

Composición química de cenizas de especies vegetales de Tenerife

Chemical composition of ashes of plant species from Tenerife



Trabajo de Fin de Grado

ALEJANDRO AGUIAR MARTÍN

Tutorizado por Jesús S. Notario del Pino y Jonay Neris Tomé

Grado en Biología. Mayo 2023

ÍNDICE

Resumen	1
Abstract.....	1
Introducción.....	5
Objetivos.....	13
Material y métodos	17
Selección de las zonas de estudio	17
Muestreo	18
Preparación de las muestras	19
Selección de temperaturas y tiempos de quemado	19
Proceso de quemado	20
Análisis químicos.....	21
Análisis estadístico	22
Resultados.....	25
Discusión	33
Conclusiones.....	39
Conclusions	39
Bibliografía.....	43

Resumen

Aunque el fuego es un agente natural, los incendios forestales son una amenaza cada vez mayor a nivel mundial. El efecto del fuego no se limita al impacto que ocasionan las llamas, sino que incluye también el riesgo del transporte de posibles contaminantes que están presentes en las cenizas generadas durante un incendio y que son fácilmente movilizables hasta cursos de agua. Las Islas Canarias no están exentas de este riesgo, ya que durante la última década el número de incendios producidos en el archipiélago se ha llegado a duplicar. Este estudio presenta por primera vez información sobre la composición química de cenizas generadas a partir de especies autóctonas de las islas en fuegos simulados utilizando un nuevo enfoque que pretende la simulación de los dos tipos de incendio más frecuentes a nivel mundial y en las islas canarias (superficie y copa) y su comparación con la composición química de una especie de distribución global como es el eucalipto. Los resultados obtenidos permitirán tener una mejor visión del riesgo de contaminación de las cenizas de las especies seleccionadas, mientras que la novedosa metodología desarrollada para generar cenizas en incendios simulados permitirá generar rápida y fácilmente esta información para otras especies forestales frecuentemente afectadas por incendios en las Islas Canarias y otras partes del mundo pero de las que se desconoce su composición.

Abstract

Although fire can be considered a natural agent, wildfires are an increasingly serious threat worldwide, not only because of the direct impact of the flames but also due to the risk of the transport of contaminants incorporated into the ash produced from the hillslopes to water bodies. The Canary Islands are not exempt from this risk, as the number of fires in the archipelago has doubled over the last decade. Here, we present for the first time information on the chemical composition of ash from autochthonous species produced using a new approach that simulates the two main types of fire that occur worldwide and in the Canary Islands (surface and crown fires) and its comparison to the chemical composition of the eucalyptus, a species of distributed worldwide. The results obtained provide for the first time critical information to evaluate contamination risks related to ash from local species whereas the new methodology developed to produce ash in simulated fires can be used to rapidly and easily obtain similar information for ash produced from other species.

Introducción

Introducción

Los incendios forestales son una problemática a nivel mundial. Se trata de un fenómeno natural o antropogénico cuya incidencia está aumentando a un ritmo alto a nivel global (Kennedy et al., 2021). La superficie media anual quemada en Europa antes de 2017 era de aproximadamente 200.000 ha, pero esta cifra se ha triplicado durante los últimos años (Martínez et al., 2022). Dentro de las posibles causas encontramos: alteraciones en el uso de la tierra, sequías, cambio climático, especies invasoras y el efecto directo del ser humano (Rozas et al., 2011). Los incendios forestales pueden llegar a ser esenciales para la estructuración de algunos biomas, sin embargo, pueden representar graves amenazas para la biodiversidad y calidad del hábitat (Netshituni et al., 2022).

El efecto que tienen los incendios forestales en los ecosistemas, es decir, la severidad del incendio Keeley (2009), depende del comportamiento del fuego, su intensidad y la resiliencia del ecosistema. Los incendios pueden propagarse por distintas vías:

- Los incendios de superficie, que se dan en las capas superficiales del suelo, queman la capa de hojarasca, restos leñosos ligeros y los horizontes orgánicos del suelo, y las llamas generadas no alcanzan gran altura. Hay ocasiones donde las condiciones climáticas junto con las condiciones del medio van a favorecer que estos incendios de superficie vayan aumentando de intensidad pudiendo transformarse en incendios de mayor virulencia (Ryan 2002).
- Los incendios de copas ocurren cuando los combustibles del dosel arbóreo son abundantes y suficientemente secos y en unas condiciones de temperatura y viento adecuadas para que las llamas pasen de la superficie del suelo a quemar la copa de los árboles. En general, los incendios de copa liberan grandes cantidades de energía, si bien durante cortos periodos de tiempo (Mitsopoulos et al., 2007). A diferencia de los incendios de superficie, en este caso pueden llegar a calcinar toda la superficie arbórea que se vaya encontrando en su camino (Pérez et al., 2021). En estos incendios, las altas temperaturas alcanzadas pueden modificar las condiciones climáticas locales en la zona afectada por el fuego haciendo que el incendio sea aún más virulento y su fuerza de propagación mayor (Ryan 2002).

Estos dos tipos de incendios suelen presentar un impacto diferente en el medio. En general los incendios de copa se consideran como de alta severidad y mayor intensidad en

INTRODUCCIÓN

comparación con los de superficie, cuya severidad e intensidad suelen ser menores. En ocasiones estos términos son malinterpretadas y erróneamente confundidos, es por ello por lo que se han establecido unos parámetros para poder diferenciar cada uno de ellos, no obstante ambos pueden estar relacionados en determinadas casos (Mataix-Solera et al., 2011; Keeley 2009). Así pues, el uso apropiado del término severidad del fuego se referirá al consumo de materia orgánica aérea y subterránea por parte del fuego. En este caso, la materia orgánica sobre el suelo incluye, la quema del dosel de los árboles, muerte del volumen de corona, la quema de los troncos. La materia orgánica bajo el suelo incluye la deposición de cenizas, materia orgánica superficial, la materia orgánica subterránea que contribuye a la estructura del suelo, grado de hidrofobicidad y la oxidación de minerales inducida por calor. En cambio, la intensidad del fuego se describe como el proceso de liberación de energía de la materia orgánica por combustión física, siendo una medida del flujo de energía promedio en el tiempo (Santín et al., 2015; Keeley 2009).

Los incendios forestales generan cenizas como resultado de la ignición y combustión de la masa orgánica. Tal como exponen Bodí et al., (2014), las cenizas se definen como el residuo de partículas remanente, o depositado en el suelo, procedentes de la quema de combustibles silvestres que consiste en una mezcla de materiales minerales y compuestos orgánicos carbonizados. La fracción orgánica de las cenizas deriva de la combustión, generalmente incompleta, de la vegetación aérea y/o la capa superficial rica en materia orgánica del suelo, a menudo denominada necromasa. La fracción inorgánica está constituida por componentes como silicatos, óxidos, fosfatos, carbonatos, sulfatos, etc. que pueden actuar como nutrientes pero también como contaminantes potenciales. Debido a las características que presentan, las cenizas son fácilmente transportables por diferentes agentes meteorológicos, tales como el viento o la escorrentía derivada de las lluvias, los cuales transportan estas pequeñas partículas de bajo peso (Santín et al., 2015). La composición química de las cenizas es por tanto un parámetro crítico para conocer la capacidad de recuperación de un ecosistema tras el fuego, dado que los nutrientes de las cenizas pueden favorecer este proceso (Pereira et al., 2014), pero también el riesgo de contaminación de ecosistemas acuáticos en el caso de transporte de contaminantes.

El estudio de las cenizas aparece como fundamental a corto y medio plazo, en vista del aumento de la frecuencia global de incendios (Netshituni et al., 2022). En los últimos años se ha registrado un auge en el número de investigaciones relativas a las cenizas, centradas en analizar su composición química y ver sus efectos sobre el medio (Mataix-Solera et al., 2011).

INTRODUCCIÓN

Los nutrientes de las cenizas pueden estimular la actividad microbiológica, ayudando en determinadas circunstancias al desarrollo rápido de algunas especies. Por el contrario, las capas de cenizas también pueden inhibir la germinación de semillas debido a los efectos tóxicos de algunos iones y moléculas, el pH alcalino o a ciertas especies orgánicas como hidrocarburos o dioxinas (Pereira et al., 2014). Los cambios inducidos por el fuego en el pH y la conductividad eléctrica (C.E.) del suelo se atribuyen principalmente a la generación de sustancias de reacción básica en disolución acuosa, ya sean iones inorgánicos (cationes), óxidos, hidróxidos y carbonatos en los suelos, así como por la disminución de los ácidos orgánicos producidos durante la oxidación biológica de la materia orgánica. La ceniza mezclada con el suelo no suele modificar la textura del suelo, pero puede oscurecerlo en el periodo inmediatamente posterior al incendio con implicaciones para la temperatura y humedad del suelo, así como la germinación de semillas (Campos et al., 2016; Pereira et al., 2015).

Además, se debe tener en cuenta el riesgo de contaminación que pueden suponer las cenizas o algunos de sus constituyentes sobre el medio acuático (ríos, lagos o embalses) (Silva et al., 2015), ya que durante los incendios se pueden generar o liberar contaminantes que podrían ser posteriormente movilizados por efecto del viento y el agua (Bodí et al., 2014; Smith et al., 2011), y afectar a los ecosistemas acuáticos (Nunes et al., 2018). Los riesgos asociados con los diferentes componentes van desde la modificación de las propiedades organolépticas (sabor o color) hasta toxicidad o carcinogenicidad con exposición prolongada a concentraciones elevadas (Silva et al., 2016; Smith et al., 2011).

Como ya se ha comentado, esta es una de las razones que explican el creciente número de estudios relativos a las cenizas, por la importancia que suponen las fuentes de agua potable, al ser vulnerables frente a la contaminación por las cenizas. Así, el aumento del transporte y la concentración de N y P en diversas formas después de los incendios forestales pueden ser problemáticos. Las concentraciones elevadas de NO_3^- y NO_2^- representan un riesgo potencial para la salud humana principalmente por la generación de nitrosaminas en caso de ingestión, que pueden afectar el transporte de oxígeno en los glóbulos rojos, mientras que las altas concentraciones de $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ puede corroer las tuberías y accesorios de cobre. El N y el P son nutrientes limitantes para el crecimiento de plantas acuáticas, algas y cianobacterias en cuerpos de agua. La eutrofización aumenta el riesgo de floraciones potencialmente tóxicas, con implicaciones para la salud humana, las propiedades organolépticas (sabor, olor y color) y la función del ecosistema acuático (Smith et al., 2011; Drewry et al., 2006). También se ha comprobado que algunos oligoelementos procedentes de las cenizas pueden tener efectos

INTRODUCCIÓN

adversos sobre el medio acuático. Así, concentraciones elevadas de Fe, Mn y Zn causan problemas diversos (sabor, color, manchas en tuberías y accesorios), mientras que el consumo continuado de agua que contiene altas concentraciones de Ba y Cu puede producir intoxicaciones de diverso grado, siendo posibles síntomas gastrointestinales menos graves con concentraciones de Cu de 3–5 mg/L. El As y el Cr pueden ser cancerígenos, mientras que el Al, el Pb y el Hg son tóxicos cuando se consumen en cantidades suficientes durante períodos prolongados (OMS, 2008).

En relación al problema de la contaminación debida a las cenizas, la severidad e intensidad de los incendios juegan un papel crucial, ya que la carga de ceniza producida tras los incendios forestales tiende a ser sustancialmente mayores allí donde la severidad del fuego ha sido más elevada (Santín et al., 2015). La densidad aparente de las cenizas también guarda relación positiva con la gravedad del incendio. Estas relaciones entre la severidad del fuego en la carga total y la densidad aparente de la ceniza generada se atribuyen principalmente a una combinación derivada de la cantidad total de combustible afectado por el fuego y la contribución del suelo mineral carbonizado a la capa de ceniza. Según las circunstancias del incendio y la temperatura alcanzada durante la combustión, puede generarse un mayor número de potenciales contaminantes y nutrientes (Bodi et al., 2014).

Los incendios forestales en las Islas Canarias en las últimas décadas se producen generalmente durante la estación seca, y en situaciones de acumulación de masa vegetal, que servirá como combustible (Rozas et al., 2011). Esta tendencia se mantiene en la gran mayoría de incendios del archipiélago, donde según las Estadísticas de Incendios Forestales en Canarias (Instituto Canario de Estadística, 2023), la mayoría de los incendios en las islas ocurren entre julio y agosto, coincidiendo con los meses más secos y propensos a olas de calor, además de producirse en temporadas donde las precipitaciones previas han sido menores, lo que tiende a secar la materia vegetal (Weiser et al., 2021). En Canarias arde básicamente superficie arbolada, mayoritariamente bosque de pinar canario, a diferencia del territorio peninsular, donde son mucho más afectadas las superficies con matorral y/o pastizales (Notario del Pino, 2009).

Se ha constatado un incremento en la frecuencia de eventos incendiarios en las Islas Canarias, tal como revelan las Estadísticas de Incendios Forestales en Canarias (Instituto Canario de Estadística, 2023) durante la última década. Así, entre 2011 y 2015 se produjeron 477 incendios forestales en las islas, frente a los 363 ocurridos entre 2000 y 2004. Detrás del aumento de los incendios en las islas, se encuentra principalmente la mano del hombre, ya sea de forma deliberada o debido a negligencias o accidentes (Arévalo y Naranjo-Cigala, 2018).

INTRODUCCIÓN

El clima es otro de los factores más relevantes en la generación y propagación de los incendios forestales. Las condiciones meteorológicas que favorecen la ignición y propagación de los grandes incendios suponen generalmente temperaturas relativamente altas, superiores a 30-35 °C y humedades relativas inferiores al 20 – 30 %, sobre todo tras sequías prolongadas (Notario del Pino, 2009). El régimen de vientos también juega un papel relevante en la propagación de los incendios. Los vientos predominantes en las islas son de componente NE (alisios), y durante largos periodos del año proporcionan humedad a las islas de mayor relieve, gracias al mar de nubes generado por la intercepción de estos vientos por las laderas septentrionales de las islas de mayor relieve (Weiser et al., 2021), lo que también conduce a considerar el papel de la orografía de las islas, especialmente en áreas de pendientes abruptas y de difícil acceso, en Tenerife, Gran Canaria, La Palma y La Gomera, así como la presencia de grandes barrancos que por lo general suponen una dificultad añadida para el control de los incendios (Notario del Pino, 2009).

Una dificultad para evaluar la composición química de las cenizas en general es el alto nivel de variabilidad, causada por el tipo de vegetación, especies en particular, parte de la planta quemada (corteza, madera u hojas), clima y las condiciones de combustión. A diferencia de estudios realizados en otros países donde existe una amplia información acerca de las cenizas de especies como el eucalipto y pino, donde se ha recabado información sobre los diferentes nutrientes, compuestos que generan y posibles contaminantes (Campos et al., 2012; Campos et al., 2016), en el caso de las Islas Canarias esta información es muy escasa aun presentando las islas una gran diversidad de especies endémicas. Esta falta de información hace difícil predecir la potencial pérdida de nutrientes de los ecosistemas afectados por el fuego en Canarias y el riesgo de contaminación de ecosistemas acuáticos cuando la ceniza producida durante un incendio es transportada aguas abajo por las lluvias ocurridas tras el fuego.

Objetivos

OBJETIVOS

Objetivos

Los principales objetivos de este proyecto son (i) el desarrollo de un método para la producción de cenizas en laboratorio que reproduzca los procesos de quema que se dan durante los tipos de incendios forestales más comunes (incendios de superficie y de copa) y (ii) la caracterización química de cenizas generadas en estos dos tipos de incendios para especies vegetales endémicas de las islas y su comparación con cenizas de una especie de referencia como es el eucalipto, especie de distribución global y con una alta incidencia de incendios forestales.

Se plantean principalmente dos hipótesis relacionadas con la composición química de las cenizas y la influencia del impacto del tipo de incendio y el tipo de vegetación en ella.

- La primera hipótesis es que el tipo de incendio simulado (de copa o superficie) tendrá un impacto significativo en la severidad del incendio y, por lo tanto, en la composición química de las cenizas y en la carga de cenizas generada.
- La segunda hipótesis que se plantea es que cada especie va a presentar una caracterización química particular, teniendo por ende el fuego un efecto diferente en la composición química de las cenizas de cada una de las especies vegetales.

Material y métodos

Material y métodos

Selección de las zonas de estudio

Las especies seleccionadas para este estudio fueron: codeso (*Adenocarpus foliolosus*), tagasaste (*Chamaecytisus proliferus*), retama (*Spartocytisus supranubius*) y eucalipto (*Eucalyptus ssp*). Codeso, tagasaste y retama son especies de la familia Fabaceae endémicas de las Islas Canarias, estando presentes principalmente en las islas occidentales. Existe muy poca información sobre el papel de estas especies en los incendios forestales del archipiélago, como tampoco se dispone de información sobre la composición de sus cenizas ni qué relación guardan con la severidad del fuego. En contraposición, el eucalipto es una especie originaria de Australia, pero ampliamente distribuida por todo el planeta. Fue introducida en el archipiélago por su interés maderero, desde las zonas próximas a la costa hasta las zonas de medianía (Gobierno de Canarias, 2023), y se conoce bien su comportamiento frente al fuego y la composición química de las cenizas que genera. Así, esta especie servirá como referencia respecto a las tres especies endémicas seleccionadas.

Codeso, tagasaste y retama de monte (no la del Teide), forman comunidades de orla, y crecen allí donde ocurre regresión del monteverde (incendios, talas, etc.), inicialmente formando una orla que se extiende por laderas y enclaves abruptos. Actualmente el codeso es fácilmente observable en los bordes de caminos, pistas, carreteras y zonas alteradas de laurisilva y fayal-brezal. Codesos y escobones conviven con el pino canario. La retama del Teide crece mayoritariamente entre los 1700 - 2400 m, a diferencia del resto.

Las zonas elegidas para la recolección de las muestras se localizan en el Norte de la isla de Tenerife, zonas forestales o matorrales de cumbre con riesgo de incendio, (Tabla. 1). Los criterios de elección se basan en la abundancia de las especies de interés, así como una distancia mínima de carreteras, pistas o senderos, a fin de minimizar la posible influencia antrópica

MATERIAL Y MÉTODOS

Especie	Localidad	Altitud (m)	Pendiente (%)	Coordenadas	Cobertura suelo (%)	Cobertura dosel (%)	Humedad antes de la quema (%)
Codeso <i>Adenocarpus foliolosus</i>	Montaña de Joco	1946	10	X: 356511 Y: 3138448	100	30	2,22
Eucalipto <i>Eucalyptus ssp</i>	Pico de las flores	1342	5	X: 363008 Y: 3145247	95	35	0,86
Tagasaste <i>Chamaecytisus proliferus</i>	Montaña americana	1670	10	X: 357957 Y: 3140837	100	50	2,24
Retama <i>Spartocytisus supranubius</i>	Montaña de Iguelque	2244	10	X: 353830 Y: 3134160	20	0	1,42

Tabla 1.- Características de la zona donde fueron recolectadas cada una de las especies vegetales.

Muestreo

Una vez seleccionadas las zonas en la que dominaran las especies de interés se procedió a la toma de muestras. En el caso del eucalipto, se tomaron muestras del horizonte orgánico superficial del suelo característico de suelos forestales (horizonte O) (Soil Survey Staff, 2014) sin excluir otros restos (ramas, cortezas, etc.). Las muestras se tomaron en una parcela de 2 x 2 m y evitando en lo posible la contaminación con restos de otras especies ni suelo mineral (Fig. 1).

Sin embargo, el resto de las especies presentó una localización más reducida, a menudo compartida con el pino canario, y la ausencia de un horizonte O bien diferenciado del que tomar muestras. Esta circunstancia hizo impracticable una técnica de muestreo en parcela. Por todo ello, y con la finalidad de evitar la mezcla con las acículas, se decidió recolectar muestras de ramas y hojas secas de los propios individuos. Entendemos que este método es más cercano a la realidad de un incendio, por ser las ramas (y eventualmente, el individuo entero) el combustible principal en un fuego real dada la inexistencia de horizonte O.

MATERIAL Y MÉTODOS



Figura 1. Parcela de 2 x 2 m para la recolección de muestras de eucalipto.

Preparación de las muestras

Las muestras fueron secadas en dos etapas. Inicialmente al aire durante 3 semanas, y en estufa a 30°C durante cinco días justo antes de las quemas para reproducir las condiciones climáticas propias en las que se suelen producir los incendios forestales en las islas (Notario del Pino, 2009; Weiser et al., 2021). Terminado el proceso de secado, se midió el contenido de humedad de las especies recogidas tomando una submuestra de hojarasca por diferencia de peso antes y después de un secado adicional a 60°C durante un mínimo de 48 horas. Se obtuvieron humedades bajas entre el 2 y 0,8 % (Tabla 1). Una vez secas, las muestras se quemaron para la producción de cenizas tratando de reproducir las condiciones de los dos tipos de fuego que se suelen dar en las islas, incendios de superficie e incendios de copa.

Selección de temperaturas y tiempos de quemado

Las muestras se quemaron utilizando un soplete de butano (Dexter, soplete quemador) ya que la quema con llama recrea mejor las condiciones de un incendio forestal en comparación con un horno de mufla utilizado en estudios previos. La temperatura alcanzada en el transcurso de la quema se registró usando termopares conectados a un *datalogger* (Lascar, Easylog™), tomando una lectura de temperatura en la superficie por segundo (1 Hz).

MATERIAL Y MÉTODOS

No existe metodología establecida para la reproducción de incendios de superficie y copa. Por ello se procedió a realizar una revisión bibliográfica sobre las temperaturas máximas y tiempos de residencia de estos tipos de fuego para posteriormente reproducir estas condiciones en laboratorio. Según la bibliografía consultada (Stoof et al., 2010; Santín et al., 2016; Badía et al., 2017; Ryan 2002), la quema en superficie presenta temperaturas máximas del orden de los 300 - 400 °C y un tiempo prolongado de quema. En los incendios de copa, sin embargo, las temperaturas máximas alcanzan los 700 - 800 °C y el tiempo de residencia de esa temperatura máxima se sitúa en torno a 1.5 minutos.

Atendiendo a los datos aportados por la bibliografía anterior y después de diversas simulaciones de quema con el mismo combustible que se iba a utilizar en las quemas finales, para la quema de superficie se realizó la ignición del material vegetal desde un lado de la bandeja, permitiendo la propagación del fuego hacia el otro extremo sin aporte de llama, de modo que el experimento finalizó una vez agotado el combustible. En este tipo de incendio simulado, los tiempos de quema oscilaron entre 8 – 10 minutos. Para las quemas de tipo incendio de copa, se siguió inicialmente el mismo procedimiento encendiendo la masa desde un lado de la bandeja, para aplicar de nuevo el soplete después de 4 minutos a unos 40 cm de la bandeja durante 90 segundos, con el objetivo de replicar las condiciones reales de temperatura máxima y tiempos de residencia alcanzados por este tipo de incendios.

Proceso de quemado

Para la quema se pesó una cantidad variable de materia vegetal en la bandeja de modo que formase una capa de 2 - 3 cm de espesor, para así facilitar su combustión completa y replicar en lo posible las condiciones (i.e., espesor de hojarasca) del medio natural. El material vegetal se dispuso en una bandeja metálica (35x25 cm) y la quema se realizó al aire libre y bajo meteorología favorable (día soleado, sin viento y en ausencia de precipitación) siguiendo los procedimientos para quemas de superficie y copa (Figura 2).

MATERIAL Y MÉTODOS



Figura 2. Ejemplo del proceso de quemado de una muestra de eucalipto.

Los datos de pesos de materia vegetal seca y masa de ceniza generada fueron anotados para calcular la cantidad de ceniza generada a partir de cada especie en cada tipo de incendio. Se realizaron 3 réplicas de cada especie y tipo de incendio, lo que arroja un total de 24 muestras de ceniza generadas, que fueron después analizadas en laboratorio.

Análisis químicos

Previamente al análisis, las muestras de cenizas pasaron por un proceso de homogeneización mediante molienda en mortero de ágata. Las propiedades químicas se midieron en el extracto acuoso (1:20 ceniza:agua) de acuerdo con el método propuesto por Hageman (2017) para las cenizas de incendios forestales, que implica agitación mecánica de la suspensión durante 5 minutos y posterior separación de fases por filtrado a 0.45 micras. La lista de propiedades medidas en los extractos acuosos incluye:

- pH y conductividad eléctrica, usando electrodos de medida (Crison, GLP 22).
- Cationes básicos por espectrofotometría de absorción atómica (Ca^{+2} y Mg^{+2}) o emisión a la llama (Na^{+} y K^{+}) en un aparato (Thermo Scientific, iCE 3000 Series AA Spectrometers).
- Amonio, nitrato, sulfato y fosfatos por espectrofotometría UV-VIS siguiendo los métodos de Nessler (Jackson, 1982), Doane y Horwath (2003), Black (1965) y Murphy y Riley (1962) respectivamente, en un lector Thermo Multiskan Sky para placas de 96 pocillos, frente a las respectivas curvas patrón (0 - 1 ppm, salvo sulfatos, 0 - 40 ppm).

MATERIAL Y MÉTODOS

Análisis estadístico

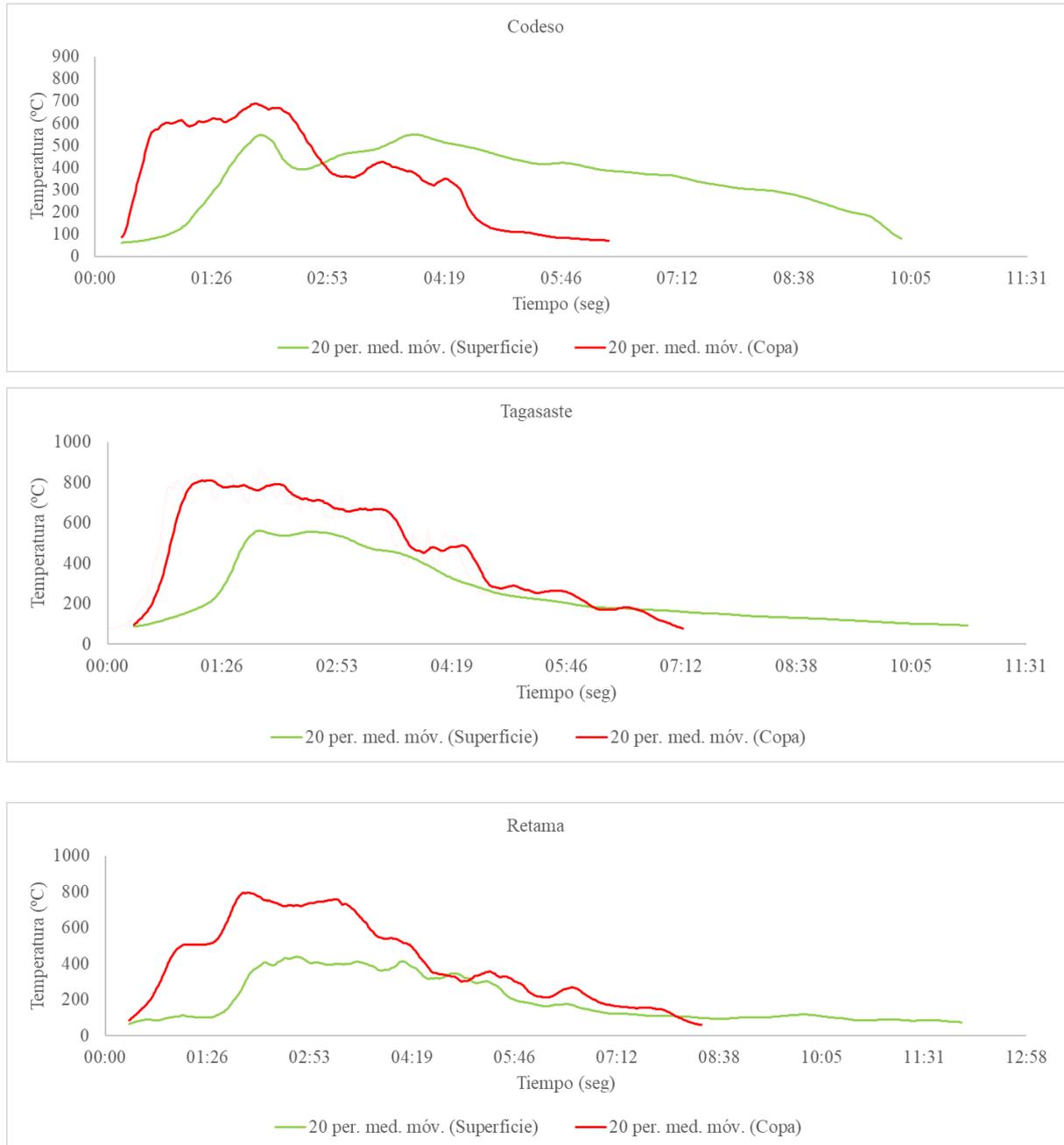
Los análisis estadísticos se realizaron con el software IBM SPSS Statistics 25 (SPSS Inc., 2017). El nivel de significación utilizado para todas las pruebas fue del 5% ($\alpha = 0,05$). Para analizar las diferencias en la composición química de las cenizas entre los diferentes comportamientos del fuego y entre las diferentes especies se realizó la prueba no paramétrica de Kruskal - Wallis. En este último caso, la comparación química entre especies, se incluyó una prueba post - hoc (comparaciones múltiples por parejas) para determinar las diferencias individualizadas.

Resultados

RESULTADOS

Resultados

La Figura 3 muestra las diferentes curvas de temperatura que se registraron durante el experimento para cada una de las especies según los dos tipos de incendios simulados. Se pueden apreciar temperaturas medias en torno a los 400°C en el caso de los incendios de superficie y temperaturas en torno a los 750°C en los incendios de copa.



RESULTADOS

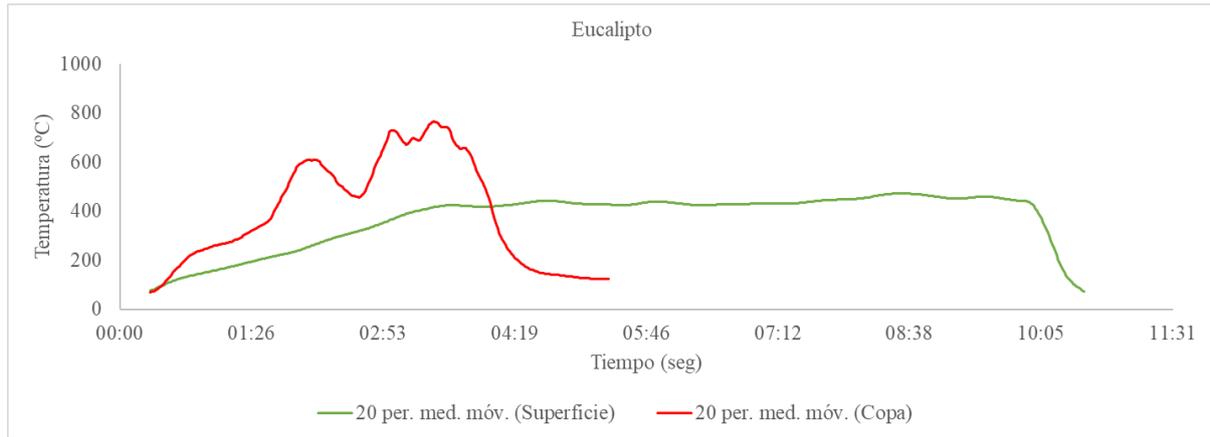


Figura 3. Temperaturas registradas durante las quemas en las cuatro especies vegetales. Se representa la media móvil en periodos de 20 segundos.

No se apreciaron diferencias significativas en la masa de cenizas generada (Figura 4) entre fuego simulado de superficie ($15.1 \pm 7.9 \%$) y de copa ($19.3 \pm 11.9 \%$). No obstante, la masa de cenizas generadas es un 25% mayor en el caso de los incendios de copa.

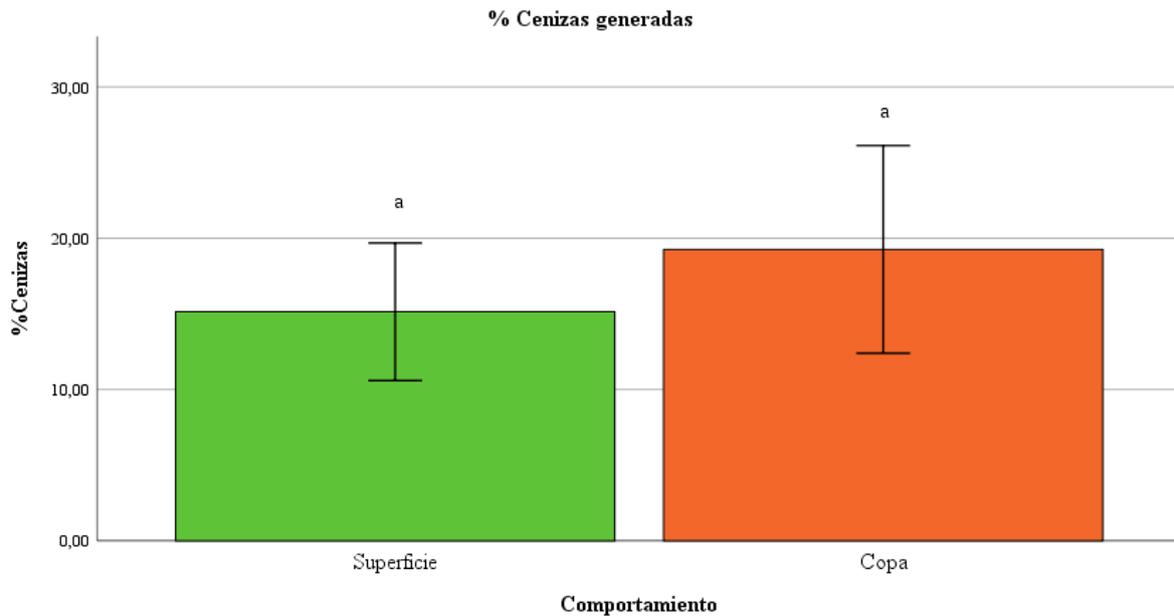


Figura 4. Porcentaje de ceniza generada en los dos tipos de fuego. Las barras de error representan el error estándar de la media. Las letras indican clases con medias significativamente iguales. Para cada clase, $N = 12$.

La Tabla 2 extiende la comparación por tipo de incendio al resto de propiedades en estudio. Sólo se observan diferencias estadísticamente significativas entre ambos grupos para sodio, donde las concentraciones son mayores en los incendios de copa.

RESULTADOS

Tipos de comportamiento del fuego		
	Superficie	Copa
pH	9.9 ± 1.1 ^a	9.4 ± 0.7 ^a
CE (µS cm⁻¹)	193.3 ± 145.0 ^a	119.5 ± 34.3 ^a
N-NO₃ (mg kg⁻¹)	3.8 ± 1.72 ^a	5.0 ± 0.04 ^a
S (mg kg⁻¹)	800.1 ± 461.8 ^a	850.9 ± 385.4 ^a
N-NH₄⁺ (mg kg⁻¹)	27.4 ± 16.4 ^a	40.4 ± 49.0 ^a
P (mg kg⁻¹)	25.9 ± 14.8 ^a	13.7 ± 10.3 ^a
Ca (mg kg⁻¹)	661.6 ± 252.4 ^a	1009.3 ± 681.0 ^a
Na (mg kg⁻¹)	250.9 ± 95.3 ^a	350.8 ± 83.2 ^b
K (mg kg⁻¹)	1323.4 ± 1163 ^a	1016.2 ± 409.5 ^a
Mg (mg kg⁻¹)	319.4 ± 119.9 ^a	300.6 ± 117.5 ^a

Tabla 2.-Valores medios (± error estándar de la media) de pH, CE y concentraciones de las especies químicas en los extractos obtenidos de las cenizas por tipo de fuego. Número de muestras = 12 para cada tipo de comportamiento del fuego. Diferentes letras en superíndice indican grupos con medias significativamente diferentes para cada elemento.

Al revisar los resultados obtenidos por especies (Tabla 3), se aprecian diferencias significativas para pH, C.E. En el caso del pH tenemos valores muy similares a excepción de los valores obtenidos entre el codeso y la retama, donde existen diferencias significativas. Por otro lado, la CE presenta valores significativamente diferentes cuando hablamos del eucalipto en comparación con la retama y el tagasaste. Analizando los diferentes elementos químicos donde existen diferencias significativas, encontramos el Ca que se divide en dos grupos con diferencias significativas. Por un lado codeso y eucalipto con concentraciones semejantes y por el otro grupo formado retama y tagasaste. También encontramos diferencias con el P, donde las concentraciones de eucalipto y tagasaste son significativamente diferentes. De igual manera, el N-NH₄ presenta diferencias significativas cuando se compara el tagasaste con el eucalipto y retama. Y por último, encontramos el K, donde las concentraciones del codeso y el eucalipto son significativamente diferentes a las del tagasaste.

RESULTADOS

	Especies vegetales			
	Codeso	Retama	Tagasaste	Eucalipto
pH	10.1 ± 0.28^a	8.8 ± 0.5^b	9.6 ± 0.4^{ab}	10.1 ± 1.5^{ab}
CE ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	154.6 ± 36.5^{ab}	100.5 ± 16.1^a	103.1 ± 14.7^a	267.3 ± 177.9^b
N-NO₃ (mg kg⁻¹)	6.4 ± 2.6^a	3.6 ± 2.3^a	4.6 ± 2.8^a	3.9 ± 1.5^a
S-SO₄²⁻ (mg kg⁻¹)	924.1 ± 549.5^a	727.7 ± 135.2^a	618.8 ± 121.2^a	1031.3 ± 582.2^a
N-NH₄⁺ (mg kg⁻¹)	19.1 ± 4.5^{ab}	31.9 ± 15.9^a	13.7 ± 2.3^b	71.2 ± 57.9^a
P (mg kg⁻¹)	18.8 ± 12.8^{ab}	6.9 ± 0^{ab}	27.8 ± 12.6^a	5.9 ± 2.6^b
Ca (mg kg⁻¹)	407.1 ± 78.8^a	1302.4 ± 531.6^b	1192.3 ± 425.9^b	439.9 ± 114.1^a
Na (mg kg⁻¹)	354.8 ± 96.1^a	310.4 ± 134.6^a	206.5 ± 20.5^a	331.7 ± 42.6^a
K (mg kg⁻¹)	1730.9 ± 1133.8^a	1041.1 ± 521^{ab}	425.3 ± 145.5^b	1481.7 ± 837.1^a
Mg (mg kg⁻¹)	414.2 ± 79.9^a	248.5 ± 143.1^a	253.3 ± 87.3^a	324.7 ± 79.3^a

Tabla 3.- Valores medias (\pm error estándar de la media) de pH, CE y concentración de las especies químicas en los extractos obtenidos de las cenizas por tipo de especie. Número de muestras = 6 para cada especie. Diferentes letras en superíndice indican grupos con medias significativamente diferentes para cada elemento.

La Tabla 4 compara los resultados de cada especie en función de los dos tipos de quema empleados. Dado el limitado número de datos obtenidos por especie y severidad (3), no se realiza análisis estadístico de estos datos y únicamente se comentan con carácter descriptivo. Algunos valores destacables son:

- La C.E. medida en las cenizas procedentes de la quema superficial de eucalipto registra el valor medio más elevado de todo el conjunto ($382.9 \mu\text{S cm}^{-1}$).
- Las concentraciones de Ca^{+2} , de las cenizas de retama y tagasaste se duplican en la quema de incendio de copa, respecto a la quema de superficie.
- Hubo cenizas en las que no fue posible obtener valores medibles de N nítrico y P. En todo caso, los valores medios registrados siguen siendo bajos, situándose en torno a los 4.4 mg kg^{-1} y 19.8 mg kg^{-1} respectivamente.

RESULTADOS

	Codeso	Retama	Tagasaste	Eucalipto	Codeso	Retama	Tagasaste	Eucalipto
	Superficie				Copa			
pH	10.0 ± 0.22	8.9 ± 0.6	9.5 ± 0.4	11.2 ± 1.2	10.2 ± 0.3	8.8 ± 0.5	9.7 ± 0.4	9.0 ± 0.6
CE (µS cm⁻¹)	164.8 ± 41.9	110.6 ± 12.7	114.9 ± 10.9	382.9 ± 197.9	144.6 ± 35.7	90.3 ± 13.4	91.4 ± 2.5	151.8 ± 4.3
N-NO₃ (mg kg⁻¹)	<LD	<LD	1.9 ± 0	4.7 ± 1.0	6.4 ± 2.6	3.6 ± 2.3	5.5 ± 2.6	2.4 ± 0
S-SO₄²⁻ (mg kg⁻¹)	504.6 ± 265.0	681.1 ± 98.1	559.1 ± 39.1	1455.4 ± 456.4	1343.6 ± 396.0	774.3 ± 171.9	678.4 ± 156.5	607.3 ± 315.6
N-NH₄⁺ (mg kg⁻¹)	20.0 ± 5.9	38.6 ± 16.3	13.9 ± 2.2	37.2 ± 22.0	18.2 ± 3.5	25.3 ± 15.2	12.8 ± 2.8	105.3 ± 66.6
P (mg kg⁻¹)	26.3 ± 14.9	6.9 ± 0	31.8 ± 14.3	<LD	11.3 ± 4.0	<LD	23.8 ± 12.0	5.9 ± 2.7
Ca (mg kg⁻¹)	372.1 ± 107.0	928.2 ± 145.4	812.8 ± 141.7	533.1 ± 79.2	442.1 ± 19.7	1676.6 ± 515.1	1571.8 ± 38.8	346.8 ± 15.7
Na (mg kg⁻¹)	300.7 ± 118.0	196.3 ± 52.4	173.6 ± 47.3	333.3 ± 60.9	408.9 ± 20.0	424.5 ± 59.2	239.5 ± 29.8	330.1 ± 28.5
K (mg kg⁻¹)	2251.2 ± 1518.4	691.8 ± 410.1	335.2 ± 120.2	2015.2 ± 939.3	1210.7 ± 310.0	1390.4 ± 383.2	515.3 ± 119.1	948.2 ± 125.4
Mg (mg kg⁻¹)	418.3 ± 107.8	316.8 ± 109.6	183.1 ± 15.5	360.8 ± 100.9	410.2 ± 65.7	180.2 ± 158.9	323.4 ± 63.5	288.7 ± 40.3

Tabla 4.- Valores medios (± error estándar de la media) de las propiedades químicas medidas en los extractos de las cenizas por tipo de especie y comportamiento. N = 3 para cada especie en cada tipo. LD: por debajo del límite de detección.

Discusión

Discusión

Las curvas de temperatura registradas en este estudio (Figura 3) se adaptan a cada uno de los dos tipos de incendio simulados. Por medio de este método de simulación de incendios al aire libre con llama utilizado en estudios previos (Badía et al., 2017; Santín et al., 2016; Ryan 2002) se han podido establecer temperaturas y tiempos de quemado bien adaptados a los establecidos en la bibliografía. Estos estudios indican que las temperaturas máximas en fuegos de superficie oscilan en torno a 400 °C y con un tiempo de residencia prolongado que puede llegar a los 10 minutos, según las propiedades del combustible. Mientras, en incendios de copa, las temperaturas máximas se sitúan en torno a 800 °C, con máximos puntuales de 1000 °C, que según Ryan (2002), únicamente ocurren durante 90 segundos, que es el periodo de máxima intensidad. Por ello, los tiempos de residencia son en este caso más cortos, aproximadamente de 4 minutos, consumiendo la hojarasca a mayor ritmo. Así pues, las gráficas de temperatura obtenidas en este estudio confirman la validez de la metodología para la simulación de ambos tipos de incendio y la producción de ceniza en laboratorio.

Asimismo, la comparativa de masa de cenizas generada en los dos comportamientos del fuego (Figura 4), encuentra reflejo en otros estudios que la relacionan con la severidad del incendio. Así lo han constatado Santín et al. (2012) y Santín et al. (2015), quienes observaron que la carga de ceniza generada tras un incendio de severidad extrema en Australia triplicaba la carga medida a baja severidad. La mayor severidad de los incendios forestales suele estar relacionada con un consumo más efectivo del combustible (Chafer et al., 2004). Con todo, la cantidad de cenizas producidas también depende de la masa total de combustible que se quema, de modo que en incendios más graves, se consume una mayor cantidad de biomasa disponible, tanto muerta como viva, lo que conlleva una relación positiva entre la severidad del fuego y la cantidad total de cenizas. La combustión de la materia orgánica del suelo puede intensificar esta relación. Cuando un incendio forestal afecta al suelo, el horizonte superficial del suelo puede perder en mayor o menor grado sus constituyentes orgánicos, que se incorporan a la masa de cenizas (Bodí et al., 2014).

La Tabla 2 permite observar cómo afecta la severidad a la composición química de las cenizas (Maia et al., 2012). Si bien, en general no se puede apreciar ninguna tendencia de los diferentes elementos químicos analizados, tal y como han constatado estudios previos (Santín et al., 2015). Podemos observar concentraciones muy similares en ambos tipos de incendio para

DISCUSIÓN

el N-NH₄⁺, P y Mg hidrosolubles. En otros casos como Ca ($661.6 \pm 252.4 \text{ mg.kg}^{-1}$ y $1009.3 \pm 681.0 \text{ mg.kg}^{-1}$) y el K ($1323.4 \pm 1163.3 \text{ mg.kg}^{-1}$ y $1016.2 \pm 409.5 \text{ mg.kg}^{-1}$ para incendios de suelo y copa respectivamente), las concentraciones son diferentes sin que ello suponga diferencias estadísticamente significativas. En esta situación es relevante que, aun así, estos resultados sean coherentes con estudios previos (Gabet and Bookter, 2011). Según Bodí et al., (2014), el K comienza a volatilizarse a partir de 760 °C, lo que explica la disminución observada desde fuego de superficie a copa, donde se obtienen temperaturas medias en torno a los 700 - 800 °C. El Ca, se volatiliza a 1240 - 1480 °C Bodí et al., (2014), así que no ocurre volatilización en ninguna de las condiciones de fuego simuladas y el ligero incremento de este elemento observado entre el fuego de superficie y el de copa puede deberse a un mayor grado de combustión del material vegetal y la liberación de este elemento.

El elemento químico que muestra mayor diferencia de concentración entre incendios de superficie y de copa es el Na, cuyas concentraciones aumentaron desde $250.9 \pm 95.3 \text{ mg.kg}^{-1}$ (incendios de superficie) a $350.8 \pm 83.2 \text{ mg.kg}^{-1}$ (copa) tal y como han reportado estudios anteriores (Gabet and Bookter, 2011 y Pereira et al., 2014). Este elemento comienza a volatilizarse a partir de 880 °C, valor similar a la temperatura máxima alcanzada en nuestros incendios de copa, por lo que probablemente su tasa de liberación desde el material vegetal al quemarse es mayor que la de volatilización (Bodí et al., 2014).

Analizando más en detalle los resultados obtenidos según las especies vegetales (Tabla 3), podemos apreciar como parámetros como el pH y la C.E. presentan diferencias significativas, ya observadas en estudios previos (Pereira et al., 2014). En el caso de la C.E. se puede ver claramente como hay un grupo formado por las tres especies endémicas estudiadas, codeso, retama y tagasaste, cuyas concentraciones son muy similares ($154.6 \pm 36.5 \text{ } \mu\text{S.cm}^{-1}$, $100.5 \pm 16.1 \text{ } \mu\text{S.cm}^{-1}$ y $103.1 \pm 14.7 \text{ } \mu\text{S.cm}^{-1}$ respectivamente), teniendo por otro lado al eucalipto ($267.3 \pm 177.9 \text{ } \mu\text{S.cm}^{-1}$) con valores significativamente superiores. En el caso del pH podemos ver que la única diferencia que existe es entre el codeso y la retama (10.1 ± 0.28 y 8.8 ± 0.5 respectivamente). Analizando más detenidamente los elementos químicos estudiados, se pudo determinar que el Ca muestra dos grupos distintos con diferencias significativas. Por un lado, el codeso y el eucalipto presentan valores de $407.1 \pm 78.8 \text{ mg.kg}^{-1}$ y $439.9 \pm 114.1 \text{ mg.kg}^{-1}$, respectivamente. Por otro lado, la retama y el tagasaste muestran valores de $1302.4 \pm 531.6 \text{ mg.kg}^{-1}$ y $1192.3 \pm 425.9 \text{ mg.kg}^{-1}$, respectivamente. En cuanto al K, se observan diferencias al comparar el tagasaste ($425.3 \pm 145.5 \text{ mg.kg}^{-1}$) con el codeso y el eucalipto (1730.9

DISCUSIÓN

$\pm 1133.8 \text{ mg.kg}^{-1}$ y $1481.7 \pm 837.1 \text{ mg.kg}^{-1}$, respectivamente). A continuación, se encuentra el N-NH₄, donde también hay diferencias cuando se compara el tagasaste ($13.7 \pm 2.39 \text{ mg.kg}^{-1}$) con el eucalipto y la retama ($71.2 \pm 57.9 \text{ mg.kg}^{-1}$ y $31.9 \pm 15.9 \text{ mg.kg}^{-1}$ respectivamente). En el P también se encuentran diferencias únicamente entre el tagasaste y eucalipto ($27.8 \pm 12.6 \text{ mg.kg}^{-1}$ y $5.9 \pm 2.6 \text{ mg.kg}^{-1}$, respectivamente). Según estos resultados, el tagasaste es la especie vegetal que más se diferencia del resto en este estudio en cuanto a caracterización química se refiere. La ausencia de patrones al comparar los tipos de incendios y las especies seleccionadas hace pensar que las cenizas de cada especie presentan una caracterización química específica. Esto coincide con los estudios de Gabet y Bookter (2011). Estos resultados respaldan además una de las hipótesis propuestas, que sugiere que cada especie aporta a las cenizas características químicas específicas.

La metodología aplicada en este estudio simula condiciones próximas a las de los diferentes tipos de incendio en cuanto a temperaturas alcanzadas y tiempos de residencia (Ryan 2002). Su empleo para la generación de cenizas está pues justificado. Además, permite determinar de forma rápida e individualizada para cada especie forestal la composición química y el contenido de posibles contaminantes de las cenizas producidas. Esta información permitiría evaluar la capacidad de regeneración de los ecosistemas afectados, así como y el riesgo de contaminación de aguas tras incendios forestales allí donde no exista información.

En Canarias, el conocimiento de la composición de las cenizas generadas en incendios de diferente comportamiento y que afecten especies susceptibles de ser afectadas por incendios forestales es importante para evaluar la capacidad de recuperación de los ecosistemas afectados, pues las cenizas suelen contener altas concentraciones de nutrientes (Campos et al., 2016; Campos et al., 2012) fácilmente asimilados por plantas y microorganismos (Machado et al., 2015) pero que se pueden perder rápidamente dada su alta movilidad (Úbeda et al., 2009; Wanthongchai et al., 2008). Además, islas como Gran Canaria o La Gomera hacen uso de las aguas superficiales recogidas en embalses y estas aguas pueden verse afectadas por la contaminación que el transporte de cenizas desde zonas afectadas por incendios forestales puede inducir. Aunque el conocimiento al respecto es limitado y más estudios al respecto son necesarios para establecer la magnitud de este riesgo, los contaminantes contenidos en las cenizas pueden ser también transportados a través del suelo por el agua que percola y alcanzar los acuíferos de las islas, acuíferos que en general son la principal fuente de agua potable para la población de Canarias.

Conclusiones

Conclusiones:

La nueva metodología establecida para la simulación de incendios de copa y superficie en laboratorio ha permitido la generación de cenizas de cuatro especies vegetales en condiciones similares a las que se producen en incendios de estos tipos en la naturaleza según la bibliografía al respecto. El posterior análisis químico de dichas cenizas permitió conocer su composición química y el riesgo de contaminación de aguas que éstas presentaban. Este estudio ha permitido llegar a las siguientes conclusiones:

1. El método de simulación de incendios establecido permite obtener curvas de temperatura y tiempos de residencia que se ajustan correctamente a los valores que se producen durante incendios en situaciones reales.
2. La concentración de algunos elementos y compuestos químicos puede ser muy relevante para poder categorizar los incendios que se producen (copa o superficie), siendo el Na el más evidente dentro de los estudios. Esto es debido a que la temperatura a la que se volatiliza el Na se sitúa entre las obtenidas para los tipos de fuego estudiados y permite, por lo tanto, discriminarlos.
3. Las diferencias observadas en la composición química de las cenizas producidas permiten establecer que tanto la especie vegetal como el tipo de fuego determinan la composición final y el potencial riesgo de contaminación de las cenizas generadas.

Conclusions:

The new methodology developed for simulating crown and surface fires has allowed the generation of ash from four plant species in similar conditions to that obtained in real fires. The chemical analysis of the ash produced provided new information about the chemical composition and potential contamination risk of the produced ash. The main conclusions to this study are:

1. The designed fire simulation method works correctly by providing temperature curves and residence times that correctly match the values obtained during real fires.
2. The concentration of some chemical parameters can be highly relevant for categorizing the type of fire (crown or surface), with Na being the most evident within the studies. This is due to the temperature at which Na vaporizes, that lies between the maximum

CONCLUSIONES

temperatures reached by surface and crown fire and allows, thus, discrimination between them.

3. The differences observed in the composition of the ash produced confirm that both the species and the type of fire determine the chemical composition of the ash produced and, therefore, their potential water contamination risk.

Bibliografía

Bibliografía

- Arévalo, J. R., & Naranjo-Cigala, A.** (2018). Wildfire impact and the “fire paradox” in a natural and endemic pine forest stand and shrubland. *Fire*, 1(3). <https://doi.org/10.3390/fire1030044>
- Armas-Herrera, C. M., Martí, C., Badía, D., Ortiz-Perpiñá, O., Girona-García, A., & Porta, J.** (2016). Immediate effects of prescribed burning in the Central Pyrenees on the amount and stability of topsoil organic matter. *Catena*, 147. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.07.016>
- Badía, D., López-García, S., Martí, C., Ortiz-Perpiñá, O., Girona-García, A., & Casanova-Gascón, J.** (2017). Burn effects on soil properties associated to heat transfer under contrasting moisture content. *Science of the Total Environment*, 601–602. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.254>
- Black, C., ed.**, 1965. *Methods of Soil Analysis Part 2. Chemical and microbiological properties*. 2nd ed. Madison (Wisconsin): American Society of Agronomy.
- Bodí, M. B., Martín, D. A., Balfour, V. N., Santín, C., Doerr, S. H., Pereira, P., Cerdà, A., & Mataix-Solera, J.** (2014). Wildland fire ash: Production, composition and eco-hydro-geomorphic effects. In *Earth-Science Reviews* (Vol. 130). <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.12.007>
- Campo, J., Gimeno-García, E., Andreu, V., González-Pelayo, O., & Rubio, J. L.** (2014). Cementing agents involved in the macro- and microaggregation of a Mediterranean shrubland soil under laboratory heating. *Catena*, 113. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.10.002>
- Campos, I., Abrantes, N., Keizer, J. J., Vale, C., & Pereira, P.** (2016). Major and trace elements in soils and ashes of eucalypt and pine forest plantations in Portugal following a wildfire. *Science of the Total Environment*, 572. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.190>
- Campos, I., Abrantes, N., Vidal, T., Bastos, A. C., Gonçalves, F., & Keizer, J. J.** (2012). Assessment of the toxicity of ash-loaded runoff from a recently burnt eucalypt plantation. *European Journal of Forest Research*, 131(6). <https://doi.org/10.1007/s10342-012-0640-7>
- Cawson, J. G., Nyman, P., Smith, H. G., Lane, P. N. J., & Sheridan, G. J.** (2016). How soil temperatures during prescribed burning affect soil water repellency, infiltration and erosion. *Geoderma*, 278. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.05.002>
- Cawson, J. G., Sheridan, G. J., Smith, H. G., & Lane, P. N. J.** (2012). Surface runoff and erosion after prescribed burning and the effect of different fire regimes in forests and shrublands: A review. In *International Journal of Wildland Fire* (Vol. 21, Issue 7). <https://doi.org/10.1071/WF11160>
- Chafer, C. J., Noonan, M., & Macnaught, E.** (2004). The post-fire measurement of fire severity and intensity in the Christmas 2001 Sydney wildfires. *International Journal of Wildland Fire*, 13(2). <https://doi.org/10.1071/WF03041>
- Doane, T. & Horwath, W.**, 2003. Spectrophotometric Determination of Nitrate with a Single Reagent. *Analytical Letters*, 36(12), p. 2713–2722.
- Drewry, J. J., Newham, L. T. H., Greene, R. S. B., Jakeman, A. J., & Croke, B. F. W.** (2006). A review of nitrogen and phosphorus export to waterways: Context for catchment modelling. In *Marine and Freshwater Research* (Vol. 57, Issue 8). <https://doi.org/10.1071/MF05166>
- Gabet, E. J., & Bookter, A.** (2011). Physical, chemical and hydrological properties of Ponderosa pine ash. *International Journal of Wildland Fire*, 20(3). <https://doi.org/10.1071/WF09105>
- Girona-García, A., Badía-Villas, D., Martí-Dalmau, C., Ortiz-Perpiñá, O., Mora, J. L., & Armas-Herrera, C. M.** (2018). Effects of prescribed fire for pasture management on soil organic matter and biological properties: A 1-year study case in the Central Pyrenees. *Science of the Total Environment*, 618. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.127>
- Gobierno de Canarias, CanariWiki** (2023). <https://www3.gobiernodecanarias.org/medusa/wiki/index.php?title=Codeso;Eucalipto;Retama;Tagasaste#Referencias>
- Instituto Canario de Estadística.** (2023). Estadísticas de incendios forestales en Canarias. <http://www.gobiernodecanarias.org/istac/jaxi-istac/menu.do?uripub=urn:uuid:1c9aed0f-ad65-4b50-b2a263d1559cb720>.
- Jackson, M.**, 1982. *Análisis Químico de Suelos*. 4th ed. Barcelona: Omega.
- Keeley, J. E.** (2009). Fire intensity, fire severity and burn severity: A brief review and suggested usage. *International Journal of Wildland Fire*, 18(1). <https://doi.org/10.1071/WF07049>

BIBLIOGRAFIA

- Kennedy, M. C., Bart, R. R., Tague, C. L., & Choate, J. S.** (2021). Does hot and dry equal more wildfire? Contrasting short- and long-term climate effects on fire in the Sierra Nevada, CA. *Ecosphere*, 12(7). <https://doi.org/10.1002/ecs2.3657>
- Machado, A. I., Serpa, D., Ferreira, R. v., Rodríguez-Blanco, M. L., Pinto, R., Nunes, M. I., Cerqueira, M. A., & Keizer, J. J.** (2015). Cation export by overland flow in a recently burnt forest area in north-central Portugal. *Science of the Total Environment*, 524–525. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.04.026>
- Maia, P., Pausas, J. G., Arcenegui, V., Guerrero, C., Pérez-Bejarano, A., Mataix-Solera, J., Varela, M. E. T., Fernandes, I., Pedrosa, E. T., & Keizer, J. J.** (2012). Wildfire effects on the soil seed bank of a maritime pine stand - The importance of fire severity. *Geoderma*, 191. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.02.001>
- Martínez, S. I., Contreras, C. P., Acevedo, S. E., & Bonilla, C. A.** (2022). Unveiling soil temperature reached during a wildfire event using ex-post chemical and hydraulic soil analysis. *Science of the Total Environment*, 822. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153654>
- Mataix-Solera, J., Cerdà, A., Arcenegui, V., Jordán, A., & Zavala, L. M.** (2011). Fire effects on soil aggregation: A review. In *Earth-Science Reviews* (Vol. 109, Issues 1–2). <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.08.002>
- Mitsopoulos, I. D., & Dimitrakopoulos, A. P.** (2007). Canopy fuel characteristics and potential crown fire behavior in Aleppo pine (*Pinus halepensis* Mill.) forests. *Annals of Forest Science*, 64(3). <https://doi.org/10.1051/forest:2007006>
- Murphy, J. & Riley, J.**, 1962. A modified single solution method for the determination of P in natural waters. *Analytica Chimica Acta*, Volume 27, pp. 31-36.
- Netshituni, V. T., Cuthbert, R. N., Dondofema, F., & Dalu, T.** (2022). Effects of wildfire ash from native and alien plants on phytoplankton biomass. *Science of the Total Environment*, 834. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155265>
- Notario del Pino, J.** (2009). Los incendios forestales en Canarias. *Efectos de los incendios forestales sobre los suelos en España*. (469-490). Universidad de Valencia.
- Nunes, J. P., Doerr, S. H., Sheridan, G., Neris, J., Santín, C., Emelko, M. B., Silins, U., Robichaud, P. R., Elliot, W. J., & Keizer, J.** (2018). Assessing water contamination risk from vegetation fires: Challenges, opportunities and a framework for progress. *Hydrological Processes*, 32(5). <https://doi.org/10.1002/hyp.11434>
- Parsons, A., Robichaud, P. R., Lewis, S. A., Napper, C., & Clark, J. T.** (2010). Field guide for mapping post-fire soil burn severity. USDA Forest Service - General Technical Report RMRS-GTR, 243.
- Pereira, P., Jordán, A., Cerdà, A., & Martín, D.** (2015). Editorial: The role of ash in fire-affected ecosystems. In *Catena* (Vol. 135). <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.11.016>
- Pereira, P., Úbeda, X., Martín, D., Mataix-Solera, J., Cerdà, A., & Burguet, M.** (2014). Wildfire effects on extractable elements in ash from a *Pinus pinaster* forest in Portugal. *Hydrological Processes*, 28(11). <https://doi.org/10.1002/hyp.9907>
- Pérez-Izquierdo, L., Clemmensen, K. E., Strengbom, J., Granath, G., Wardle, D. A., Nilsson, M. C., & Lindahl, B. D.** (2021). Crown-fire severity is more important than ground-fire severity in determining soil fungal community development in the boreal forest. *Journal of Ecology*, 109(1). <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13529>
- Rozas, V., Pérez-de-Lis, G., García-González, I., & Arévalo, J. R.** (2011). Contrasting effects of wildfire and climate on radial growth of *Pinus canariensis* on windward and leeward slopes on Tenerife, Canary Islands. *Trees - Structure and Function*, 25(5). <https://doi.org/10.1007/s00468-011-0564-8>
- Ryan, K. C.** (2002). Dynamic interactions between forest structure and fire behavior in boreal ecosystems. *Silva Fennica*, 36(1). <https://doi.org/10.14214/sf.548>
- Santín, C., & Doerr, S. H.** (2016). Fire effects on soils: The human dimension. In *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* (Vol. 371, Issue 1696). <https://doi.org/10.1098/rstb.2015.0171>
- Santín, C., Doerr, S. H., Merino, A., Bryant, R., & Loader, N. J.** (2016). Forest floor chemical transformations in a boreal forest fire and their correlations with temperature and heating duration. *Geoderma*, 264. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.09.021>
- Santín, C., Doerr, S. H., Otero, X. L., & Chafer, C. J.** (2015). Quantity, composition and water contamination potential of ash produced under different wildfire severities. *Environmental Research*, 142. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2015.06.041>
- Santín, C., Doerr, S. H., Shakesby, R. A., Bryant, R., Sheridan, G. J., Lane, P. N. J., Smith, H. G., & Bell, T. L.** (2012). Carbon loads, forms and sequestration potential within ash deposits produced by wildfire:

BIBLIOGRAFIA

New insights from the 2009 “Black Saturday” fires, Australia. *European Journal of Forest Research*, 131(4). <https://doi.org/10.1007/s10342-012-0595-8>

Silva, V., Abrantes, N., Costa, R., Keizer, J. J., Gonçalves, F., & Pereira, J. L. (2016). Effects of ash-loaded post-fire runoff on the freshwater clam *Corbicula fluminea*. *Ecological Engineering*, 90. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.01.043>

Silva, V., Pereira, J. L., Campos, I., Keizer, J. J., Gonçalves, F., & Abrantes, N. (2015). Toxicity assessment of aqueous extracts of ash from forest fires. *Catena*, 135. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.06.021>

Smith, H. G., Sheridan, G. J., Lane, P. N. J., Nyman, P., & Haydon, S. (2011). Wildfire effects on water quality in forest catchments: A review with implications for water supply. In *Journal of Hydrology* (Vol. 396, Issues 1–2). <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.10.043>

Soil Survey Staff, 2014. *Keys to Soil Taxonomy*, 11th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, D.C.

SPSS Inc., 2017. *SPSS statistics for Windows*, version 25.0. SPSS Inc., Chicago.

Stoof, C. R., Wesseling, J. G., & Ritsema, C. J. (2010). Effects of fire and ash on soil water retention. *Geoderma*, 159(3–4). <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.08.002>

Úbeda, X., Pereira, P., Outeiro, L., & Martín, D. A. (2009). Effects of fire temperature on the physical and chemical characteristics of the ash from two plots of Cork oak (*Quercus Suber*). *Land Degradation and Development*, 20(6). <https://doi.org/10.1002/ldr.930>

Vega, J. A., Fontúrbel, T., Merino, A., Fernández, C., Ferreiro, A., & Jiménez, E. (2013). Testing the ability of visual indicators of soil burn severity to reflect changes in soil chemical and microbial properties in pine forests and shrubland. *Plant and Soil*, 369(1–2). <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1532-9>

Wanthongchai, K., Bauhus, J., & Goldammer, J. G. (2008). Nutrient losses through prescribed burning of aboveground litter and understorey in dry dipterocarp forests of different fire history. *Catena*, 74(3). <https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.01.003>

World Health Organization. (2008). *Guidelines for drinking-water quality: second addendum*. Vol. 1, Recommendations. World Health Organization.