentraciones para todos los elementos, que fueron acompañados de altos flujos de estos mismos elementos.

- Los flujos de nutrientes fueron 18,7% de la precipitación completa y 21,39% de la bajo cubierta en cuanto a los elementos químicos, siendo así mayores que los flujos hidrológicos.

## 8.6. BIBLIOGRAFÍA.

- Baba, M. Okazaki, M. & Hashitani, T. 1995. Effect of acidic deposition on forested andisols in the Tama Hill region of Japan. *Environmental Pollution* 89:97-106.
- Bañares, A. & Barquín, E. 1982. Árboles y arbustos de la laurisilva gomera. Goya Ediciones S/C de Tenerife.
- Birk, E.M. and Vitousek, P.M. 1986. Nitrogen availability and nitrogen use efficiency in lobolly pine stands. *Ecology*. 67:69-79.
- Caritat, P. & Aamlid, D. 1995. Groundwater acidification at Birkness, southern Norway: comparing trends of chemical composition of precipitation, throughfall, soilwater and groundwater. *Water Air Soil Poll.* 85:1861-1866.
- Cole, D.W. & Rapp, M. 1981. Elemental cycling in forest ecosystems. In D.E. Reichle "Dynamic Properties of Forest Ecosystems". Cambridge. Univ. Press, Cambridge. Pp.341-409.
- Crockford, R.H. Richardson, D.P. & Sageman R. 1996a. Chemistry of Rainfall, throughfall and stemflow in a eucalypt forest and a pine plantation in southeastern Australia: 2. Throughfall. *Hydrol. Process.* 10: 13-24.
- Crockford, R.H. Richardson, D.P. & Sageman R. 1996b. Chemistry of Rainfall, throughfall and stemflow in a eucalypt forest and a pine plantation in southeastern Australia: 3. Stemflow and total inputs. *Hydrol. Process.* 10: 25-42.
- Dewalle, D.R. & Swistock, B.R.. 1994. Differences in Oxygen-18 content of throughfall and rainfall in hardwood and coniferous forest. *Hydrol. Process.* 8:75-82
- Edmonds, R.L. Thomas, T.B. & Rhodes, J.J. 1991. Canopy and soil modification of precipitation chemistry in a Temperate Rain forest, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55: 1685-1693.
- Fenn, M.E., Poth M.A. Bytnerowicz, A. & Riechers G.H. 1995. Troughfall chemistry of ponderosa pine exposed to wet and dry acidic deposition, drought, ozone and nitric acid. *Can. J. For. Res.*, 25:88-100.
- Ferm, M. & Hultberg, H. 1995a. Method to estimate atmospheric deposition of base cations in coniferous throughfall. *Water Air Soil Poll.* 85: 2229-2234.
- Ferm, M. & Hultberg, H. 1995b. Method to estimate atmospheric deposition and internal circulation of base cations to a forested catchment area. *Water Air Soil Poll.* 85: 2235-2240.
- Fowler, D. 1980. Removal of sulphur and nitrogen compounds from the atmosphere in rain and by dry deposition. In D. Drabløs and A.Tollan (sde.), *Ecological impact of acid precipitation*. SNSF project. Oslo, Norway, 22-32.
- Hansen, K 1995 In canopy throughfall measurements in Norway Spruce: Water flow and consequences for ion fluxes. *Water Air Soil Poll.* 85:2259-2264.
- Inagaki, M. Sakai, M. & Ohnuki, Y. 1995. The effects of organic carbon on acid rain on a temperate forest in Japan. *Water Air Soil Poll.* 85: 2345-2350.
- Köhl, K. Löscher, R. González-Rodríguez, A.M. Jiménez, M.S. & Morales, D. 1996. Foliar cation contents of laurel trees on the Canary Islands. *Flora* 191:303-311.
- Kozlowski, T.T. & Pallardy, S.G. 1997. *Physiology of woody plants*. 2º Ed. Academic Press. San Diego.
- Liechty, H.O., Kuuseoks, E. & Mroz, G.D. 1995. Dissolved Organic carbon in northern hardwood stands with differing acidic inputs and temperature regimes.
- Lovett, G.M. & Lindberg, S.E., 1984. Dry deposition and canopy exchange in a mixed forest as determined by analysis of throughfall. *J. Appl. Ecol.* 21: 1013-1027.
- MacDonald, N.W. Witter, J.A. Burton, A.J. Pregitzer, K.S. & Richter, D.D. 1993. Relationship among atmospheric deposition, throughfall, and soil properties in oak forest ecosystems. *Can J. For. Res.* 23:2348-2357.

- Morales, D. Gonzalez-Rodriguez, A.M. Cermak, J. & Jiménez, M.S. 1996. Laurel forest in Tenerife, Canary Islands: the vertical profiles of leaf characteristics. *Phyton* 36: 251-263.
- Nativ, R. & Issar, A. 1983. Chemical composition of rainwater and floodwaters in the Negev desert. Israel. *J. Hydrol.* 62, 201-223.
- Neal, C. Ryland, G.P. Conway, T. Jeffery, H.A. Neal, M. Robson, A.J. Smith, C.J. Walls, J. & Bhardwaj, C.L. 1994. Interception of chemicals at a forest edge for a rural low-lying site at black Wood, Hampshire, southern England. *J. Hydrol.* 142:127-141.
- Neary, A.J. & Gizyn, W.I. 1994. Throughfall and stemflow chemistry under deciduous and coniferous forest canopies in south-central Ontario. *Can. J. For. Res.* 24: 1089-1100.
- Parker, G.G. 1983. Throughfall and stemflow in the forest nutrient cycle. *Adv. Ecol. Res.*, 13: 57-133.
- Petrov M.P. 1976. *Deserts of the world*. Jhon Wiley (eds.) New York
- Robson, A.J. Neal, C. Ryland, G.P. & Harrow, M. 1994. Spatial variations in throughfall chemistry at the small plot scale. *J. Hydrol.* 158:107-122.
- Ruiz de la Torre, J. 1979. *Árboles y arbustos de la la España peninsular*. E.T.S.I.M. Fundación Conde del Valle de Salazar (ed.). 512pp.
- Seiler, J. Matzner, E. 1995. Spatial variability of throughfall chemistry and selected soil properties as influenced by stem distance in a mature Norway spruce (*Picea abies*, Karst.) stand. *Plant Soil.* 176:139-147.
- Sequeira R. 1991. Note on the consumption of acid through cation exchange with clay minerals in atmospheric precipitation. *Atmos. Environ.* 25A (2): 487-490.
- Strigel, G. Ruhayat, D. Prayitno, D. & Sarmina, S. 1994. Nutrient input by rainfall into secondary forests in East Kalimantan, Indonesia *J. Trop. Ecol.* 10:285-288.
- Ulrich, B. 1983. Interaction of forest canopies with atmospheric constituents: SO<sub>2</sub>, alkali and earth alkali cations and chloride. In *Effects of accumulation of air pollutants in forest ecosystems* Ulrich, B. Pankrath & J. Reidel, D. (Edits.), Dordrecht, The Netherlands. pp. 33-45.
- Veneklass, E.J. 1990. Nutrient fluxes in bulk precipitation and throughfall in two Montane Tropical rain forest. Colombia. *J. Ecol.* 78: 974-992.
- Vitousek, P.M. & Sandford, R.L. Jr. 1986. Nutrient cycling in moist tropical forest. *Ann. Rev. Ecol. Syst.* 17:137-167.
- Vitousek, P.M. & Walker, L.R. 1989. Biological invasions by *Myrica faya* in Hawaii: Plant demography, nitrogen fixation ecosystems effects. *Ecol. Monogr.* 59:247-265.



## Capítulo 9. FLUJOS NETOS BAJO CUBIERTA. LA DEPOSICIÓN ATMOSFÉRICA Y EL LAVADO DE LA CUBIERTA DEL BOSQUE.

### 9.1. INTRODUCCIÓN.

Los aportes de la deposición atmosférica están determinados por la composición de la precipitación completa ( $BP$ ), es decir la lluvia (deposición húmeda  $WD$ ) más la deposición seca recogida por un embudo o recipiente que está permanentemente abierto ( $DD_1$ ) (Veneklaas, 1990, Lovett, 1994). La recogida de precipitación completa es usada por la simplicidad y el bajo costo del método (Lovett, 1994).

$$BP = DD_1 + WD$$

Desafortunadamente, existe otras fuentes de aportes, durante los periodos secos los colectores de precipitación completa recogen los aerosoles y partículas así como las anomalías, incluido el material de origen local que no debe de ser considerado como un aporte al ecosistema, tal como excrementos de pájaros, polen, insectos y el polvo de formación *in situ* que es lavado en el colector en la siguiente lluvia (Matzner y Meiwes, 1994; Lovett, 1994).

Sin embargo, los aportes a los ecosistemas son usualmente infraestimados por el método estándar de colectores de polietileno en el campo, porque el efecto de la superficie boscosa en la captación de partículas atmosféricas, aerosoles y gases ( $DD_2$ ) es más eficiente (White y Turner, 1970; Eaton *et al.*, 1973; Art *et al.*, 1974; Bache, 1977; Lovett 1987; Kazda y Glatzel, 1986 y Lovett, 1994) siendo ese efecto mayor en lugares semiáridos con atmósferas polvorrientas (Domingo *et al.*, 1994), y es dependiente del tipo de vegetación, de las especies y de la densidad de plantas en la cubierta, aumentando cuanto mayor sea la superficie de la cubierta y el grado de desarrollo del bosque (Striegel *et al.* 1994; Crockford *et al.* 1996b y Schaeffler, *et al.* 1996). Tal incremento de la deposición atmosférica total ( $DD$ ) tiene un significativo efecto sobre los ecosistemas.

$$DD = DD_1 + DD_2$$

En definitiva, los colectores de precipitación completa tienden a sobrestimar la deposición húmeda y a infraestimar la deposición total en algunas zonas (Lovett, 1994). La deposición seca, durante los periodos secos, aglutina tanto la deposición de partículas y aerosoles como la deposición atmosférica de gases por adsorción, siendo una importante fuente de elementos. La deposición seca contribuye con cantidades significativas de  $NO_x$  y  $SO_2$ , y hasta la adsorción gaseosa es relativamente importante para esos elementos, la deposición seca es normalmente mayor en cubiertas de coníferas que en cubiertas de frondosas (Fowler, 1980).

Ha habido un creciente interés en el estudio y uso del análisis químico de la precipitación penetrante y del escurrido cortical, ya que puede contribuir para comprender el efecto de deposición atmosférica sobre el bosque, y para estimar los aportes de elementos desde la atmósfera al ecosistema (Likens, 1992; Butler y Likens, 1994; Capellato y Peters, 1995). Las cubiertas forestales son una importante fuente de nutrientes (elementos minerales lavados de los tejidos de las plantas, exudados y productos de descomposición (Kozłowski y Pallardy 1997) denominados deposición interna (o lavado de iones  $IC$ ) y las cubiertas vegetales tiene así mismo la capacidad de tomar, esos elementos de la cubierta (Ulrich, 1983, toma de la precipitación  $UP$ ). Interpretaciones de la relativa contribución de cada proceso a la composición química de la precipitación penetrante, es aún materia de debate científico (Ignatova, 1995). Usualmente, cuando la lluvia pasa a través de la cubierta arbórea, su concentración en nutrientes minerales aumenta Kozłowski y Pallardy (1997).

Neary y Gizyn (1994), Van Ek y Draaijers (1994), Lovett, (1994), Ferm y Hultberg (1995 a y b), Capellato y Peters (1995) relacionaron algunos métodos para separar el material lavado durante la lluvia como fuentes internas (lavado) o externas (deposición seca), tales como:

- I. La recogida de deposición seca sobre superficies rugosas (White y Turner, 1970; Ferm y Hultberg, 1995b) este método puede tener resultados dudosos (Davidson y Wu, 1990)
- II. La deposición seca de cationes ha sido estimada durante tiempos cortos por el lavado de hojas recogidas (Lindberg *et al.* 1986)
- III. Estudios de balance de masa de compuestos marcados radioactivamente (predominantemente sulfuro) añadidos a los ciclos internos de los árboles (Lindberg y Garten, 1988). Graustein y Armstrong (1983) analizaron las concentraciones de estroncio y la relación isotópica  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  en la precipitación penetrante, en la precipitación y en el árbol completo para estimar el Sr proveniente de la deposición. Asumiendo que el calcio se comporta como el estroncio la captación de calcio puede estimarse.
- IV. La deposición seca atmosférica de cationes puede también ser estimada por un modelo matemático que usa precipitación penetrante y concentraciones de precipitación (Ulrich, 1983; Westling *et al.*, 1995)
- V. Los enfoques directos, tales como medidas de la deposición seca por técnicas micrometeorológicas, aunque son difíciles y caras (Hicks, 1986)
- VI. Medidas secuenciales de precipitación penetrante (Schefer y Reiners, 1990)
- VII. Enfoques indirectos, tal como el uso de regresiones que relacionan la cantidad de lluvia y el período seco antecedente con el flujo neto de iones en la precipitación penetrante (Lovett y Lindberg, 1984; Puckett, 1990), puede proveer una herramienta útil para separar y cuantificar ambas fuentes de constituyentes en la precipitación penetrante: deposición seca y el lavado de la cubierta (Lakhani y Miller, 1980).

Aunque la técnica de la precipitación penetrante tiene numerosas e importantes ventajas (barata, fácil de implementar, recoge la gran variabilidad espacial de la deposición) comparado con otras técnicas, los procesos de intercambio de la cubierta son todavía una importante fuente de incertidumbre en la estimación de la deposición seca obtenida por medidas de la precipitación penetrante (Van Ek y Draaijers, 1994). La técnica de precipitación penetrante se usa ampliamente para estimar la deposición atmosférica de compuestos que no son ni retenidos ni lavados por y desde los árboles (tales como el sodio y el azufre) (Ferm y Hultberg, 1995a).

Los objetivos de este capítulo son:

- i. Determinar los aporte al bosque corregidos por los efectos de la cubierta.
- ii. Determinar las fuentes internas o externas de iones en la precipitación penetrante y el escurrido cortical mediante diferentes métodos.
- iii. Evaluar los factores, tales como el periodo de sequía antecedente, la cantidad de lluvia, interceptación de la precipitación por la cubierta del bosque, para predecir los flujos de precipitación penetrante neta.
- iv. Cuantificar los balances de nutrientes de la parcela.

## 9.2. MATERIAL Y MÉTODOS.

### 9.2.1. INSTRUMENTOS DE CAMPO Y RECOGIDA DE MUESTRAS

Para la determinación de suelos se recogieron muestras correspondientes a dos sondeos a dos profundidades, tomados a mitad de pendiente (muestra 1) y en la zona baja de la parcela (muestra 2), y posteriormente se siguieron los métodos del American Public Health Association (1992), que se indican a continuación:

El pH (H<sub>2</sub>O) y pH (KCl), se midió en suspensión acuosa (1:2.5) y en KCl 1N (1:2,5), después de agitar y dejar un tiempo de contacto de 30 minutos. La lectura se realizó en un pH-metro marca Radiometer mod.PHM82 con electrodo combinado. El extracto de la pasta saturada, se obtuvo siguiendo el método de Richards (U.S.Salinity Lab.Staff., 1954) y en él, se midió la conductividad eléctrica a 25°C y el pH.

Los Cationes de cambio se han determinado por el método del NH<sub>4</sub>OAc 1N pH 7; el Ca y Mg se determinan mediante espectrofotometría de Absorción atómica, con llama aire-acetileno, en presencia de concentraciones de lantano del orden de 0,1 a 1%, para evitar interferencias de sílice, aluminio, fosfatos y sulfatos; el Na y K por Fotometría de llama, con llama aire-acetileno. El amonio cambiante se determinó según método de Keeney y Nelson (1982), mediante extracción con KCl 2M, la determinación analítica del amonio se realizó con electrodo selectivo de amonio. El Carbono se determinó por oxidación con dicromato potásico, según método de Walkley y Black (1934) y posteriormente modificado, utilizando ferroína como indicador. El Nitrógeno, se determinó por digestión Kjeldhal (Tecator mod. 1026). El fósforo asimilable por extracción con NaHCO<sub>3</sub> a pH 8,5 (Olsen et al.1954).

Para las propiedades ácidas: para la retención de fosfato se ha seguido el método propuesto por Blakemore *et al.*, 1981, el fosfato retenido se expresa en porcentajes del fosfato añadido; y para la extracción con oxalato a pH 3 se ha seguido el método propuesto por Blakemore *et al.*, 1981. en el extracto se determina los elementos Al, Fe y Si mediante espectrofotometría de Absorción atómica.

En tres diferentes pendientes representativas de la parcela, una de 12°, otra del 10° y la otra del 8°, se establecieron parcelas de 2x10m para medir la escorrentía superficial. Desarrollamos una metodología similar a la propuesta por Sinun *et al.* (1992), consistente en parcelas rodeadas por paredes de madera impermeabilizada y en el extremo inferior una canaleta de plástico, desde la cual la escorrentía fue conducida por una manguera de PVC a colectores de 36 l de capacidad. Las muestras fueron llevadas al laboratorio en un periodo inferior a 1 hora, e introducidas en un frigorífico a -4°C esperando para ser analizadas. En la semana siguiente 200 ml de agua fueron filtrados a través de filtros de 0,45 mm (Millipore). De cada muestra se conservó una submuestra de 50 ml sin filtrar que fue utilizada para la determinación del COD.

### 9.2.2. ANÁLISIS QUÍMICO

El análisis químico se halla reseñado en el apartado 7.9.2.

### 9.2.3. ANÁLISIS DE LOS DATOS

Para determinar cuando las cubiertas son fuentes o colectores de iones. Se calcularon los flujos iónicos de la precipitación completa, la precipitación penetrante y de la "precipitación penetrante neta". El flujo de la precipitación penetrante neta se define como la diferencia existente entre el flujo de la precipitación penetrante más el flujo de la escurrido cortical (denominado flujo bajo cubierta, BCF o flujo total de precipitación penetrante) menos el flujo de la precipitación

completa, el flujo neto incluye el flujo de fuentes externas, debido al lavado de materiales de deposición, resultante de la deposición seca y el flujo de fuentes internas, debido al lavado e intercambio de la cubierta (Shibata y Sakuma, 1996). Los flujos netos de iones proporcionan una primera aproximación a la transferencia de elementos a través de la vegetación, reflejando la contribución de iones por la deposición seca y el lavado interno de la cubierta, o la pérdida de iones a través de ña absorción por la cubierta. Sin embargo, cierta cantidad de agua permanece inevitablemente en la cubierta después de cada lluvia, la cual es evaporada dejando los iones asociados (Neary y Gizyn, 1994). Los flujos netos bajo cubierta para cada especie química se definen del siguiente modo:

$$NBCFi = BCFi - BPFi,$$

Donde  $NBCFi$  es el flujo neto de precipitación penetrante del ion  $i$ ,  $BPFi$  es el flujo de la precipitación completa del ion  $i$  y  $BCFi$  es el flujo de la precipitación penetrante total del ion  $i$ . Los  $NBCFi$  se calcularon para cada periodo de recogida.

La "relación de deposición" es el cociente entre el flujo de la precipitación penetrante total y el flujo de la precipitación completa (Parker, 1983).

Para estimar el porcentaje de material lavado desde la vegetación en la precipitación penetrante (la fracción lavada) se utilizaron coeficientes de lavado. El rango de los porcentajes de lavado aplicados en diversos ecosistemas ha sido revisado en la bibliografía (Domingo *et al.*, 1994 y Ferm y Hultberg, 1995a), estos rangos cubren algunos tipos de bosques diferentes, y fueron para el sodio (0-12%), para el potasio (83-90%), para el calcio (38-47%), para el magnesio (34-54%), para los sulfatos (22-38%) y para los cloruros (2-12%). Los porcentajes de lavado dependen de varios factores tales como la especie de planta, las características ambientales del ecosistema estudiado y el método de medida empleado (Domingo *et al.*, 1994). De este modo se determino un valor máximo y un valor mínimo para el lavado interno de la cubierta, y por la diferencia entre los flujos netos y el lavado interno se determinó la deposición seca recogida por la cubierta, determinando finalmente el aporte total al ecosistema como el aporte por la precipitación completa más el aporte de la deposición seca recogido por la cubierta.

Se realizaron dos balances diferentes, el primero de ellos, el acercamiento usual, contabilizando únicamente el aporte de la precipitación completa como entradas y la escorrentía superficial como salidas, y un segundo acercamiento contabilizando como aportes la precipitación completa más el aporte de la deposición seca recogido por la cubierta (Domingo *et al.* 1994).

Para analizar cuantitativamente las relaciones entre los factores que controlan los procesos de modificación de la química del agua a través de la cubierta y para confirmar que las diferencias entre ambos métodos de balances anteriormente descritos son debidas a la infraestimación de la precipitación completa en el primer balance, se utilizaron técnicas de regresión para distinguir entre las fuentes externas (deposición seca) y fuentes internas (lavado de la cubierta) para cada elemento independientemente en los flujos netos de precipitación penetrante se utilizó la metodología propuesta por Lovett y Lindberg (1984).

Para la medición de aportes secundarios ligados a las condiciones locales, como es el caso de la transferencia por corrientes superficiales o laterales del suelo, denominadas escorrentías superficiales<sup>28</sup>, en tres pendientes diferentes y representativas de la parcela, una a 12°, otra a 10° y la última a 8°, se establecieron subparcelas de 2 x 10 m para la medición de la escorrentía superficial. Se desarrolló una metodología similar a la propuesta por Sinun *et al.* (1992), consistente en que las subparcelas orientadas en sentido paralelo a la pendiente máxima respecto a su eje longitudinal y que estuvieran rodeadas de madera impermeabilizada (con aceite de linaza) y con canaletas de plástico al final de la pendiente, cerrando el extremo inferior del

rectángulo (2m), donde la escorrentía superficial era almacenada en bolsas de plástico de 36 litros de capacidad.

### 9.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

#### 9.3.1. FLUJOS NETOS BAJO CUBIERTA

Los flujos netos bajo la cubierta (NBCF) contuvieron sólo una pequeña cantidad más de los iones más importantes de la precipitación completa, Tabla. 9-1, comparado con otros lugares tales como el sur de España (Domingo *et al.* 1994).

	Prec. H mm	Ca	Mg	Na	K	CO <sub>3</sub> H kg ha <sup>-1</sup>	Cl	SO <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub>	PO <sub>4</sub>	C	
(1) Precipitación completa	625,2	7,5E-03	7,5	5,6	51,0	7,2	91,7	94,7	26,7	9,6	4,4	75,6
(2) Precipitación penetrante	323,6	1,8E-03	8,8	6,8	47,6	39,4	107,0	84,0	21,8	5,8	4,9	183,4
Escurrido cortical <i>E. arborea</i>		7,0E-04	0,2	0,1	0,9	0,9	0,9	1,9	0,6	0,1	0,1	4,8
Escurrido cortical <i>I. canariensis</i>		3,9E-06	0,0	0,0	0,1	0,2	0,4	0,1	0,1	0,0	0,1	0,6
Escurrido cortical <i>I. perado</i>		1,9E-06	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,2
Escurrido cortical <i>L. azorica</i>		1,6E-04	0,4	0,2	1,2	1,6	4,5	3,0	1,1	0,3	0,1	3,8
Escurrido cortical <i>M. faya</i>		2,7E-03	0,2	0,2	1,5	0,3	0,6	2,3	0,7	0,2	0,0	5,9
Escurrido cortical <i>P. indica</i>		8,7E-05	0,1	0,1	0,7	1,3	2,5	1,6	0,6	0,0	0,0	2,8
(3) Escurrido cortical	42,9	3,6E-03	0,9	0,6	4,4	4,2	8,9	9,0	3,0	0,7	0,3	18,2
Precipitación penetrante total (2)+(3)		5,5E-03	9,7	7,3	51,9	43,6	115,9	93,1	24,9	6,5	5,2	201,5
Flujo neto bajo cubierta (2)+(3)-(1)		-2,0E-03	2,2	1,8	0,9	36,4	24,3	-1,7	-1,8	-3,1	0,8	125,9
Porcentaje de lavado estimado (Min.)			38,0	34,0	0,0	83,0		2,0	22,0			
Porcentaje de lavado estimado (Max.)			47,0	52,0	12,0	90,0		12,0	38,0			
(6) Aportes recogidos por la cubierta (Min.)			1,2	0,8	0,8	3,6						
(5) Aportes recogidos por la cubierta (Max.)			1,4	1,2	0,9	6,2						
(7) Aportes totales (TI) = (6) + (1) (Min.)			8,7	6,4	51,8	10,8						
(8) Aportes totales (TI) = (5) + (1) (Max.)			8,9	6,7	51,9	13,4						
(4) Escorrentía superficial	0,46	8,4E-07	0,0	0,0	0,2	0,1	0,3	0,2	0,1	0,0	0,0	0,4
Balance I: (1)-(4)		7,5E-03	7,5	5,6	50,9	7,1	91,4	94,6	26,5	9,6	4,3	75,2
Balance II Min.: (7)-(4)			8,7	6,4	51,8	10,7						
Balance II Max.: (8)-(4)			8,9	6,7	51,9	13,2						
Relaciones de deposición	0,7		1,3	1,3	1,0	6,1	1,3	1,0	0,9	0,7	1,2	2,7

Tabla. 9-1 Flujos hidrológicos anuales (mm) y flujos de elementos anuales (kg ha año<sup>-1</sup>) en la precipitación completa, la precipitación penetrante, el escurrido cortical y la escorrentía superficial. Los resultados de los balances I y II. Los balances II (Min.) y (Max.) fueron calculados utilizando el mínimo y máximo porcentaje de lavado de acuerdo con la bibliografía, excepto para CO<sub>3</sub>H, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> y PO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, ya que no se tiene datos del lavado.

Durante el año de estudio hidrológico (Tabla. 9-2), el COD fue el 67,8% de los flujos netos totales de nutrientes, seguido de otros nutrientes menos abundantes como el potasio (19,6%), bicarbonato (13,1%), y calcio, magnesio, sodio y fosfatos (sobre el 1%).

	H %	Ca	Mg	Na	K	CO <sub>3</sub> H	CO <sub>3</sub>	Cl	SO <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub>	PO <sub>4</sub>	COD	Med.
(1) Precipitación completa	0,0	2,0	1,5	13,6	1,9	24,5	0,0	25,3	7,1	2,6	1,2	20,2	
(2) Precipitación penetrante	0,0	1,7	1,3	9,3	7,7	21,0	0,0	16,5	4,3	1,1	1,0	36,0	
Escurrido cortical <i>E. arborea</i>	0,0	1,4	1,3	8,5	8,4	8,8	0,0	18,3	5,6	1,2	0,7	45,8	
Escurrido cortical <i>I. canariensis</i>	0,0	1,4	0,9	6,7	11,0	21,6	0,0	9,0	5,6	1,1	4,7	38,0	
Escurrido cortical <i>I. perado</i>	0,0	1,6	0,8	5,8	15,6	21,3	0,0	12,8	6,5	0,8	0,3	34,5	
Escurrido cortical <i>L. azorica</i>	0,0	2,7	1,2	7,3	9,7	27,8	0,0	18,4	6,6	1,9	0,5	23,9	
Escurrido cortical <i>M. faya</i>	0,0	1,6	1,4	12,5	2,3	5,1	0,0	19,9	5,7	1,4	0,1	50,1	
Escurrido cortical <i>P. indica</i>	0,0	0,9	0,6	7,3	13,0	25,4	0,0	16,6	6,2	0,4	0,3	29,3	
(3) Escurrido cortical	0,0	1,8	1,1	8,7	8,4	17,8	0,0	18,0	6,1	1,3	0,5	36,2	
Prec. penetrante total (2)+(3)	0,0	1,7	1,3	9,3	7,8	20,7	0,0	16,6	4,4	1,2	0,9	36,0	
Flujo neto bajo cub. (2)+(3)-(1)	0,0	1,2	0,9	0,5	19,6	13,1	0,0	-0,9	-1,0	-1,7	0,4	67,8	
(4) Escorrentía superficial	0,0	2,9	1,6	10,6	8,5	22,4	0,0	10,9	10,2	2,5	0,1	30,3	
Balance I: (1)-(4)	0,0	2,0	1,5	13,7	1,9	24,5	0,0	25,4	7,1	2,6	1,2	20,2	
%Prec. Penetr./Prec. Compl.	24,6	117,2	121,3	93,2	547,4	116,7		88,7	81,9	60,5	112,5	242,4	146,0
%Escur. cortical/Prec. Compl.	48,4	12,0	10,2	8,6	58,7	9,7		9,5	11,4	6,9	6,0	24,0	18,7
%Prec. Penetr./Prec. Bajo cub.	33,7	90,7	92,3	91,6	90,3	92,3	0,0	90,3	87,7	89,8	94,9	91,0	78,7
%Escur. cortical/Prec. Bajo cub.	66,3	9,3	7,7	8,4	9,7	7,7	100,0	9,7	12,3	10,2	5,1	9,0	21,3

Tabla 9-2 Porcentajes de cada elemento en los flujos de elementos en la precipitación completa, la precipitación penetrante, el escurrido cortical y la escorrentía superficial, Balances I y precipitación penetrante y escurrido cortical sobre la precipitación completa y sobre los flujos bajo cubierta.

<sup>28</sup> Término anglosajón *Overlandflow*

Algunos iones presentaron flujos netos negativos. Esta toma neta de elementos por la vegetación, se encontró para el cloruro, los sulfatos, los nitratos y los protones. Algunos autores explican que aunque el flujo neto sea negativo, esos iones no son realmente absorbidos por la cubierta; se asume que los iones que permanecen en la cubierta han quedado estrechamente ligados a esta cubierta tras la lluvia (Neary y Gizyn, 1994) y son lavados con el siguiente evento de precipitación; sin embargo otros autores registraron que algunos nutrientes minerales son absorbidos por las hojas y las ramillas, a través del transporte por la cutícula y las células epidérmicas, por difusión o entrando a través de los espacios intercelulares de los poros de los estomas de las hojas (Kozlowski y Pallardy, 1997). Esta capacidad de absorción foliar de nutrientes varía entre especies, y depende de la composición de las ceras epicuticulares, la naturaleza de las ceras de la mayoría de las superficies foliares también previene de la entrada de soluciones acuosas por los estomas (Schönherr y Bukovac, 1972), de manera que la entrada a la hoja, o el lavado de iones desde la hoja por la lluvia, debe de ocurrir a través de la cutícula, y ese proceso parece ser muy lento, y constituir la etapa controladora del intercambio de iones.

Aunque la interacción de soluciones acuosas con la planta está usualmente considerada en términos de relaciones con el follaje, datos recientes apuntan a la importancia de la vía de intercambio a través de los tallos y troncos (Katz *et al.*, 1989; Mitterhuber *et al.*, 1989). Incluso siendo a través de las superficies de los troncos el intercambio es muy pequeño, pero la gran resistencia a la transferencia a través de las hojas puede hacer a la transferencia a través de los troncos de igual importancia en términos de la planta completa (Cape, 1993).

El *NBCF* de protones fue negativo para el año de estudio, debido posiblemente a la capacidad de la cubierta del bosque a neutralizar los aportes ácidos sobre estas superficies (Parker, 1983; Miller, 1984; Neary y Gizyn, 1994; Crockford *et al.*, 1996), por el intercambio en esas superficies de protones con cationes presentes en las mismas, o a través de la asociación con ácidos orgánicos débiles y el consecuente incremento de pH (Reiners y Olson, 1984). El lavado (e intercambio) de cationes recae especialmente en el potasio, calcio y magnesio (Cape, 1993), por lo que a priori estos elementos deberían de poseer flujos positivos. Los cationes monovalentes (p.e., Na, K) son rápidamente lavados de las hojas y transferidos al suelo, principalmente por la precipitación penetrante, en comparación con los cationes divalentes (p.e. Ca y Mg), que son más fuertemente retenidos y son transferidos al suelo en mayor medida por la caída de las hojas Kozlowski y Pallardy (1997). La cantidad de partículas alcalinas depositada sobre la cubierta ejerce un efecto tamponador sobre la lluvia ácida de este modo (Mesanza y Casado, 1994), siendo esta cantidad de partículas alcalinas alta para el bosque de estudio, como pudimos comprobar en el capítulo 7.

No obstante tanto la toma como la liberación pueden ocurrir en un mismo bosque (Miller, 1984 y Crockford *et al.*, 1996b); en nuestro caso la liberación sólo ocurrió cuando el pH de la lluvia fue alto, con un rango entre 6,04-7,98. La liberación de protones que puede ocurrir en algunos bosques parece estar relacionada con la edad y el tipo de bosque (Miller, 1984).

El *NBCF* de los nitratos también fue negativo, esto indica absorción de nitratos por la cubierta. Las cubiertas de árboles retiene usualmente entre un 29% a un 35% del N atmosférico depositado (Cadle *et al.*, 1991; Friendland *et al.*, 1991; Hanson y Garten, 1992; Johnson y Lindberg, 1989; Lovett, 1992; Marshall y Cadle, 1989) estos nitratos pueden ser absorbidos de modo irreversible, escapándose del lavado (Lovett y Lindberg, 1986), mientras que la porción restante es principalmente lavada desde la cubierta por la precipitación penetrante (Fenn *et al.*, 1995). Como ha sido afirmado por Kozlowski y Pallardy (1997) el N presenta la principal penetración de aniones en las hojas y las ramillas, pudiendo ser la causa de la absorción irreversible.

Los resultados de absorción neta para un ciclo anual están en el mismo rango que el de otras formaciones boscosas de árboles frondosos en bosques templados, donde la

tendencia para el  $\text{NO}_3^-$  es a ser absorbido por la cubierta, como registraron Lovett *et al.* (1984); Lindberg *et al.* (1986); Foster y Nicholson (1988), Sephrad *et al.* (1989); Neary y Gizyn, (1994) y Shibata y Sakuma (1996) y como fue registrado para algunos eventos por Crockford *et al.* (1996) y en bosques montanos por Steinhardt (1979) y Veneklass (1990).

Es necesario resaltar que los ambientes húmedos de los bosques de laurisilva en Canarias son favorables para el establecimiento de organismos como los líquenes, bacterias y algas verdiazules fijadores de nitrógeno atmosférico; la existencia de estos organismos puede producir cantidades extra de  $\text{NO}_3^-$ , que en el caso de este bosque puede esconder un flujo negativo de mayor cuantía.

Nosotros también encontramos un *NBCF* negativo de sulfatos y de cloruro. La absorción de sulfatos ha sido también descrita para algunos eventos por Neary y Gizyn (1994). La absorción de cloruro ha sido descrita igualmente por Shibata y Sakuma (1996).

El resto de los elementos tiene un flujo positivo, como es usual en la mayoría de los otros bosques del mundo (Parker, 1983). Se debe de prestar atención especial al sodio; dicho elemento es considerado como un ion inerte con respecto de la cubierta, es decir no ocurre ni absorción ni liberación (Ferm y Hultberg, 1995a), entonces el *NBCF* del sodio proviene del efecto de la cubierta de recoger más cantidad de elementos que la medida de precipitación completa medida por el método estándar de el colector de polietileno. Sin embargo algunos autores no están de acuerdo con la inercia del Na respecto de la cubierta, así Halevy y Wittwer (1965) (en Kozlowski y Pallardy, 1997) registraron que la penetración de cationes variaba del siguiente modo:  $\text{Na} > \text{Mg} > \text{Ca}$ .

Como resumen la cubierta es una fuente de sodio, potasio, calcio, magnesio, bicarbonato, fosfato y COD pero un sumidero de cloruro, nitratos, sulfatos y protones, y aunque los flujos negativos de estos elementos han sido descritos para diferentes cubiertas, este gran número de iones con flujos negativos no ha sido descrito previamente.

Se puede comparar con otros bosques a través de las flujos netos y de las relaciones de deposición, que proporcionan información sobre el efecto de las cubiertas sobre la química de la precipitación, como podemos comprobar en la Tabla. 9-3 a y b, donde se muestran datos de algunos bosques tropicales y de bosques templados. Para los bosques templados únicamente se han utilizado bosques de frondosas o cuya proporción dentro del mismo fuera mayoritaria ya que la deposición anual de nutrientes es generalmente más alta en bosques de frondosas que en bosques de coníferas, a pesar de la existencia de una menor temporada de crecimiento (asociadas a las caducas) respecto a las coníferas (Cole y Rapp, 1981 en Kozlowski y Pallardy, 1997). No nos ha sido posible encontrar datos sobre bosques templados de hoja perenne, que sin duda se aproximarían más al que nos ocupa en el presente estudio.

Las diferencias entre los flujos netos puede ser causada por los volúmenes de precipitación, las tasas de lavado, las tasas de deposición seca y/o por las tasas de toma de elementos desde la vegetación (Veneklass, 1990).

Los flujos netos de protones fueron en todos los casos revisados excepto uno negativos, produciendo relaciones de deposición menores a la unidad, que en el caso del bosque estudiado fueron altas, además de los bajos valores de los flujos netos hace suponer un bajo efecto de la cubierta sobre este elemento en comparación a otras formaciones de frondosas. Respecto de los flujos netos del calcio para los bosques tropicales se encuentran mayores valores medios que en los de frondosas, aunque estos últimos con menor variación y mayor relación de deposición, el resultado obtenido para el bosque de estudio muestra un bajo valor para el flujo neto del calcio y un bajo valor de deposición, siendo ambos valores parecidos a los de un bosque de frondosas en Japón.

*Los Flujos Netos Hidrológicos y Químicos Asociados de un Bosque de Laurisilva en Tenerife*

		Prec H	Ca	Mg	Na	K	HCO <sub>3</sub>	Cl	S	N	P
<b>Bosques tropicales</b>											
En Parker (1983)	Australia		50	25		125					
En Parker (1983)	Australia		56	21		97					
En Parker (1983)	Ghana		29	18		220				13	3,7
En Parker (1983)	Panamá		14	8		63					-0,5
En Parker (1983)	Costa de Marfil		23	34		60				60	1,5
En Parker (1983)	Costa de Marfil		19	41		82				13	5,5
En Parker (1983)	Malaysia		15	2		40					
Franken y Leopoldo (1984), a.c.	Brasil		1	7,8		20				7,4	0,45
Franken y Leopoldo (1984), a.c.	Brasil		7,2	3,1		13				5,6	0,54
En Parker (1983)	Venezuela		-23	-2		-6				4	-14
En Parker (1983)	Venezuela		-22	0,5		4				8	-20
Sinun et al. (1992)	Sabah Malaysia	3627	42,9	39,5	-1,6	409,7					14,9
Striegel et al. (1994),a.	Butkit Soeharto, Indonesia	2465	3,2	0,7	0	33,3					1,3
Striegel et al. (1994),a.	Lempake, Indonesia	2030	6,1	0,91	-1,7	22,6					0,5
<b>Bosques tropicales montanos</b>											
En Parker (1983)	Puerto Rico		21	29		74					
En Parker (1983)	Venezuela		7	3		70				8	1,4
Edwards (1982)	N.Guinea	3800	19	10,9		71,1				29,6	2,5
Steinhardt (1979) b.	Venezuela	1576	1,3	-1,9	1,1	67,1					-1,4 0,28
Jordan et al. (1972) (d)	Puerto Rico	3750	13	4,3	26	136,8					
Tanner (1977)	Jamaica	2600	7,8	6,5	8,7	35,6					0
Venaklaas (1990) a, b.	Colombia 2550 m s.n.m.	2115	17	7,5	2,8	87,3	16,9	14,7		4,4	0,95
Venaklaas (1990) a, b.	Colombia 3370 m s.n.m.	1453	11,5	4,5	-1,5	26,1	6,2	14,9		-1,7	-0,1
<b>Bosques de frondosas caducas</b>											
Neary y Gizyn (1994),a. c.	Plastic Lake Canada (3)	1109	0,045	6,97	1,33	0,16	9,632	1,36	5,41	1,19	
Atteia y Dambrine (1993) b, c.	Jura. Suiza			3,26	0,88	0,85	9,06	2,26	8,24	3,31	
Matzner y Meiwes (1994) b, c.	Sollings. Alemania	1000	-0,04	8,5					10,2	0,77	
Shibata y Sakuma (1995) b, c.	Tomakomai. Japón	1189	-0,53	1,5	0,73	1,61	12,51	27,5	-0,7	0,8	-0,4
Ranger et al. (1995)	Las Árdenas. Francia			2,3	1,5		31,2			0	0 0,7
Macdonald et al. (1993) b, c.	Grandes Lagos. EE.UU.	801	-0,34	5,04	1,23		9,2			0,57	0,79
Macdonald et al. (1993) b, c.	Grandes Lagos. EE.UU.	855	-0,36	9,67	3,12		20,91			0,85	0,48
Macdonald et al. (1993) b, c.	Grandes Lagos. EE.UU.	950	-0,39	7,04	1,93		15,75			0,86	0,47
Macdonald et al. (1993) b, c.	Grandes Lagos. EE.UU.	865	-0,38	9,64	2,79		14,66			1,26	0,25
Macdonald et al. (1993) b, c.	Grandes Lagos. EE.UU.	865	-0,37	8,77	2,85		14,51			1,32	1,25
Macdonald et al. (1993) b, c.	Grandes Lagos. EE.UU.	943	-0,46	10,6	1,98		12,18			2,39	-0,4
Neary y Gizyn (1994) a, c.	Harp Lake Canada (3)	1105	-0,22	5,12	1,31	0,1	11,65	1,36	1,98	0,18	
Cappellato y Peters (1995)b, c.	Georgia Piedmont. EE.UU.		-0,62	12,7	4,88	0,8	43,36	4,75	3,75	-1,7	
<b>Bosques frondosas perennes</b>											
Este trabajo, a, b, c.	Tenerife. Canarias	626	-0,002	2,2	1,75	0,91	36,44	24,3	-1,7	-0,6	-0,7 0,3

Tabla. 9-3 a Flujos anuales de los elementos en los flujos netos bajo cubierta (kg/ha año<sup>-1</sup>) y Precipitación (mm) para diferentes bosques del mundo. (a) sólo PO<sub>4</sub>-P (b) sólo NO<sub>3</sub>-N (c) sólo SO<sub>4</sub>-S (d) Volúmenes de precipitación de Odum et al. (1970)

		Prec H	Ca	Mg	Na	K	HCO <sub>3</sub>	Cl	S	N	P
<b>Bosques tropicales</b>											
Franken y Leopoldo (1984), a.c.	Brasil					6,88				2,22	3,85
Franken y Leopoldo (1984), a.c.	Brasil					4,82				1,93	4,38
Edwards (1982)	N.Guinea	3800	6,28	9,38		10,7				5,55	6
Steinhardt (1979) b.	Venezuela	1576	1,23	0,63	1,33	26,8		0	0	0,86	1,25
Jordan et al. (1972) (d)	Puerto Rico	3750	1,6	1,88	1,45	8,52					
Tanner (1977)	Jamaica	2600	2,42	2,3	1,43	6,01					
Venaklaas (1990)a, b.	Colombia 2550	2115	2,68	3,34	1,12	12,1	1,87	1,56	1,24	2,32	
Venaklaas (1990)a, b.	Colombia 3370	1453	2,58	2,8	0,91	4,78	1,46	1,89	0,86	0,83	
Sinun et al. (1992)	Sabah Malaysia	3627									
Striegel et al. (1994),a.	Butkit Soeharto, Indonesia	2465	1,65	2,4	1	14,3					3
Striegel et al. (1994),a.	Lempake, Indonesia	2030	2,49	3,28	0,83	4,7					1,86
<b>Bosques de frondosas caducas</b>											
Neary y Gizyn (1994),a. c.	Plastic Lake Canada	1109	1,07	3,22	3,6	1,17	9,49	1,66	1,57	1,23	
Atteia y Dambrine (1993) b, c.	Jura. Suiza			1,56	8,04	1,52	4,43	1,43	2,2	1,68	
Matzner y Meiwes (1994)b, c.	Sollings. Alemania	1000	0,95	2					1,48	1,08	
Shibata y Sakuma (1995)b, c.	Tomakomai. Japón	1189	0,2	1,26	1,44	1,07	3,91	2,67	0,98	1,15	0,83
Ranger et al. (1995)	Las Árdenas. Francia			1,12	1,47		5,73			1	1 3,3
Macdonald et al. (1993)b, c.	Grandes Lagos. EE.UU.	801	0,14	3,58	4,97		22,9			1,09	1,26
Macdonald et al. (1993)b, c.	Grandes Lagos. EE.UU.	855	0,06	5,67	8,61		111			1,1	1,13
Macdonald et al. (1993)b, c.	Grandes Lagos. EE.UU.	950	0,06	3,93	6,22		22,6			1,11	1,12
Macdonald et al. (1993)b, c.	Grandes Lagos. EE.UU.	865	0,07	4,54	6,26		33,6			1,16	1,06
Macdonald et al. (1993)b, c.	Grandes Lagos. EE.UU.	865	0,08	4,22	6,38		33,2			1,16	1,30
Macdonald et al. (1993)b, c.	Grandes Lagos. EE.UU.	943	0,24	4,34	4,19		16,6			1,2	0,94
Neary y Gizyn (1994),a. c.	Harp Lake Canada (3)	1105	0,66	2,53	3,53	1,11	10,8	1,72		1,2	
Cappellato y Peters (1995)b, c.	Georgia Piedmont. EE.UU.		0,18	4,88	8,04	1,38	39,2	2,21	1,30	0,65	
<b>Bosques frondosas siempreverdes</b>											
Este trabajo, a, b, c.	Aqua García (Tenerife)	626	0,73	1,29	1,31	1,02	6,06	1,26	0,98	0,93	0,67 1,18

Tabla. 9-3 b Relaciones de deposición de los elementos (adimensional) y Precipitación (mm) para diferentes bosques del mundo. (a) sólo PO<sub>4</sub>-P (b) sólo NO<sub>3</sub>-N (c) sólo SO<sub>4</sub>-S (d) Volúmenes de precipitación de Odum et al. (1970)

El valor medio del flujo de magnesio es mucho menor en los bosques templados que en los tropicales, aunque de nuevo las relaciones de deposición fueron mayores, pero de magnitudes muy parecidas, el bosque de estudio presentó un flujo neto bajo para el magnesio y la menor relación de deposición, mostrando la poca intervención de la cubierta respecto de este elemento. En los bosques tropicales abundaron los flujos netos negativos para el Na, no obstante los valores positivos superaron a los encontrados en los bosques de frondosas templadas, teniendo el bosque de estudio un valor similar a los mismos y una relación de deposición al igual que el resto de los bosques cercana a la unidad mostrando de este modo la inercia de sodio respecto de la cubierta arbórea. El K es el elemento más móvil en la cubierta lo que aprecia por las altas relaciones de deposición que fueron como valor medio mucho mayores para los bosques templados que para los tropicales, posiblemente debido a que muchos de ellos se hallen sobre terrenos graníticos con grandes cantidades de este elemento, aún así los flujos netos fueron mayores para los bosques tropicales evidenciando que las cantidades de nutrientes que se mueven en el seno de estos bosques son mayores, para el bosque de estudio el comportamiento se asemeja más al de los bosques tropicales con un valor alto de los flujos netos y una menor relación de deposición. Tukey (1970), pudo mostrar un pequeño flujo neto y una baja relación de deposición de K ya que la cantidad de potasio lavable llega a ser limitante cuando las cantidades de lluvia son grandes o con altas intensidades.

Solamente se encontró un dato de bicarbonatos, que se ajusta estrechamente al encontrado para el bosque de estudio. Con respecto de los cloruros el valor del bosque de estudio fue negativo encontrando únicamente este valor negativo en la tabla para el ya mencionado bosque de Japón el resto de los valores tuvieron flujos netos positivos y por lo tanto relaciones de posición mayores a la unidad. Los datos para los sulfatos de bosques tropicales pueden estar sesgados ya que el estudio realizado en Colombia coincidió con erupciones volcánicas acrecentando las cantidades de sulfatos, los bosques de frondosas presentan valores positivos pero de no muy grande cuantía y las relaciones de deposición se acercan a la unidad, lo que en comparación al bosque de estudio que presenta un valor negativo pero una relación de deposición menor a la unidad pero muy cercano a la misma no presenta una gran alteración de la tendencia. Para los nitratos varios bosques tuvieron flujos netos negativos, y los valores fueron más bajos para los de frondosas que para los tropicales, teniendo además estos últimos relaciones de deposición mayores, y estando los de frondosas con relaciones de deposición cercanas a la unidad; el bosque de estudio tuvo un flujo negativo y una relación de deposición extremadamente baja. Por último el valor del bosque de estudio de los flujos netos de fosfatos es similar al de otros bosques del mundo y muestra una relación de deposición cercana a la unidad. De este modo los datos registrados en el Monte de Agua García están dentro de los rangos de datos de los bosques de lugares tropicales y templados.

Los elementos Ca, Mg y K son macronutrientes que son esenciales para el metabolismo y crecimiento de las plantas. El Calcio es de fundamental importancia para la permeabilidad de la membrana y el transporte de iones. El Mg es un constituyente de la clorofila y se comporta comúnmente como un activador de las enzimas envueltas en el metabolismo energético. El principal papel del potasio es de ser un activador de las enzimas que controlan la osmoregulación y las relaciones hídricas de las plantas. El uso eficiente de estos nutrientes para la producción primaria de las plantas es una adaptación que presumiblemente confiere a las plantas que la poseen una capacidad adaptativa en suelo pobres oligotróficos (Birk y Vitousek, 1986). Los flujos de la precipitación neta tienden a reflejar las marcadas tendencias de las propiedades del suelo, ya que uno de los factores que influyen en el flujo neto de nutrientes se encuentra la disponibilidad de nutrientes en el suelo y el desfronde no es la única vía por la que los nutrientes son devueltos al suelo del bosque. De ésta forma Veneklass (1990) aseveró que cuando la captación de nutrientes desde el suelo es difícil, es de esperar que los árboles puedan usar los nutrientes eficientemente y limitar las pérdidas por lavado; así los bajos flujos de la precipitación neta de algunos elementos pueden ser debidos al uso económico de esos elementos por parte de los árboles y las plantas, que en bosques tropicales dada la disponibilidad limitada de N y P de acuerdo con las conclusiones de Grubb (1977), Vitousek (1984) y Vitousek y Sandford (1986), estos autores

sugirieron la optimización de la eficiencia del uso de estos elementos. De acuerdo con Sollins y McCorison (1981), de modo general la pérdida de N tiene un particular significado ya que N es usualmente el limitante del crecimiento en los bosques. Para los cationes también existiría este proceso, así de acuerdo con MacDonald, *et al.* (1993) para el Ca y el Mg los flujos fueron bajos donde los cationes que contiene el suelo están limitados y según Herwitz (1987) la utilización del Ca y del Mg es más eficiente en bosques tropicales que crecen sobre suelos con bajas cantidades de Ca y Mg disponible y mediante los *NBCF* el contenido de Ca y Mg intercambiables en el suelo aumenta, y los valores de la eficiencia del uso de los nutrientes disminuyen.

La eficiencia del uso de los nutrientes (NUE) está generalmente definida por la producción biomasa por unidad de toma de ese nutriente (Gerloff, 1976). Según Herwitz (1987) en bosques tropicales, se ha detectado que los *NBCF* contribuyen en más de 80% al retorno al suelo del Mg y del K (Clements y Colon, 1975), y del 25% del retorno del Ca total (Crowther, 1987). De acuerdo con una revisión efectuada por este mismo autor el lavado acuoso contribuyó entre un 9–25% del retorno del Ca al suelo, 28–83 % del retorno del Mg total al suelo y entre 53 al 92% del retorno total de K. La contribución media del lavado fue de 18% del retorno de Ca, 43% del retorno de Mg y 71% del retorno de K. La inclusión del escurrido cortical puede aún incrementar en mayor medida estas proporciones (Herwitz, 1986).

En la Tabla 9-4 se recogen algunas propiedades generales de los suelos, se observan altos contenidos de Ca y Mg, a pesar de que los *NBCF* fueron más bien bajos, esto podría ser posible ya que en suelos ricos eutróficos donde los nutrientes no son limitantes potencialmente, se puede esperar que la eficiencia en el uso de los nutrientes esté bien desarrollada (Herwitz 1987). De este modo el efecto contrario no existiría, de forma que cuando un elemento tiene un alto contenido en un bosque, la circulación del mismo no tiene por que ser mayor, no obstante resultados contrarios han sido descritos para la circulación del Ca y del Mg en bosques en Malaysia por Crowther (1987), o como concluyeron Vitousek y Sandford (1986) con base a la revisión de Parker (1983) para los bosques tropicales en suelos moderadamente fértiles que pierden más potasio y calcio vía precipitación neta que lo que lo hacen en suelos no fértiles, o como también ha sido observado en la zona templada (Tsutsumi y Nishitani, 1984).

El K puede llegar a ser limitante en este tipo de suelo debido a las alofanas o a la precipitación con sulfatos, no obstante su *NBCF* es relativamente alto, lo que parece indicar que no es limitante. Los fosfatos debidos a las propiedades ándicas de este tipo de suelo también puede llegar a ser un factor limitante en este tipo de suelos pero dados su *NBCF* positivo y su relación de deposición cercana a la unidad parece no ser limitante. A pesar de los grandes aportes de sodio a la parcela, los bajos *NBCF* concuerdan con las bajas concentraciones de este elemento en el suelo, explicadas principalmente por procesos de lavado.

Tabla 9-4. Propiedades generales de los suelos de dos sondeos a dos profundidades (0-30 y 30-60 cm), tomados a mitad de pendiente (muestra 1) y en la zona baja de la parcela (muestra 2)

muestra	Prof.(cm)	pH <sub>agua</sub>	pH <sub>KCl</sub>	CE dS/m	%C	POlsen mg/Kg	Ca	Mg cmolc/kg	Na	K	NH <sub>4</sub> mg/kg
1	0-30	6,0	5,1	0,33	7,8	42,2	13,6	5,0	0,5	0,8	4,9
1	30-60	5,7	4,6	0,26	4,4	44,0	3,2	1,5	0,5	0,6	5,7
2	0-30	6,0	5,0	0,41	5,8	53,6	12,7	3,6	0,6	0,7	5,0
2	30-60	5,4	4,5	0,43	4,7	55,6	4,5	1,5	0,6	0,5	5,2

### 9.3.2. BALANCES

Una estimación precisa de los balances iónicos de un ecosistema requiere la medida de todos los flujos de aporte y de perdidas (Domingo *et al.*, 1994). Si consideramos la parcela como una cuenca (suponemos que no hay intercambio a través del acuífero), tomando los aportes como la precipitación completa corregida por el efecto de las cubiertas en capturar

partículas de la deposición seca, y tomándolo las pérdidas únicamente como el valor medio de la escorrentía cortical de la parcela ya que no hubo retirada de biomasa durante el año de estudio hidrológico estudiado, desestimando de este modo la infiltración del agua y otros aportes y pérdidas, con el fin de comparar las distintas aproximaciones al balance.

Se recogió durante el año de medición un exceso de infiltración como escorrentía superficial de 0,46 mm que representa en 0,73% como porcentaje de la lluvia y el 1,44% como porcentaje de la precipitación penetrante. Comparando estos datos con otros obtenidos por Sinun *et al.* (1992), para un bosque tropical que oscilaron entre el 2,0-3,5 % de la precipitación penetrante observamos que son similares. En la pendiente de 8° sólo se detectó escorrentía superficial cuando la precipitación fue mayor a 85 mm por semana, en la pendiente de 10° cuando fue mayor a 50,8 mm y en la pendiente de 12° cuando fue mayor a 9,6 mm; para ésta última pendiente se encuentra una buena correlación entre la precipitación y el volumen de escorrentía por unidad de superficie, del modo  $y = 16 \cdot 10^{-3} x - 0,002$ ,  $r^2=0,86$  donde  $y$  es la escorrentía superficial por unidad de superficie (mm) y  $x$  es la precipitación (mm).

La aproximación usual, mediante el Balance I, (Tabla. 9-1) está basado en la precipitación completa medida con colectores de polietileno, que como ya se dijo son menos eficientes que las cubiertas vegetales en la captura de partículas de la deposición seca (Domingo *et al.*, 1994). Se ha realizado un método adicional, el Balance II (Tabla. 9-1), corrigiendo estos aportes adicionales de la vegetación, mediante la determinación de la fracción que representa en los flujos netos bajo cubierta el lavado de las mismas, lo que ha sido estimado a través de la bibliografía (Domingo *et al.*, 1994) tomando valores mínimos y máximos de la tasa de lixiviado. Los balances sólo son aplicables cuando el flujo de nutrientes ha sido positivo.

Los resultados de todos los balances (I, II Max. y II Min.) muestran que ninguna pérdida de elementos supera los aportes, y no se presentan grandes diferencias entre dichos balances para ningún elemento (Tabla. 9-2 y Figura. 9-1), este hecho puede ser interpretado como la pequeña importancia que tiene la deposición seca con la parcela de acuerdo con Domingo *et al.* (1994) que concluyeron que las mayores diferencias entre el balance (I) y el balance (II) son para los elementos que tiene principalmente origen externo, en contraste, los iones cuya fuente no es principalmente la deposición seca, no muestran diferencias apreciables entre ambos métodos.

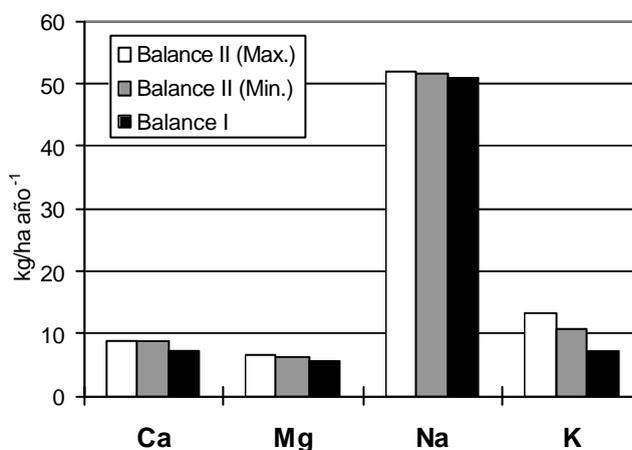


Fig. 9-1 Resultados de todos los balances: I, II Max. y II Min.

La retención de algunos elementos, tales como el calcio o el sodio que no forman parte importante de la biomasa de las plantas, sugieren alguna inmovilización por la precipitación con almacenamientos temporales que no pueden ser movilizados salvo por grandes eventos tormentosos (Domingo *et al.*, 1994), aunque los valores no son altos comparados con los de la bibliografía. Esta suposición está en consonancia con el flujo negativo de otros elementos encontrado en esta parcela. Comparando estos datos con los algunas cuencas de estudio (Likens *et al.*, 1977; Lledó, 1990; Feger *et al.*, 1990; Domingo *et al.*, 1994), podemos observar que las diferencias entre los dos métodos para el Monte de Agua García son muy pequeñas. La alta retención de sulfatos en el primer balance de acuerdo con Durand *et al.* (1992) puede actuar como un importante proceso tamponador en relación con los aportes de protones.

### 9.3.3. REGRESIONES

Intentamos separar las contribuciones externas e internas, de cada elemento de modo independiente, en los flujos netos bajo cubierta mediante la utilización del método propuesto por Lovett y Lindberg (1984) consistente en un modelo de regresión múltiple que trata el intercambio iónico de la cubierta como un fenómeno explicable estadísticamente, estimando la deposición seca total, incluidos tanto gases como partículas sobre ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) este método ha sido posteriormente usado por Puckett (1990); Neary y Gizyn (1994); Domingo *et al.* (1994) y Capellato y Peters (1995) entre otros.

#### 9.3.3.1. SIMPLES

De acuerdo con Capellato y Peters (1995) antes de aplicar el modelo de regresión múltiple de Lovett y Lindberg (1984) se deben de realizar unas regresiones simples para examinar, en que casos, las variables independientes de forma individual absorben variabilidad para los flujos netos bajo cubierta (*NBCF*) y cuando las variables utilizadas en este modelo de Lovett y Lindberg (1984) que son: el periodo seco antecedente (*ADP*) y la cantidad de precipitación (*P*), son la mejor combinación de las probadas. Otras variables han sido también examinadas tales como la duración de la precipitación durante la semana de recogida (*ED*), la intensidad media de la lluvia (*MRI*) y la evaporación por la interceptación de la cubierta (*I*). Los datos utilizados son los correspondientes a las 24 semanas en las que se registraron precipitación penetrante y escurrido cortical. Las correlaciones lineales fueron las que mejor ajuste tuvieron, escogida en relación a los máximos valores de  $r^2$ .

##### 9.3.3.1.1. PERIODO SECO ANTECEDENTE (*ADP*)

Se asume que el periodo antecedente seco es proporcional a la deposición seca acumulada con anterioridad a la lluvia y lavada posteriormente durante el evento de precipitación (Lovett y Lindberg, 1984). Basándose en la importancia relativa del lavado de la cubierta y de la deposición seca en los *NBCF*, periodo antecedente seco se espera como un predictor significativo para los sulfatos (Eaton *et al.*, 1978; Lovett y Lindberg, 1984; Lindberg y Lovett, 1992), nitratos y protones, ya que son los constituyentes primarios de la deposición seca. Este principio está totalmente de acuerdo con los resultados obtenidos en Agua García, como podemos ver en la Tabla. 9-5, el periodo seco antecedente sólo tuvo significación (reseñada en la tabla) para los N-NO<sub>3</sub> y S-SO<sub>4</sub>.

VARIABLE	Element	H	Ca	Mg	Na	K	CO <sub>3</sub> H	Cl	SO <sub>4</sub> S	NO <sub>3</sub> -N	PO <sub>4</sub> P	C
<b>Cantidad de precipitación</b>	Significación	n.s.	***	**	**	***	***	***	**	n.s.	n.s.	***
	R	-0,198	0,816	0,610	0,512	0,781	0,701	0,617	0,614	0,031	0,215	0,776
	a		-0,358	-0,107	-1,181	-0,015	-3,1422	-2,7703	-0,121		-0,048	-1,82
	b		0,016	0,0066	0,043	0,0588	0,1494	0,0948	0,003		0,0021	0,2654
	y=0		22,2	16,2	27,5	0,3	21,0	29,2	36,6		23,0	
	b Col.2250		0,009	0,0037	0,0017	0,0372		0,0071	0,007		0,0038	
	b Col.3370		0,007	0,0029	-8E-04	0,0166		0,0038	0,01		-4E-05	
<b>Evaporación por interceptación</b>	Significación	n.s.	***	**	*	***	***	**	**	n.s.	n.s.	***
	R	-0,182	0,782	0,558	0,459	0,780	0,688	0,561	0,574	-0,031	0,251	0,697
<b>Duración de la lluvia</b>	Significación	***	n.s.	n.s.	n.s.	**	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	*	n.s.
	R	0,655	0,120	-0,360	-0,280	0,538	-0,161	-0,050	-0,064	-0,306	-0,443	0,237
<b>Periodo seco antecedente</b>	Significación	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	*	**	n.s.	n.s.
	R	-0,039	-0,335	-0,382	-0,346	0,021	-0,053	-0,383	-0,450	-0,515	0,262	-0,353
<b>Intensidad media de la lluvia</b>	Significación	n.s.	*	**	*	*	n.s.	*	n.s.	n.s.	n.s.	**
	R	0,171	0,405	0,561	0,500	0,437	0,054	0,417	0,355	0,313	0,198	0,555

Tabla. 9-5 Estadísticas de los coeficientes de regresión simples calculados para los flujos netos bajo cubierta de los elementos ( $\text{kg/Ha yr}^{-1}$ ) y distintas variables: Cantidad de precipitación (*P*) (mm), Evaporación por

interceptación de la cubierta ( $I$ ) (mm), Duración de la lluvia ( $ED$ ) (horas), periodo seco antecedente ( $ADP$ ) (días) e Intensidad media horaria de la lluvia ( $MRI$ ) ( $\text{mm h}^{-1}$ ), y la significación de los coeficientes: \*\*\*  $p < 0,001$ ; \*\*  $p < 0,01$ ; \*  $p < 0,05$  y n.s. no significativo. Parámetros de la regresión ( $y = a + bx$ ), y corte con el eje de abscisas ( $y=0$ ). Datos obtenidos para los coeficiente  $b$  por Veneklass (1990) en dos bosques de Colombia (a 2250 m s.n.m. y a 3370 m s.n.m.).

La falta de significación para el resto de los elementos posiblemente este causada por la poca importancia de la deposición seca sobre los flujos netos bajo cubierta, tal y como se mostró anteriormente en la aplicación de los balances (apartado anterior). Pero conocemos que durante este año existió un exceso de elementos en forma de polvo de origen terrestre (la "calima" polvo y partículas provenientes de los desiertos del Sahara en el norte de Africa) como comprobamos en el capítulo 7, y la existencia de fuentes externas de contaminación con origen antrópico, así la poca importancia de la deposición seca en los flujos netos bajo cubierta debe de ser debida al tipo de cubierta vegetal o al efecto de formación de almacenamiento con retención de algunos elementos, que serán movidos sólo tras grandes eventos tormentosos, como pudimos ver anteriormente, pudiendo este hecho enmascarar la correlación entre el periodo seco antecedente y los flujos netos bajo cubierta y crear un intervalo temporal entre la llegada de la deposición seca y su medida como  $NBCF$ .

Generalmente la ausencia de significación estadística para regresiones lineales simples puede ser atribuida a las múltiples variables que controlan la química de la precipitación penetrante. Ambas tasas de lavado y de deposición seca están influenciadas por la cubierta y su estructura y de las características del follaje (como el índice de área foliar y el tipo de hoja) y del espesor de las cutículas.

El efecto de la cubierta se puede explicar por el hecho de que el bosque de la parcela de Agua García es un bosque joven, y la altura de los árboles es muy similar y homogénea (como se calculo en el capítulo 5), no hay calveros y las hojas son usualmente grandes (capítulo 3), enteras, coriáceas con una textura brillante y lustrosa, y dispuestas paralelamente al suelo, sin una mayor área de contacto (respecto a un colector estándar), lo que puede explicar en parte el descenso de la capacidad de recoger grandes cantidades de los principales iones que se midieron en la precipitación completa con los colectores de polietileno sobre el bosque.

#### 9.3.3.1.2. CANTIDAD DE PRECIPITACIÓN ( $P$ )

Ya que el lavado de la cubierta ocurre principalmente por el intercambio y difusión de los constituyentes desde la hoja a la lluvia que se acumula sobre la superficie de la hoja (Lovett y Lindberg, 1984), se asume que la cantidad precipitación está directamente relacionada al lixiviado de iones desde la cubierta (Capellato y Peters, 1995). Cantidades apreciables de nutrientes minerales son perdidas a través de los espacios libres o de los apoplastos de las hojas por la acción de lavado de la lluvia (Kozlowski y Pallardy, 1997).

La capacidad de la pérdida de nutrientes por el lavado varía entre las especies. Las hojas con una superficie gruesa y ceramentosa son lixiviadas y mojadas con mayor dificultad, y las hojas senescentes son más rápidamente lavadas que las hojas jóvenes (Kozlowski y Pallardy, 1997), siendo este un bosque perennifolio y no caducifolio, la permanencia de las hojas en los árboles puede ser elevada propiciando el aumento de lavado, así mismo para el bosque de laurisilva canario no existe actualmente información sobre el espesor de las cutículas.

Debido al desgaste de las cutículas foliares (Kozlowski y Pallardy, 1997), la lluvia ácida puede incrementar la tasa del lavado de cationes desde el follaje, ya que el lavado envuelve una serie de reacciones de intercambio catiónico, en la que los protones de la lluvia

reemplazan cationes en los lugares de enlace en la cutícula foliar y en la epidermis (Lovett *et al.*, 1989). En contraste con la abundante pérdida de minerales por el lavado desde las hojas afectadas por la contaminación atmosférica, sólo hay una relativa pérdida de nutrientes por lavado desde las hojas sanas Kozlowski y Pallardy (1997).

La clara correlación positiva entre los flujos netos bajo cubierta de la mayoría de los elementos y la cantidad de precipitación (Tabla. 9-5) sugiere que el proceso de lavado es el dominante en la mayoría de los casos, significando una mayor lavado en los periodos con abundante precipitación (Figuras. 9-2 y 9-3), de acuerdo con (Veneklass, 1990) que registró que las altas tasas de lavado foliar deben ser debidas a las frecuentes y abundantes precipitaciones, encontrando que los grandes flujos de materiales son principalmente causados por grandes volúmenes de lluvia. Sin embargo hay tres elementos sin una relación significativa:  $H^+$ ,  $PO_4\text{-P}$  y  $NO_3\text{-N}$ . Un caso similar fue descrito por Neary y Gizyn (1994). Los protones, los sulfatos y los nitratos son principalmente procedentes de la deposición seca como pudimos ver anteriormente en la bibliografía, por ello los resultados están totalmente en consonancia con lo esperado.

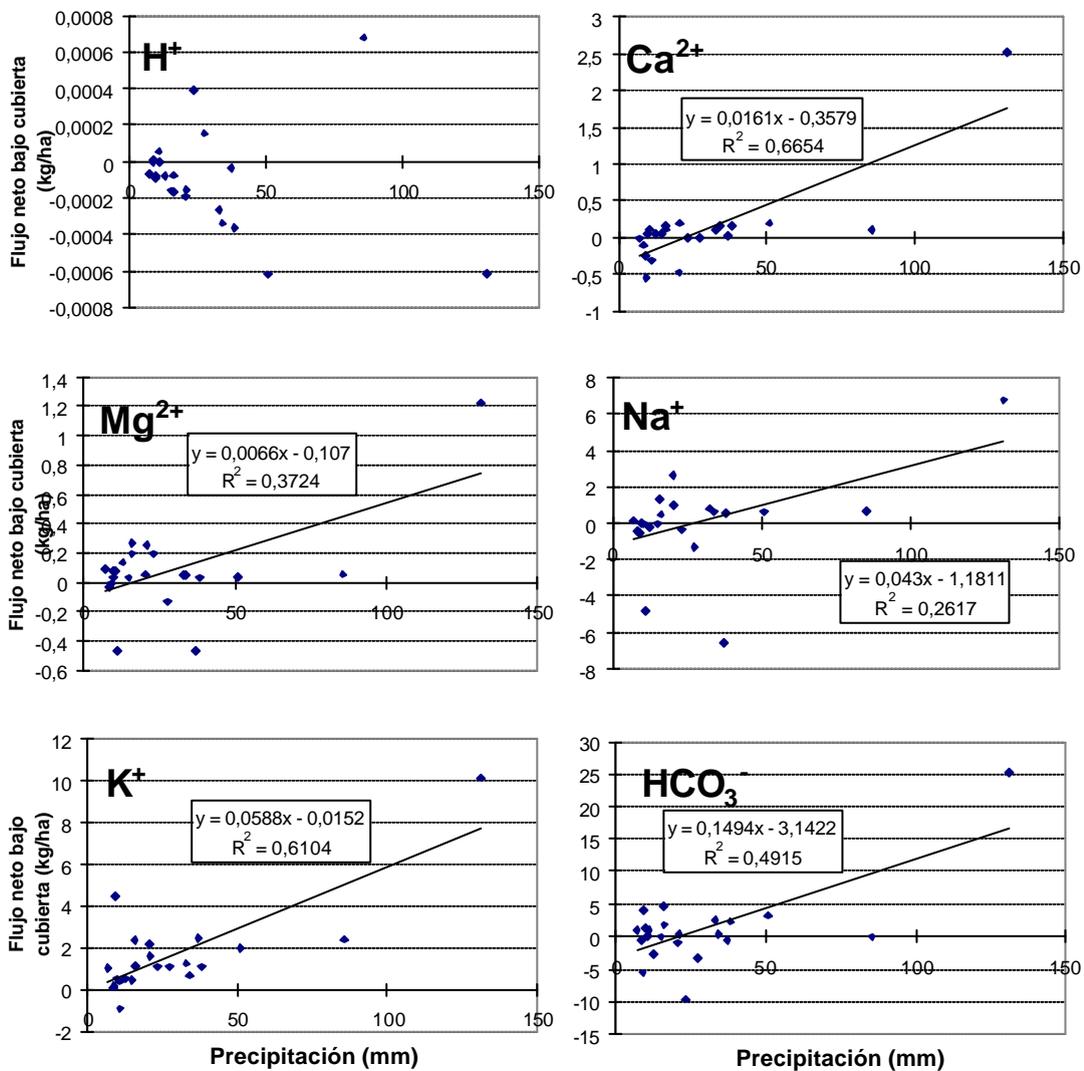


Fig 9-2 Regresiones simples calculadas para los flujos netos bajo cubierta de los elementos (kg/Ha yr-1) y la Cantidad de precipitación ( $P$ ) (mm), Coeficientes de la regresión y coeficiente de correlación.

La falta de correlaciones significativas puede ser debida a que la absorción enmascara las relaciones entre los aportes y la cantidad de precipitación (Crockford, 1996) o porque a veces la cantidad de precipitación no es un predictor estadísticamente significativo para el lavado de los cationes, como fue observado por Capellato y Peters (1995) ya que el periodo seco antecedente no sólo proporciona partículas y gases para la deposición seca, sino que también rellena el almacenamiento de nutrientes de la cubierta (Lovett y Schaefer, 1992).

La contribución de la deposición seca es probablemente pequeña: se puede esperar que sea en gran medida independiente de la lluvia y de este modo se puede causar una menos clara relación entre los flujos netos bajo cubierta y la cantidad de lluvia, un patrón similar fue descrito por Veneklass (1990) para bosques montanos en Venezuela.

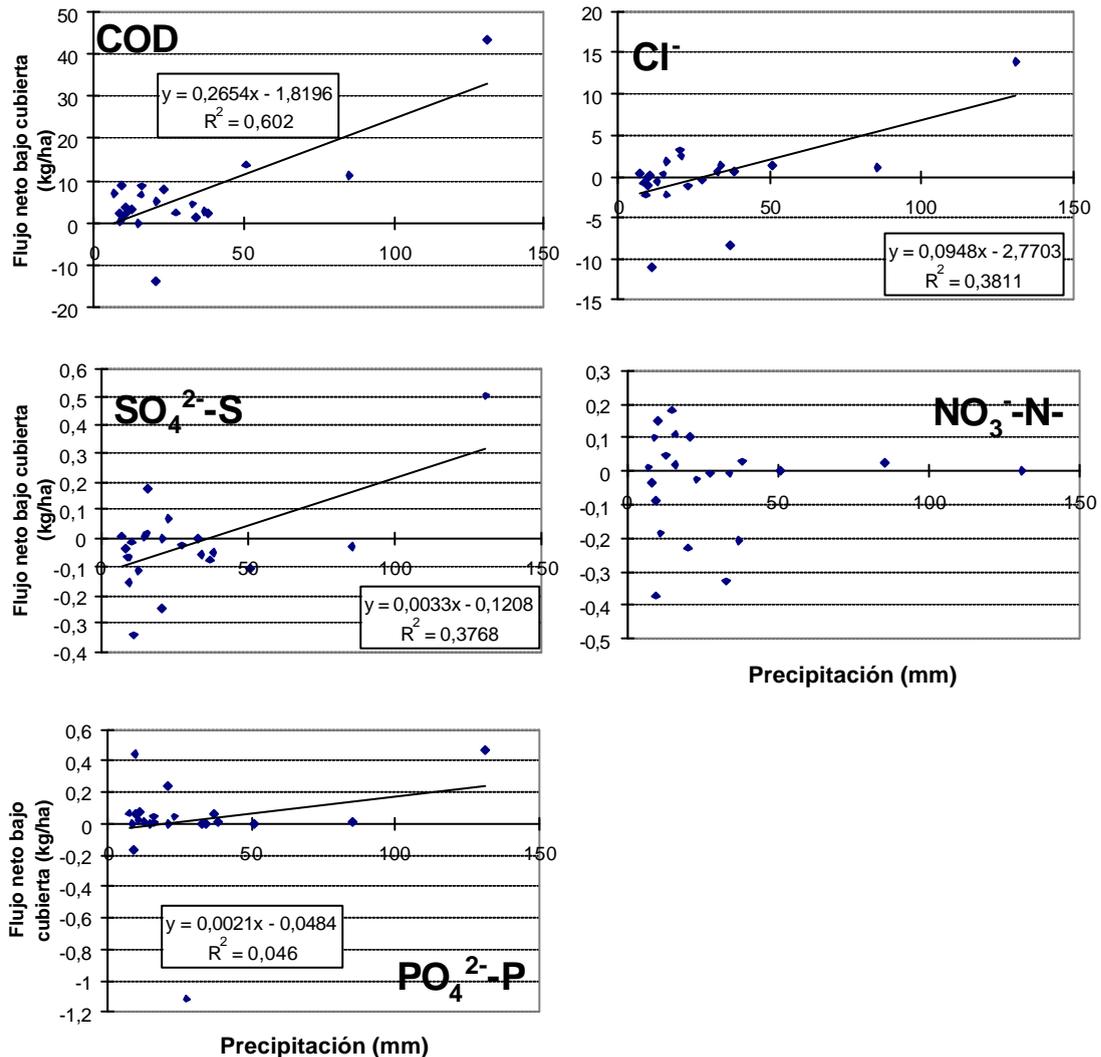


Fig 9-3 Regresiones simples calculadas para los flujos netos bajo cubierta de los elementos (kg/Ha yr-1) y la Cantidad de precipitación (P) (mm), Coeficientes de la regresión y coeficiente de correlación.

Estas relaciones lineales sugieren una más o menos tasa constante de adicción de nutrientes por unidad de volumen (Veneklass, 1990). Así podemos comparar los coeficientes de regresión (Tabla. 9-4) que representan la adicción media o liberación de elementos por unidad de precipitación (mg l<sup>-1</sup>) por la cubierta, con otras obtenidas para bosques montanos de Colombia (Veneklass, 1990), podemos observar que los valores del bosque de laurisilva de la parcela de estudio son iguales o mayores que los del bosque colombiano, esto puede ser debido a las grandes diferencias en los valores de precipitación anual, pequeños en la laurisilva canaria lo que incrementa la tasa de adicción por unidad de precipitación (mg l<sup>-1</sup>).

Aunque las grandes diferencias entre los dos bosques vienen dadas porque en el bosque de Colombia las regresiones lineales interceptan el eje de ordenadas de un modo no significativamente diferente de cero, y para la mayoría de los iones en el bosque de canarias tienen un valor negativo. La explicación de este hecho puede venir dada por la retención de algunos elementos, tales como el calcio y el sodio no presentes en gran medida en la biomasa vegetal, sugiriendo algún tipo de inmovilización en almacenamientos temporales que sólo serán movidos por grandes eventos tormentosos (Domingo *et al.*, 1994), estos elementos entre otros necesitan grandes volúmenes de agua para ser movidos en el bosque de laurisilva de Agua García, como podemos ver en la Tabla. 9-5, y la Figura. 9-3 el calcio necesita 22,2  $\text{lm}^{-2}$  para ser lavado ( $y=0$ ), y el sodio necesita 27,5  $\text{lm}^{-2}$ . Sin embargo y de acuerdo con Kozlowski y Pallardy (1997) los cationes monovalentes (p.e., Na, K) son rápidamente lavados de las hojas y transferidos al suelo, principalmente a través de la precipitación penetrante; en comparación los cationes divalentes (p.e. Ca, Mg), que son más fuertemente retenidos, son transferidos al suelo principalmente por la caída de las hojas, y en nuestro caso el magnesio fue más fácilmente lavable que el Na. Este comportamiento está también en desacuerdo con lo postulado por Ferm & Hultberg (1995) que consideraron al Na como inerte con respecto de la cubierta, así ni absorción ni lavado debería ocurrir, y el lavado de este ion debe de ser grande.

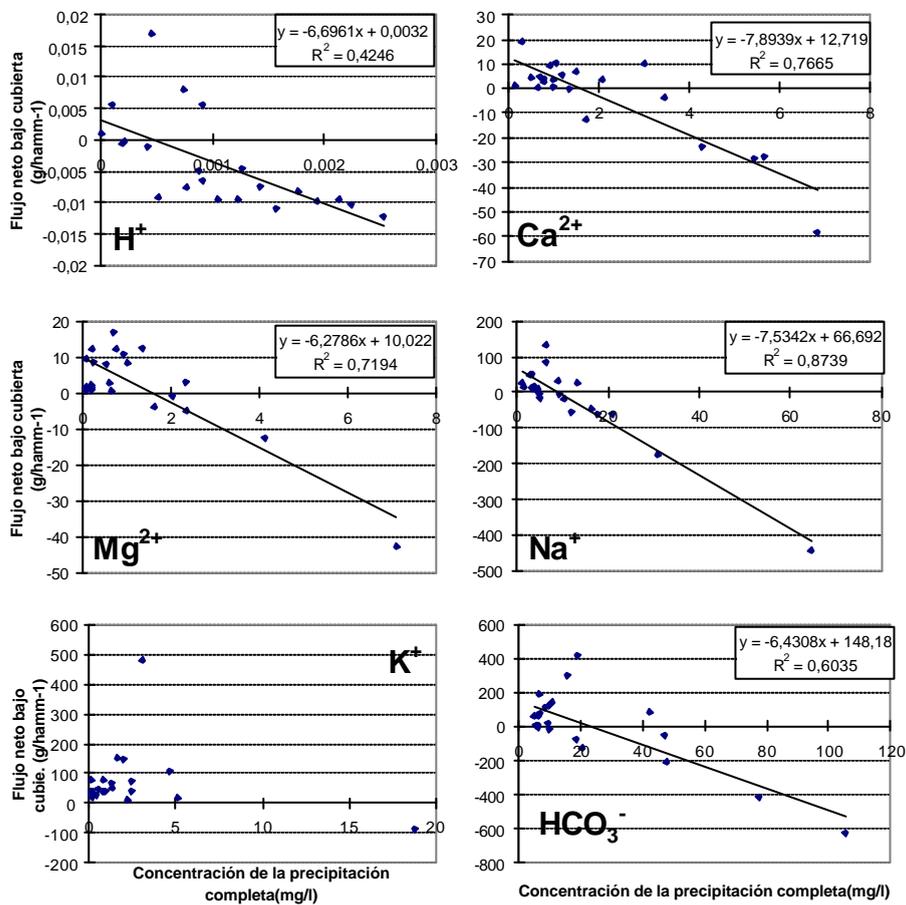


Fig. 9-4 Regresiones calculadas para los flujos netos bajo cubierta de los elementos ( $\text{g/ha mm}^{-1}$ ) y la concentración de la precipitación completa ( $\text{mg/l}$ ) Cantidad de precipitación ( $P$ ) (mm), Coeficientes de la regresión y coeficiente de correlación.

En los balances expuestos anteriormente el flujo neto más negativo fue para el  $\text{SO}_4\text{-S}$ , seguido del Cl y del  $\text{NO}_3\text{-N}$ , hemos observado que esto se corresponden con los mayores valores de  $y=0$ , y sugiere que el flujo negativo de los balances netos bajo cubierta sea debido a la gran cantidad de agua necesaria para lavar de la cubierta estos elementos.

Experimentos de recogida de precipitación penetrante secuencial realizados por Lovett y Schaefer (1992) mostraron que la cantidad de precipitación es una de las variables de la precipitación que afectaban a los flujos netos de Ca, Mg, y K, porque estos son los constituyentes que están derivados primariamente del lavado de la cubierta, y en nuestro caso encontramos una buena correlación para esos tres elementos, aunque hayamos visto antes que el Ca y el Mg pueden ser retenidos por la cubierta, esperando por un gran evento de lluvia.

Para otros elementos tales como el potasio y el COD, el patrón fue diferente debido a la propiedad de la facilidad de lavado de estos elementos, Tabla. 9-5 y Figuras. 9-3 y 9-4, respectivamente. Estos elementos fueron los nutrientes más fácilmente lavables, y este patrón estuvo en consonancia con lo propuesto con Veneklass (1990) y Ferm y Hultberg (1995) que afirmaron que el potasio, que es el nutriente más fácilmente lavable y cuenta con una gran circulación interna en los bosques, dificultando la realización de conclusiones concernientes a la deposición seca sobre el potasio.

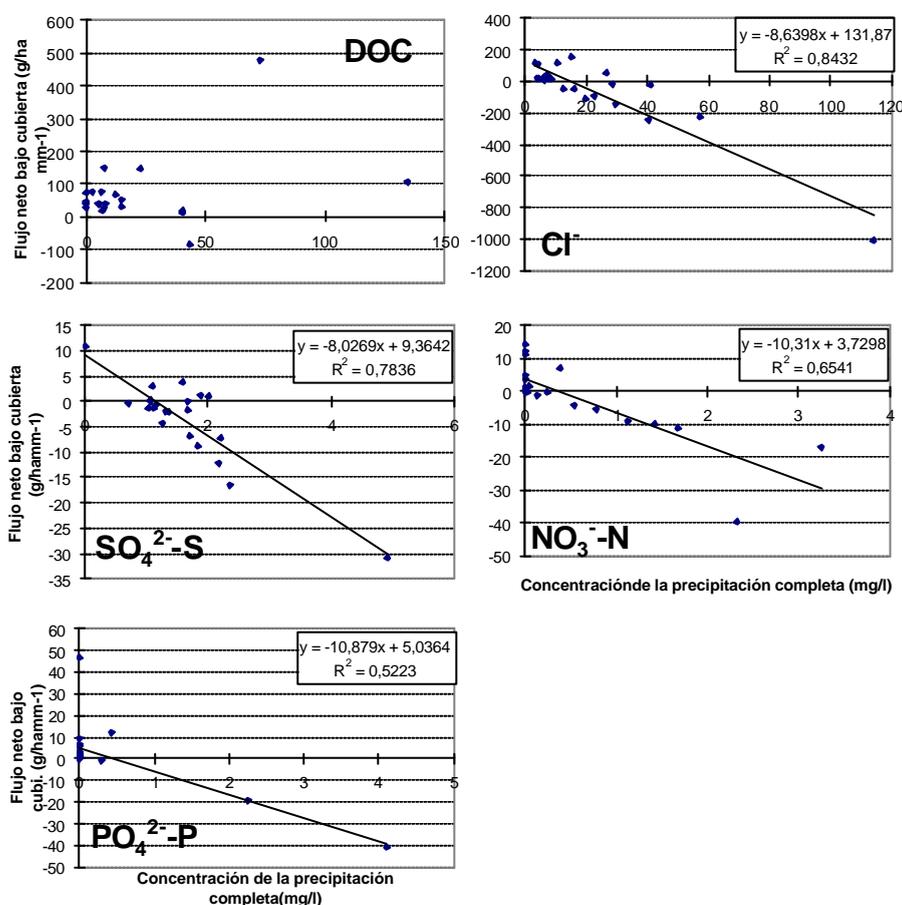


Fig. 9-5 Regresiones calculadas para los flujos netos bajo cubierta de los elementos (g/ha mm<sup>-1</sup>) y la concentración de la precipitación completa (mg/l) Cantidad de precipitación (P) (mm), Coeficientes de la regresión v coeficiente de correlación.

Las correlaciones no fueron significativas para los NO<sub>3</sub>-N y para los PO<sub>4</sub>-P, para estos elementos, los flujos netos bajo cubierta estuvieron correlacionados con las concentraciones de la precipitación completa (Figuras. 9-4 y 9-5), ésta tendencia fue la misma que la registrada para ambos elementos por Veneklass (1990), que afirmó que si los flujos de la precipitación penetrante y de la precipitación completa son de magnitud similar, las pequeñas diferencias entre ambos pueden causar desviaciones relativamente grandes para el flujo neto medio, debido a errores de medida o al funcionamiento de la cubierta. El patrón fue similar al descrito por este autor, cuando las concentraciones de la precipitación completa son bajas, los flujos netos por mm de lluvia son positivos (perdidas netas desde la cubierta), y cuando las

concentraciones de la lluvia son mayores, los flujos netos son negativos (ganancias netas). Para los elementos lavables como el K y el COD los flujos netos de la precipitación bajo cubierta no estaban correlacionados con las concentraciones en la precipitación completa, Figuras. 9-4 y 9-5, como también fue registrado por Veneklass (1990) para el K.

Encontramos de este modo que un modelo simple lineal con la cantidad de precipitación como variable independiente puede sustituir a los modelos de Lovett y Lindberg (1984), algo similar a lo registrado por Capellato y Peters (1995) para estimar las tasas de lavado de la cubierta durante la estación invernal (con bajo LAI) en un bosque de árboles deciduos, pero la diferencia es que el bosque de estudio tiene un alto LAI ( $7,8 \text{ m}^2/\text{m}^2$ ).

#### 9.3.3.1.3. LA INTENSIDAD MEDIA DE LA LLUVIA (*MRI*)

La influencia de la intensidad de la lluvia fue observada por Crockford *et al.* (1996). También Potter *et al.* (1991) cuantificaron estadísticamente el efecto del tipo de evento en la química de la precipitación penetrante en un bosque al sur de los Apalaches y encontraron que de todos los factores la intensidad de la lluvia era el factor más importante.

Experimentos de recogida secuencial de la precipitación penetrante realizados por Lovett y Schaefer (1992) mostraron que la intensidad del evento era una de las variables de la precipitación que afectaban a los flujos netos bajo cubierta para el calcio, el magnesio y el potasio. En nuestro caso se obtuvo una pobre correlación para estos tres elementos y para el sodio, cloruro y el COD. Los valores de los coeficientes de correlación fueron siempre menores que los obtenidos para la cantidad de precipitación.

#### 9.3.3.1.4. DURACIÓN DEL EVENTO (*ED*)

Ya que el lavado ocurre primariamente por el intercambio y la difusión de los constituyentes de la hoja a la lluvia que se acumula sobre su superficie (Lovett y Lindberg, 1984), como se menciona anteriormente, se asume que la duración del evento está directamente relacionada con el lavado de iones desde la cubierta (Capellato y Peters 1995). Sin embargo, en la laurisilva del monte de Agua García encontramos sorprendentes resultados basados en este principio, todos los elementos que tuvieron correlaciones entre la cantidad de precipitación y los *NBCF*, debido al lavado, no tuvieron correlación entre la duración del evento y los *NBCF*, excepto para el potasio, y dos especies como los fosfatos y los protones que no tuvieron correlación entre los flujos netos bajo cubierta y otras de las variables probadas si la tuvieron con la duración del evento. Suponiendo que la duración del evento está relacionada con el lavado de nutrientes, estas dos especies tendrían la explicación del comportamiento en la cubierta a través de este hecho.

#### 9.3.3.1.5 LA EVAPORACIÓN POR INTERCEPTACIÓN DE LA CUBIERTA (*I*)

Los resultados de la correlación entre la *I* y los *NBCF*, obtenida para la parcela de estudio, fue muy similar a la obtenida para la correlación entre la cantidad de precipitación y los flujos netos bajo cubierta, la explicación de este hecho se debe a la usual relación entre ambas variables, que fue examinada en el apartado capítulo 6. Sin embargo podríamos haber esperado relaciones no lineales que no se encontraron en nuestro caso.

### 9.3.3.2. MULTIPLE

Los resultados del análisis de regresión utilizando como variable dependiente los flujos netos bajo cubierta ( $\text{kg ha}^{-1}$ ), y dos variables independientes indican que el periodo seco antecedente (*ADP*) y la cantidad de precipitación (*P*) fueron las dos mejores variables

predictoras solamente para el  $\text{SO}_4$ , sólo para esta especie es válido la utilización de la regresión múltiple de Lovett y Lindberg (1984): la ecuación que es del siguiente modo  $NBCF = aP + bADP + c$  siendo  $P$  (mm) durante un periodo (semanas en nuestro caso) y  $ADP$  días en nuestro caso; con los siguientes resultados:  $NBCF(\text{SO}_4) = 2,57 E^{02} P - 3,14 E^{02} ADP - 6.47 E^{01}$ , la significación de los coeficientes de regresión fue la  $a$   $p < 0,01$  y la  $b$   $p < 0,05$ ; el coeficiente de correlación de la regresión fue  $r^2 = 0,48$ .

El coeficiente de regresión  $a$  representa la tasa de lavado de la cubierta (kilogramos por hectárea por milímetro de precipitación) y la  $b$  representa la tasa de deposición seca (kg por hectárea por milímetro). Debido a la complejidad del método (Lovett y Lindberg, 1984) sólo es aplicable para apreciar de forma cualitativa en que elementos tiene importancia en la deposición seca. Otras desventajas del método han sido enunciadas por Neary y Gizyn (1994) como las siguientes:

- a) Se asume que la fracción perteneciente al lavado es proporcional a la cantidad de agua que fluye a través de las superficies de los árboles, así existe una mínima cantidad de agua para mover los aportes de la deposición seca. El lento movimiento de la deposición seca por las superficies de la cubierta y una tasa de lavado interno no lineal pueden enturbiar la separación de las fuentes de iones (Neary & Gizyn, 1994). Estas respuestas no lineales en la tasa de lavado fueron registradas por Lovett *et al.* (1989), para el potasio bajo condiciones de lluvia artificial.
- b) La posibilidad de correlaciones espúreas a causa de que la regresión múltiple se realiza entre la  $P$  y los  $NBCF$ , este último calculado con base en la misma cantidad de precipitación.
- c) El flujo neto de iones depende de la cantidad que queda sobre la cubierta desde un evento previo con relación a la cantidad que permanece sobre la cubierta tras un evento.

#### **9.4. CONCLUSIONES.**

- Durante el año de estudio hidrológico, el COD representó el 67,8% de los flujos netos totales de nutrientes, seguido del potasio (19,6%) y del bicarbonato (13,1%) y de otros nutrientes menos extendidos como y calcio, magnesio, sodio y fosfatos (sobre el 1%).
- El  $NBCF$  de protones fue negativo para el año de estudio, debido posiblemente a la capacidad de la cubierta del bosque a neutralizar los aportes ácidos sobre estas superficies, por el intercambio en esas superficies de protones con cationes presentes en las mismas. No obstante ocurre liberación de protones cuando el pH de la lluvia es alto, con un rango entre 6,04-7,98.
- Nosotros también encontramos un  $NBCF$  negativo de nitratos, sulfatos y de cloruros, flujos netos de estos elementos existen en la bibliografía, especialmente para los nitratos. El resto de los elementos tiene un flujo positivo, como es usual en la mayoría de los otros bosques del mundo (Parker 1983). Como resumen la cubierta es una fuente de sodio, potasio, calcio, magnesio, bicarbonato, fosfato y COD pero un sumidero de cloruros, nitratos, sulfatos y protones, y aunque los flujos negativos de estos elementos han sido descritos para diferentes cubiertas, este gran número de iones con flujos negativos no ha sido descrito previamente.
- Los datos registrados en el Monte de Agua García están dentro de los rangos de datos de los bosques de lugares tropicales y templados. Para el potasio el patrón es más parecido al de los

bosques tropicales y para la mayoría de los elementos a los bosques templados. Existiendo una fuerte afinidad para los flujos netos bajo cubierta a un bosque de frondosas en Japón (posiblemente afín a la laurisilva por su composición específica).

- No existieron grandes diferencias entre los tres balances realizados indicando la posibilidad de que los aportes suplementarios de deposición seca recogida por la cubierta sean de baja cuantía.
- A la hora de realizar las regresiones simples, sólo los nitratos y los sulfatos tuvieron correlación con el periodo seco antecedente, mostrando deposición seca de estos dos elementos en los flujos netos, aumentando la deposición seca por el efecto diferencial de captura de la cubierta respecto de un pluviómetro normal. Los datos se refrendan perfectamente con la bibliografía.
- Respecto a las regresiones con la cantidad de lluvia todos los elementos excepto los protones, nitratos y fosfatos las tuvieron significativas, evidenciando la importancia del lavado de la cubierta en este ecosistema. Los protones y nitratos suelen aportarse mediante la deposición seca por lo que los resultados concuerdan con los esperados. No obstante una diferencia de este bosque con los encontrados en la bibliografía, son los grandes volúmenes de agua necesarios para que se produzca el lavado de los nutrientes y la obtención de los flujos positivos, sugiriendo que el flujo negativo de los balances netos bajo cubierta de los elementos que lo poseen sea debido a la gran cantidad de agua necesaria para lavar de la cubierta estos elementos. Las correlaciones no fueron significativas para los  $\text{NO}_3\text{-N}$  y para los  $\text{PO}_4\text{-P}$ , para estos elementos, los flujos netos bajo cubierta estuvieron correlacionados con las concentraciones de la precipitación completa ya que si los flujos de la precipitación penetrante y de la precipitación completa son de magnitud similar, las pequeñas diferencias entre ambos pueden causar desviaciones relativamente grandes para el flujo neto medio, debido a errores de medida o al funcionamiento de la cubierta.
- La intensidad de la lluvia y la evaporación por interceptación no aportaron gran cantidad de información; no así la duración que mostró correlaciones positivas para los fosfatos y los protones, evidenciando que estos elementos si son susceptibles al lavado de la cubierta.
- De este modo sólo fue posible efectuar la regresión múltiple (Lovett y Lindberg, 1984) para los sulfatos, el único elemento en que participan al unísono de forma significativa los procesos de lavado y de deposición seca sobre la cubierta.
- De este modo los resultados que obtuvimos en el intento de separar las fuentes externas e internas fueron los óptimos ya que uno de los dos coeficientes fue no significativo y no se incluyen las dos variables en el modelo de regresión, excepto para los sulfatos. Este resultado confirma que las pequeñas diferencias encontradas entre los balances anteriores son debidas a la pequeña tasa de deposición seca para el bosque de estudio.

## 9.5. BIBLIOGRAFÍA

- American Public Health Association, 1992. Standard Methods for the examination of water and waste water. 18th edition. APHA - AWWA - WPCF. Washington.
- Art, H.W. Bormann, F.H. Voigt, G.K. & Woodwell, G.M. 1974. Barrier island forest ecosystems: role of meteorological nutrient input. *Science*, 184: 40-60.
- Atteia, O. & Dambrine, É. 1993. Dynamique d'éléments traces dans les précipitations sous le couvert de 2 pessières peu polluées de Suisse romande. *Ann. Sci. For.*, 50:445-459.
- Bache, D.H. 1977. Sulphur dioxide uptake and leaching of sulphates from a pine forest. *J.Appl. Ecol.*, 14:881-895.
- Birk, E.M. and Vitousek, P.M. 1986. Nitrogen availability and nitrogen use efficiency in lobolly pine stands. *Ecology*,67:69-79.
- Blakemore, L.C. Searle, P.L. & Daly, B.K. 1981. Methods for Chemical Analysis of soils. N.Z. Soils Bureau Scientific Report. IDA.
- Butler, T.J. & Likens, G.E. 1994. A direct comparison of throughfall plus stemflow to estimates of dry and total deposition for sulfur and nitrogen. *Atmos. Environ.* 29:1253-1265.
- Cadle, S.H. Marshall, J.D. & Mulawa, P.A. 1991. A laboratory investigation of the routes of HNO<sub>3</sub> dry deposition to coniferous seedlings. *Environ. Pollut.* 72:287-305
- Cape, J.N. 1993. Direct damage to vegetation caused by acid rain and polluted cloud: definition of critical levels for forest trees. *Environ. Pollut.* 82:167-180.
- Capellato, R. & Peters, N.E. 1995 Dry deposition and canopy leaching rates in deciduous and coniferous forest of the Georgia Piedmont: an assessment regression model. *J. Hydrol.* 169:131:150.
- Clements, R.G. and Colon, J.A. 1975 The rainfall interception process and mineral cycling in montane rainforest in Puerto Rico. In H.G. Howell, J.B. Gentry & M.H. Smith, eds., *Mineral Cycling in Southeastern ecosystems*. Oak Ridge, TN: United States Energy Research and Development Administration, 813-823.
- Crockford, R.H. Richardson, D.P. & Sageman R. 1996. Chemistry of Rainfall, throughfall and stemflow in a eucalypt forest and a pine plantation in southeastern Australia: 3. Stemflow and total inputs. *Hydrol. Process.* 10: 25-42.
- Crowter, J. 1987. Ecological observations in tropical karst terrain, West Malasya. II. Rainfall interception, litterfall and nutrient cycling. *J. Biogeogr.* 14:145-155.
- Davidson, C.I. & Wu Y. 1990. Dry deposition particles and vapors. In: S.E. Lindberg, A.L. Page & S.A. Norton (eds.), *Advance in Environmental Science*, Vol. 3, *Acidic Precipitation: Sources, Deposition, Canopy Interactions*. Springer, New York, pp. 209-216.
- Domingo, F. Puigdefabregas, J. Moro, M.J. & Bellot, J. 1994. Role of the vegetation in biogeochemical balances of a small afforested catchment in southern Spain. *J. Hydrol.* 159:275-289.
- Durand, P. Lelong, F. & Neal, C. 1992. Comparison and significance of annual hydrochemical budgets in three small granitic catchments with contrasting vegetation (Mont-Lozère, France). *Environ. Pollut.* 75: 223-228.
- Eaton, J.S. Likens, G.E. & Bormann, F.H. 1973. Troughfall and stemflow chemistry in a northern hardwood forest. *J. Ecol.* 61 (2): 495-508.
- Eaton, J.S., Likens, G.E. and Borman F.H. 1978. The input of gaseous and particulate sulfur to a forest ecosystem. *Tellus* 30:239-251.
- Edwards, P.J. 1982. Studies of mineral cycling in a montane rainforest in New guinea V. Rates of cycling in throughfall and litterfall *J. Ecol.* 70:807-827.
- Fenn, M.E., Poth M.A. Bytnerowicz, A. & Riechers G.H. 1995. Troughfall chemistry of ponderosa pine exposed to wet and dry acidic deposition, drought, ozone and nitric acid. *Can. J. For. Res.*, 25:88-100.

- Ferger, K.H. Brahmmer, G. & Zottl, H.W. 1990. Element budgets of two contrasting watersheds in the Black Forest J. Hydrol. 116: 85-99.
- Ferm, M. & Hultberg, H. 1995a. Method to estimate atmospheric deposition of base cations in coniferous throughfall. Water Air Soil Poll. 85: 2229-2234.
- Ferm, M. & Hultberg, H. 1995b. Method to estimate atmospheric deposition and internal circulation of base cations to a forested catchment area. Water Air Soil Poll. 85: 2235-2240.
- Foster, N.W. & Nicholson J.A. 1988. Acid deposition and nutrient leaching from deciduous vegetation and potzolic soils at the Turkey Lakes Watershed. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 45: 96:100.
- Fowler, D. 1980. Removal of sulphur and nitrogen compounds from the atmosphere in rain and by dry deposition. In D. Drabløs and A.Tollan (sde.), Ecological impact of acid precipitation. SNSF project. Oslo, Norway, 22-32.
- Franken, W & Leopoldo, P.R. 1984. Hydrology of catchment areas of central-Amazonian forest stream. In: Sioli, H. (ed.) 1984. The Amazon: Limnology and landscape ecology of a mighty tropical river and its basin. Dordrecht: Junk. pp. 167-199.
- Friendland, A.J. Miller, E.K. Battles, J.J. & Thorne, J.F. 1991. Nitrogen deposition, distribution and cycling in subalpine spruce-fir forest in the Adirondacks, New York, USA. Biogeochemistry, 14: 31-55.
- Gerloff, G.L. 1976 Plant efficiencies in the use of nitrogen, phosphorous and potassium. In M.J. Wright, ed., Plant adaptation to mineral stress in problem soil. Ithaca, NY: Cornell University Agricultural Experimental Station, 161-169.
- Graustein, W.C. & Armstrong, R.L. 1983. The use of strontium-87/strontium-86 ratios to measure atmospheric transport of forested watersheds. Science (Washington, D.C.), 219:289-292.
- Grubb, P.J. 1977. control of forest growth and distribution on wet tropical mountains: with special reference to mineral nutrition. Ann. Rev. Ecol. Syst. 8: 83-107.
- Hanson, P.J. & Garten, C.T., Jr. 1992. Deposition of H15NO3 vapour to white oak, red maple and lobolly pine foliage: experimental observations and a generalized model. New Phytol. 122:329-337.
- Herwitz, S.R. 1986. Episodic stemflow inputs magnesium and potassium to a tropical rainforest floor during extreme rainfall events. Oecologia, 70:423-425.
- Herwitz, S.R. 1987. Calcium, magnesium and potassium use efficiency of tropical rain forest. Phys. Geography, 8(4):324-332.
- Hicks, B.B. 1986. Measuring dry deposition: a reassessment of the state of the art. Water Air Soil Poll. 30:75-90.
- Ignatova, N. 1995. Changes in crown leaching composition induced by a sudden increase in atmospheric deposition. A case study in South-western Bulgaria. Plant Soil 168-169:373-382.
- Johnson, D.W. & Lindberg, S.E. 1989. Acidic deposition on Walker Branch Watershed. In acidic precipitation. Vol.1 Case studies. Edited by D.C. Adriano and M. Havas. Springer-Verlag, New York. pp. 1-38.
- Jordan;C.F. Kline, J.R. & Sasser, D.S: 1972. Temporal variability in atmospheric nutrient influx to a tropical ecosystem Biotropica 14:1-9.
- Katz, C., Oren, R. Schulze, E. D. & Milburn, J.A. 1989 Uptake of water and solutes through twigs of Picea abies (L.) Karst. Trees, 3:33-37.
- Kazda, M. & Glatzel, G. 1986. Dry deposition, retention and wash-off processes of heavy metals in beech crowns: Analysis of sequentially sampled stemflow. In: H. Georgii (Editor), Atmospheric Pollutants in Forested Areas. Reidel, Dordrecht, pp. 215-222.
- Keeney, D.R. & Nelson, D.W. 1982. Nitrogen-Inorganic forms. In: Methods of Soil Analysis, Part 2. Chemical and Microbiological Properties. Agronomy Monograph nº 9 (2nd Edition).
- Kozłowski, T.T. & Pallardy, S.G. 1997. Physiology of woody plants. 2º Ed. Academic Press. San Diego.

- Lakhani, K.H. & Miller, H.G. 1980. Assessing the contribution of crown leaching to the element content of rainwater beneath trees. In: T.C. Hutchinson and M. Havas (eds.), *Effect of acid Precipitation on Terrestrial Ecosystems*. Plenum, New York, pp. 161-172.
- Lindberg, S.E. & Garten C.T. Jr. 1988. Short-term canopy interactions of beech trees: mineral ion leaching and absorption during rainfall. *Tree Physiol.* 3: 137-145.
- Lindberg, S.E. & Lovett G.M. 1992. Deposition and forest canopy interactions of airborne sulfur: results from the integrated forest study. *Atmos. Environ.* 26<sup>a</sup>:1477-1492.
- Lindberg, S.E. Lovett, G.M. Richter, D.D. & Johnson D.W. 1986. Atmospheric deposition and canopy interactions of major ions in a forest. *Science (Washington D.C.)* 231:141-145.
- Likens, G.E. 1992 Some applications of the ecosystem approach to environmental problems and resource management. In: A. Teller, P. Mathi and J.N.R. Jessers (Editors), *Responses of Forest Ecosystems to Environmental Changes*. Commission of European Communities, Elsevier Applied Science, London, pp. 16-30.
- Likens, G.E. Bormann, F.H. Pierce, R.S. Eaton, J.S. & Johnson, N.M. 1977. *Biogeochemistry of a Forested Ecosystem*. Springer, New York.
- Lledó, M.J. 1990. Comparimentos y flujos biogeoquímicos en una cuenca de encinar del Monte Plobet. Doctoral Dissertation, Universidad de Alicante.
- Lovett, G.M. 1987. Atmospheric deposition: process and measurement methods. In: S.H. Bicknell (Editor), *Proc. California Forest Response Program Planning Conf*, Pacific Grove, CA., 22-24 February, 1987, pp. 117-121.
- Lovett, G.M. 1992. Atmospheric deposition and canopy interactions of nitrogen. In *atmospheric deposition and forest nutrient cycling*. Edited by D.W. Johnson and S.E. Lindberg. *Ecol. Stud.* 91:152-166.
- Lovett, G.M. 1994. Atmospheric deposition of nutrients and pollutants in North America: An ecological perspective. *Ecol. Appl.* 4(4):629-650.
- Lovett, G.M. & Lindberg, S.E., 1984. Dry deposition and canopy exchange in a mixed forest as determined by analysis of throughfall. *J. Appl. Ecol.* 21: 1013-1027.
- Lovett, G.M. & Lindberg, S.E., 1986. Dry deposition of nitrate to a deciduous forest. *Biogeochemistry*, 2: 137-148.
- Lovett, G.M. Reiners, W.A. & Olson R.K. 1989. Factors controlling throughfall chemistry in a balsam fir canopy: a modelling approach. *Biogeochemistry*, 8: 239-264.
- Lovett, G.M. & Schaefer, D.A. 1992. Canopy interactions of Ca, Mg and K. In: D.W. Johnson and S.E. Lindberg (eds.), *Ecological Studies*, Vol. 91, *Atmospheric Deposition and Forest Nutrient Cycling*. Springer, New York, pp.253-275.
- MacDonald, N.W. Witter, J.A. Burton, A.J. Pregitzer, K.S. & Richter, D.D. 1993. Relationship among atmospheric deposition, throughfall, and soil properties in oak forest ecosystems. *Can J. For. Res.* 23:2348-2357.
- Marshall, J.D. & Cadle, S.H. 1989. Evidence for trans-cuticular uptake of HNO<sub>3</sub> vapor by foliage of eastern white pine (*Pinus strobus* L.). *Environ. Stud.* 97: 461-497.
- Matzner, E. & Meiwes, K.J. 1994. Long-Term development of element fluxes with bulk precipitation and throughfall in German Forests. *Journal of Environmental Quality*, 23:162-166. KNMI/RIV, 1985. Chemical composition of precipitation over the Netherlands. Ann. Rep. 1983. Royal Met. Inst. De Bilt, the Netherlands.
- Mesanza, J.M. & Casado H. 1994. Atmospheric deposition at *Pinus radiata* sites in the Spanish Basque country. *J. Environ. Sci. Health A29(4)*:729-744.
- Miller, H.G. 1984. Deposition-plant-soil interactions. *Philosophical Transactions of the Royal Society London Ser. B Biol. Sci.* 305: 339-352.
- Mitterhuber, E. Pfanz, H. & Kaiser, W.M. 1989. Leaching of solutes by the action of acidic rain: a comparison of efflux from twigs and single needles of *Picea abies* (L. Karst). *Plant Cell Environ.*, 12:93-100.

- Neary, A.J. & Gizyn, W.I. 1994. Throughfall and stemflow chemistry under deciduous and coniferous forest canopies in south-central Ontario. *Can. J. For. Res.* 24: 1089-1100.
- Odum, H.T. Moore, A.M. & Burns, L.A. 1970. Hydrogen budget and compartments in the rain forest. In: H.T. Odum & R.F. Pigeon. (Eds.). *A Tropical rainforest*. Division of technical information, US Atomic Energy commission, Washington, D.C. pp105-122
- Olsen, S.R.; Cole, C.V.; Watanabe, F.S. and Dear, L. 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. USDA Circular N° 939. U.S. Gov. Print. Office, Washington, DC.
- Parker, G.G. 1983. Throughfall and stemflow in the forest nutrient cycle. *Adv. Ecol. Res.*, 13: 57-133.
- Potter, C.S. Harvey, L. Ragsdale, H.L. & Swank W.T. 1991. Atmospheric deposition and foliar leaching from three deciduous forest canopies. *Can. J. For. Res.* 15: 1055-1060.
- Puckett, L.J. 1990. Estimates of ion sources in deciduous and coniferous throughfall. *Atmos. Environ.* 24: 545-555.
- Ranger, J. Colin-Belgrand, M. & Nys, C. 1995. Le cycle biogéochimique des éléments majeurs dans le écosystèmes forestiers. *Étufr et Gestion des Sols*, 2,2:119-134.
- Reiners, A.R. & Olson, R.K. 1984. Effect of canopy components on throughfall chemistry; an experimental analysis. *Oecologia* 63: 320-330.
- Schaeffler, M. Jacobson, G.L.Jr. Pugh Iv A.L. & Norton, S.A. 1996. Influence of vegetational structure on capture of salt and nutrient aerosols in a marine peatland. *Ecol. Appl.* 6(1):263-268.
- Schefer, D.A. & Reiners, W.A.1990. Throughfall chemistry and canopy processing mechanisms. . In: S.E. Lindberg, A.L. Page & S.A. Norton (eds.), *Advance in Environmental Science*, Vol. 3, *Acidic Precipitation: Sources, Deposition, Canopy Interactions*. Springer, New York.
- Schönherr, J. & Bukovac, M.J. 1972. Penetration of stomata by liquids. *Plant Physiol.*, 49:813-819.
- Sefrad, J.P. Mitchell M.J. Scott T.J. Zhang, Y.M. & Raynal, D.J. 1989. Measurements of wet and dry deposition in a northern hardwood forest. *Water Air Soil Poll.* 48:225-238.
- Shibata, H. Satoh, F Tanaka, Y & Sakuma T. 1995. The role of organic horizons and canopy to modify the chemistry of acidic deposition in some forest ecosystems. *Water Air Soil Poll.* 85: 1119-1124.
- Shibata, H. & Sakuma, T. 1996. Canopy Modification of precipitation Chemistry in deciduous and coniferous forest Affected by Acidic deposition. *Soil Sci. Plant Nutr.* 42(1):1-10.
- Sinun, W. Meng, W. Douglas, I. & Spencer, T. 1992. Throughfall, stemflow, overland flow and throughflow in the Ulu Segama rain forest, Sabah, Malasya. *Philos. T. Roy. Soc. L. B.* 325: 389-395.
- Sollins, P. & Mccorison F.M. 1981. Nitrogen and carbon solution chemistry of an old growth coniferous forest watershed before and after cutting. *17 (5):1409-1418.*
- Steinhardt, U. 1979. Untersuchugen über den Wasser- und Nährstoffhaushalt eines andinen Wolkenwaldes in Venezuela. *Göttinger Bodenkundliche Berichte* 56: 1-185.
- Striegel, G. Ruhiyat, D. Prayitno, D. & Sarmina, S. 1994. Nutrient input by rainfall into secondary forests in East Kalimantan, Indonesia. *J. Trop. Ecol.* 10: 285-288.
- Tanner, E.V.J. 1977. Mineral cycling in montane rainforest in jamaica. PhD dissertation, university of cambridge, U.K.
- Tukey,H.B. 1970. The leching of substances from plants. *Annu. Rev. Plant Phys.* 21:305-329
- Tsutsumi , T.& Nishitani, Y. 1984. On the efect of soil fertility on the throughfall chemicals in a forest. *Japan. J. Ecol.* 34:321-330.
- Ulrich, B. 1983. Interaction of forest canopies with atmospheric constituents: SO<sub>2</sub>, alkali and earth alkali cations and chloride. In *Effects of accumulation of air pollutants in forest ecosystems* Ulrich, B. Pankrath & J. Reidel, D. (Edits.), Dordrecht, The Netherlands. pp. 33-45.
- U.S. Salinity Laboratory Staff 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. U.S. Dep. of Agriculture Handbook, N° 60.

- Van Ek R. & Draaijers G.P.J. 1994. Estimates of atmospheric deposition and canopy exchange for three common tree species in the Netherlands. *Water Air Soil Poll.* 73:61-82.
- Veneklass, E.J. 1990. Nutrient fluxes in bulk precipitation and throughfall in two Montane Tropical rain forest. Colombia. *J. Ecol.* 78: 974-992.
- Vitousek, P.M. 1984. Litterfall, nutrient cycling, and nutrient limitation in tropical forest. *Ecology* 65:285-298.
- Vitousek P.M. & Sandford, R.L. Jr. 1986. Nutrient cycling in moist tropical forest. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 17:137-167.
- Walkley, A. and Black, I.A. 1934. An examination of the Degthareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37:29-38.
- Westling, O. Hultberg, H. & Malm, G. 1995. In: L.O. Nilsson, R.S. Hülthl & U.T. Johansson (eds.). *Nutrient uptake and cycling in forest ecosystems.* Pp639-647. Kluwer Academic Publishers, the Netherlands.
- White, E.J. & Turner, F. 1970. A method of estimating income of nutrients in a catch of airborne particles by a woodland canopy. *J. Appl. Ecol.* 7: 441-461.



## CONCLUSIONES GENERALES

1. Se ha realizado por primera vez un estudio integrado de los flujos hidrológicos e hidroquímicos para un bosque de laurisilva canaria.
2. En él se han evaluado los distintos métodos de medida de los componentes del flujo hidrológico, llegando a la conclusión, de que para la precipitación penetrante el mejor método es el empleo de pluviómetros de 170 mm de diámetro y para la estimación del coeficiente de precipitación directa la utilización de métodos fotográficos.
3. Al extrapolar los valores desde el nivel de árbol a nivel de bosque para el escurrido cortical, el mejor método resultó ser el de las regresiones anuales entre la sección normal y los volúmenes de escurrido cortical; y para el cálculo de la evaporación por interceptación, el empleo del modelo de Gash utilizando para su cálculo la resistencia aerodinámica calculada por el método del calor.
4. De la precipitación que incidió sobre el bosque durante el periodo de estudio un 6% llegó al suelo como escurrido cortical y un 52% como precipitación penetrante, de la que un 7% fue precipitación directa. El 42% restante se perdió por interceptación, no detectándose aportes procedentes de la precipitación horizontal. Todos los valores estuvieron dentro del rango encontrado en la bibliografía.
5. El escurrido cortical resultó ser un factor fundamental en la redistribución del agua aumentando la magnitud de la precipitación hasta trece veces en la zona de infiltración del mismo, mostrando diferencias entre especies debido a su diferente morfología y llegando a convertirse en un factor importante de competencia entre los árboles.
6. La precipitación penetrante mostró una variabilidad espacial explicada principalmente por la distribución de las secciones normales de los árboles, constituyéndose también en un factor de redistribución del agua en el seno del bosque.
7. La capacidad de saturación de la cubierta fue de 2,45 mm, sólo comparable a bosques tropicales y la tasa de evaporación durante la precipitación fue notablemente baja debido a la alta humedad. Mediante la aplicación del modelo Gash a los datos obtenidos durante el periodo de estudio la evaporación por interceptación fue del 44%; dada la bondad de ajuste del modelo es posible aplicarlo a otros periodos de medición como el periodo de 22 años de datos de la estación meteorológica del I.N.M., obteniendo un valor corregido del 30%.

8. La composición química de la precipitación completa se corresponde a la de una situación oceánica aunque con aportes relativamente elevados, probablemente asociados al régimen pluviométrico. Se ha detectado una influencia de aportes terrestres, principalmente en lo que respecta al calcio, potasio, sulfato, nitrato y fosfato, destacando los grandes aportes producidos por las invasiones de aire sahariano y de un incendio en las proximidades del área de estudio durante el año de mediciones.
9. El escurrido cortical es un importante vector en la redistribución de los flujos hidroquímicos relacionándose con los contenidos foliares y presentando diferencias interespecíficas en su composición, siendo estas diferencias más notables en las especies consideradas pioneras (*M.faya* y *E.arborea*) en relación con el resto.
10. Los flujos hidroquímicos netos bajo cubierta han presentado valores negativos en un gran número de componentes químicos (protones, nitratos, sulfatos y cloruros) el mayor de la bibliografía consultada. Han destacado los grandes volúmenes de agua necesarios para que se produzcan flujos netos positivos.
11. Los flujos hidroquímicos netos de todas las especies químicas proceden de la lixiviación de la cubierta, excepto los nitratos y parte de los sulfatos que proceden de la deposición seca.
12. Dada las diferencias climáticas, topográficas, estructurales y de composición florística, los resultados de este estudio no son extrapolables a otros bosques de laurisilva de manera directa aunque constituyen un punto de referencia importante para posteriores estudios. No obstante el modelo de estudio y la metodología empleada sí lo son, por lo que su aplicación en otros bosques de laurisilva y otros ecosistemas sería recomendable.