



ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA
SECCIÓN DE PUENTE, MÁQUINAS Y
RADIOELECTRÓNICA NAVAL

TRABAJO DE FIN DE GRADO

EL OCÉANO GLACIAL ÁRTICO COMO ZONA DE NAVEGACIÓN

GRADO EN NAÚTICA Y TRANSPORTE MARÍTIMO

AUTOR: CARLOS DAVID HERNÁNDEZ DA SILVA

TUTOR: ALEJANDRO GÓMEZ CORREA

SEPTIEMBRE 2020

D. Alejandro Gómez Correa, Profesor de la UD de Ciencias y Técnicas de la Navegación, perteneciente al Departamento de Ingeniería Agraria, Náutica, Civil y Marítima de la Universidad de La Laguna certifica que:

D. Carlos David Hernández Da Silva, ha realizado bajo mi dirección el trabajo fin de grado titulado: EL OCÉANO GLACIAL ÁRTICO COMO ZONA DE NAVEGACIÓN.

Revisado dicho trabajo, estimo reúne los requisitos para ser juzgado por el tribunal que sea designado para su lectura.

Para que conste y surta los efectos oportunos, expido y firmo el presente Certificado.

En Santa Cruz de Tenerife a 15 de septiembre de 2020.

Fdo.: Alejandro Gómez Correa.

Director del trabajo.

Contenido

Contenido	5
Tabla de Ilustraciones.	7
Abreviaturas.	9
Resumen	12
Abstract	12
Introducción	14
Objetivos.....	18
Capítulo I. Qué es el Océano Glacial Ártico.....	20
Capítulo I.I. Definición.	20
Capítulo I.II. Geografía.	20
Capítulo I.III. Batimetría.....	24
Capítulo I.IV. Meteorología y condiciones oceánicas.	25
Capítulo II. Navegación en aguas del Océano Glacial Ártico.	27
Capítulo II.I. Qué interés tiene la navegación por el Ártico.	28
Capítulo II.II. Condiciones de navegación.....	30
Capítulo II.III. Navegación en el Océano Glacial Ártico.	32
Capítulo II.III.a. Cartografía en el Ártico.	32
Capítulo II.III.b. La aguja náutica.	35
Capítulo II.III.c. Navegación satelital.	36
Capítulo II.III.d. Ayudas a la navegación.....	38
Capítulo II.III.e. Comunicaciones.	39
Capítulo II.III.f. Redes SAR.	41
Capítulo II.IV. Legislación al respecto: El Código Polar.....	43
Capítulo II.V. Rutas disponibles para la navegación en aguas del Océano Glacial Ártico.....	48
Capítulo II.V.a. Ruta Transpolar.....	49
Capítulo II.V.b. Ruta del Puente Ártico.	50
Capítulo II.V.c. Paso del Noroeste.	51
Capítulo II.V.d. Ruta Marítima del Norte.	52
Capítulo III. Composición de las ventanas de tiempo para la navegación en aguas del Océano Glacial Ártico.	56

Capítulo III.I. Propiedades físicas del agua de mar y su afección a la fusión de la capa de hielo del Ártico.....	56
Capítulo III.I.a. Condiciones para la formación de hielo en aguas del Océano Glacial Ártico.	58
Capítulo III.I.b. Formación de hielo en el Océano Glacial Ártico.	59
Capítulo III.II. Puntos de referencia en el recorrido de la RMN.	61
Capítulo III.III. Presentación de datos y construcción de la ventana de tiempo.	65
Capítulo III.III.a. El ECMWF.	66
Capítulo III.III.b. Muestras de temperatura.....	66
Conclusiones.....	77
Conclusions.....	78
Bibliografía.....	80

Ilustración 21. Relación de crecimiento de la placa de hielo, en función del espesor. Fuente: https://forum.arctic-sea-ice.net/index.php/topic,119.msg69659.html#msg69659	61
Ilustración 22. Extensiones de la placa de hielo ártica. Fuente: Elaboración propia a partir de http://nsidc.org/arcticseaicenews/sea-ice-comparison-tool/	63
Ilustración 23. Ruta Marítima del Norte y zonas de referencia. Fuente: Elaboración propia.....	64
Ilustración 24. Zonas de referencia en el Océano Glacial Ártico. Fuente: Elaboración propia.....	67
Ilustración 25. Temperatura y Tendencia de la Zona 1. Fuente: Elaboración propia.	68
Ilustración 26. Temperatura y Tendencia de la Zona 2. Fuente: Elaboración propia.	69
Ilustración 27. Temperatura y Tendencia de la Zona 3. Fuente: Elaboración propia.	70
Ilustración 28. Temperatura y Tendencia de la Zona 4. Fuente: Elaboración propia.	71
Ilustración 29. Extensiones de la placa de hielo ártica. Fuente: Elaboración propia a partir de http://nsidc.org/arcticseaicenews/sea-ice-comparison-tool/	72
Ilustración 30. Extensiones de la placa de hielo ártica. Fuente: Elaboración propia a partir de http://nsidc.org/arcticseaicenews/sea-ice-comparison-tool/	72
Ilustración 31. Temperatura y Tendencia en el Estrecho de Kara. Fuente: Elaboración propia.	73
Ilustración 32. Temperatura y Tendencia en el Mar de Láptev. Fuente: Elaboración propia.	73
Ilustración 33. Temperatura y Tendencia en las Islas de Nueva Siberia. Fuente: Elaboración propia.....	74
Ilustración 34. Temperatura y Tendencia en el Estrecho de Vilkitsky. Fuente: Elaboración propia.	74

Abreviaturas.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (Internacional).

UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change (Internacional).

UNEP – United Nations Environment Programme (Internacional).

NSIDC – National Snow & Ice Data Center (Estados Unidos).

USNIC – United States National Ice Center (Estados Unidos).

DMI – Danish Meteorological Institute (Dinamarca).

NMI – Norwegian Ice Service (Noruega).

NASA – National Aeronautical and Space Administration (Estados Unidos).

GPS – Global Positioning System (Sistema de Posicionamiento Global).

DGPS – Differential Global Positioning System (Sistema de Posicionamiento Global Diferencial).

INMARSAT – International MARitime SATellite organization (Organización Internacional de Satélites Marítimos) (Internacional).

RMN (NSR) – Northern Maritime Route (Ruta Marítima del Norte).

PNO (NWP) – Northwest Passage (Paso del Noroeste).

RPA (ABR) – Arctic Bridge (Puente Ártico).

RT (TSR) – Transpolar Sea Route (Ruta Transpolar).

MEO – Medium Earth Orbit (Órbita Terrestre Media).

GLONASS – GLObal NAvigation Satellite System (Sistema Global de Navegación por Satélite).

EGNOS – European Geostationary Navigation Overlay Service.

WAAS – Wide Area Augmentation System.

LORAN – Long RANge Navigation (Navegación de Largo Alcance).

AtoN – Aids to Navigation (Ayudas a la Navegación).

VAtoN – Virtual Aids to Navigation (Ayudas Virtuales a la Navegación).

IALA – International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouses Authorities (Asociación Internacional de Ayudas a la Navegación Marítima y Faros) (Internacional).

SSM – Servicios Satelitales Móviles.

SAR – Search and Rescue (Búsqueda y Rescate).

COSPAS-SARSAT – Sistema Espacial para la Búsqueda de Buques en Peligro (COSPAS) Search And Rescue Satellite-Aided Tracking (Seguimiento Asistido por Satélite de Búsqueda y Rescate).

OMI – Organización Marítima Internacional (Internacional).

SOLA – Safety Of Life At Sea (Convenio Internacional para la Seguridad de la Vida en el Mar).

MARPOL – International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (Convenio Internacional para Prevenir la Contaminación por los Buques).

JRCC – Joint Rescue Coordination Centre (Centro Coordinador de Salvamento Conjunto, a parte de las labores SAR del ámbito marítimo también tiene competencias en las del ámbito aeronáutico).

MRCC – Marine Rescue Coordination Centre (Centro de Coordinación del Rescate Marítimo).

MRSC – Marine Rescue Sub-Centre (Sub Centro de Rescate Marítimo).

IAMSAR – International Aeronautic and Maritime Search and Rescue manual (Manual Internacional de Búsqueda y Salvamento Aeronáutico y Marítimo) (Internacional).

ECMWF – European Centre for Medium-Range Weather Forecast (Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio) (Internacional).

Resumen

En este Trabajo de Final de Grado para el Grado en Náutica y Transporte Marítimo nos aproximaremos a la navegación a través de las gélidas aguas del Océano Glacial Ártico y, más concretamente, a la ventana de tiempo disponible para la navegación en dicha región.

Para ello, introduciremos y acotaremos las zonas de estudio, presentaremos los datos necesarios para ello (registros de las temperaturas oceánicas superficiales) y estableceremos el periodo en que la navegación es viable debido a la desaparición de la placa de hielo.

Además, trataremos de predecir (o, más bien especular sobre) el comportamiento de las temperaturas a posteriori, de forma que se puedan aproximar los plazos en que se podrán navegar dichas aguas en los próximos años.

Abstract

In this Final Degree Project for the Degree in Nautical and Maritime Transport we'll approach to navigation through the Arctic Glacial Ocean and, specifically, the period of time in which it's navigable.

To do this, we'll introduce and narrow down the necessary knowledge, present the data (records of surface ocean temperatures) and define the period in which navigation will be viable due to ice sheet melting.

In addition, we'll try to predict (or, rather, speculate about) the behavior of the temperatures in a near future so that the terms in which these waters will be able to be navigated can be approximated in the coming years.

Introducción

Las regiones marítimas del Ártico han estado siempre rodeadas por un halo de misterio que ha atraído la mirada de numerosos marinos y expediciones comerciales a lo largo de la historia. La carrera por explorarlo y encontrar pasos seguros que permitiesen el comercio directo entre los lucrativos puertos del Sudeste Asiático y Europa se remonta al siglo XVI, cuando Hugh Willoughby y Richard Chancellor llevaron a cabo las primeras expediciones en busca del Paso del Noreste (también conocido como Ruta Marítima el Norte), pereciendo Willoughby en el intento al quedar sus barcos atrapados en el hielo. Sin embargo, Chancellor sobrevivió y llegó hasta el Mar Blanco, donde contactó con la Rusia de Iván IV “el Terrible” iniciando la primera ruta comercial entre Inglaterra y Rusia, y más importante aún, la primera de la historia a través del Mar de Barents y, por tanto, de aguas del Ártico. [1] [2] [3]

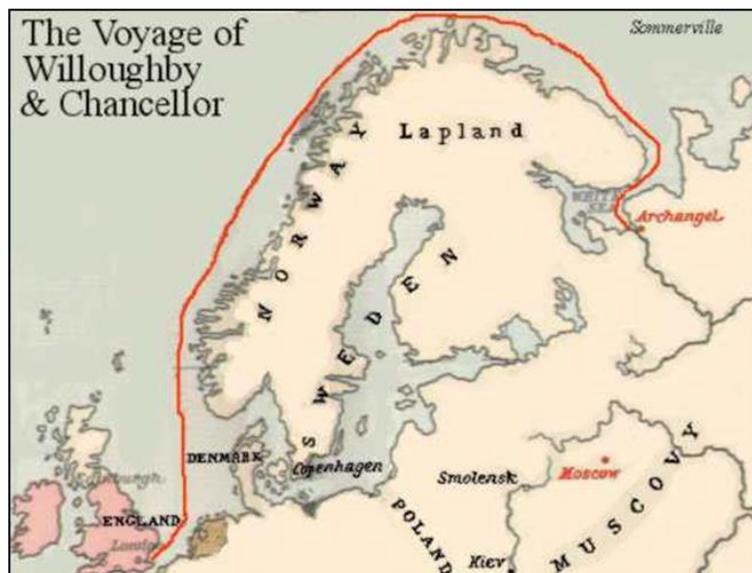


Ilustración 1. Viaje de Willoughby y Chancellor. Fuente: <https://www.timewisetraveller.co.uk/chancellor.html>

La búsqueda de estas rutas fue infructuosa hasta tiempos cercanos al presente, pues la persistente placa de hielo que cubre el Ártico, a pesar de la variación que sufre en extensión y grosor de forma estacional, dificulta enormemente la navegación entre los océanos Atlántico y el Pacífico por esta vía.

Es en 1648 cuando Semyon Dezhnev y Fedot Alekseyeb Popov descubren accidentalmente el Estrecho de Bering, demostrando así que Asia no está conectada directamente a América del Norte por tierra firme y, aún más importante, descubrieron la conexión entre el Océano Atlántico y el Océano Pacífico a través del Ártico. Aunque

la falta de documentación al respecto y la imposibilidad por parte de otros marinos de repetir la ruta utilizada por Dezhnev y Popov llevan a que el Estrecho de Bering no se considere de forma oficial y fiable hasta 1728, año en que Vitus Bering, un navegante danés al servicio de Rusia, redescubre el Estrecho y mejora y aumenta los conocimientos geográficos sobre la zona. [4] [5] [6] [7]



Ilustración 2. Expedición de Dezhnev, primera en llegar al Estrecho de Bering. Fuente: <https://twitter.com/embassyofrussia/status/1012250839111622656>

Si damos un pequeño salto en el tiempo hasta el año 1896 encontramos que algunos científicos comienzan a teorizar sobre el impacto de las emisiones de CO₂ por parte de la humanidad con el posible aumento de la temperatura superficial del planeta, como es el caso del físico y químico sueco Svante August Arrhenius, aunque dados los bajos niveles de este gas de efecto invernadero en esos años Arrhenius estimaba que tales aumentos de temperatura tardarían miles de años en ser tangibles. [8] [9]

Con los avances científicos y las mejoras en los equipos necesarios para cuantificar el aumento de las emisiones de CO₂, así como el descubrimiento de otros gases (también emitidos por la actividad humana en cantidades notables) como pueden ser los Clorofluorocarbonos (CFC) o el metano, la comunidad científica internacional inicia la investigación y debate sobre el hipotético cambio climático antropogénico durante los años 50, 60 y 70. Ya en la década de los 80 existía un consenso claro alrededor del

mundo: Las temperaturas aumentan en lo que podemos llamar, sin lugar a dudas, un calentamiento global antropogénico.

Además, se originan diferentes organismos (como IPCC, UNFCCC o UNEP, entre otros) dedicados al estudio de este fenómeno y su seguimiento, dado el calado que tiene en el futuro, ya no solo del planeta, sino de la supervivencia de la humanidad.

Y esto nos devuelve a las “ya no tan” frías aguas del Ártico, objeto de estudio y posible navegación de este TFG, pues una de las consecuencias más relevantes del proceso de calentamiento global es, precisamente, la fusión y pérdida de extensión de la banquisa de hielo que se forman en el Océano Glacial Ártico durante el invierno y permanece durante el resto de estaciones. Según datos del NSIDC, USNIC, DMI o NMI la banquisa de hielo Ártica ha perdido extensión media anual de forma imparable desde que se tienen registros y esto deja al descubierto durante periodos cada vez mayores de tiempo muchas zonas del Océano Glacial Ártico antes imposibles de transitar por la vía marítima sin ayuda de buques rompehielos, lo que nos permitirá a estimar la ventana de tiempo y las rutas navegables a través del Ártico, acortando así de forma definitiva las rutas entre los importantes puertos de Asia y los de Europa. [10] [11] [12] [13] [14] [15] [16]

Objetivos.

En el presente Trabajo de Final de Grado me dispongo a estudiar las posibles rutas de navegación en aguas del Océano Glacial Ártico, así como los periodos de tiempo en que estas estarían disponibles para la navegación sin necesidad de apoyo por parte de buques especializados en navegación polar.

Dada la actualidad de este tema se valorarán además otros puntos, como son:

- Medios necesarios y métodos que se emplean en la navegación en aguas del Ártico.
- Impacto de la actividad del ser humano en la placa del Ártico.
- Ventajas y desventajas de las rutas Árticas respecto a las convencionales.
- Evolución de la ventana de tiempo en el futuro próximo.

De esta forma cumpliremos, no solo el objetivo principal (obtener la ventana de tiempo y aventurarnos a especular sobre su futuro), sino además establecer un marco a través del cual poder valorar todos los factores asociados a la navegación en aguas del Océano Glacial Ártico.

Capítulo I. Qué es el Océano Glacial Ártico.

A la hora de poder estudiar las rutas de navegación que se sirven de las aguas del Ártico como lugar de paso debemos, obligatoriamente, detenernos y establecer qué es el Océano Glacial Ártico (u Océano Ártico). De esta forma, estableceremos un marco en el que contextualizar todos los datos e información que se irán aportando en adelante, así como que se hayan podido aportar durante el apartado Introducción.

Para poder definir el Ártico, al ser un enclave geográfico, deberemos atender algunas de sus características principales, como pueden ser la zona geográfica en que se encuentra, las características del terreno o la climatología de la región.

Capítulo I.I. Definición.

Comenzando por la definición de Océano Glacial Ártico, se define como el océano que se ubica en las inmediaciones del Polo Norte geográfico, siendo el más pequeño de los océanos terrestres y, por supuesto, el más septentrional de ellos.

Capítulo I.II. Geografía.

El Océano Glacial Ártico se encuentra, como hemos dicho, en la región circundante al Polo Norte geográfico de nuestro planeta. Aproximadamente, al norte del Círculo Polar Ártico, paralelo situado en latitud 66°33'46" N.

Se establece el Círculo Polar Ártico en esta latitud (al igual que el Círculo Polar Antártico, su contraparte en el hemisferio Sur, ubicado en 66°33'46" S) por ser el punto al norte del cual, al menos una vez al año, el Sol permanece visible durante 24 horas seguidas. De la misma manera, al norte del Círculo Polar Ártico hay al menos un día al año en que el Sol no supera el horizonte. Todo esto tiene su explicación en la inclinación del eje de nuestro planeta, que se puede obtener del ángulo entre el Ecuador y el plano de la eclíptica (aproximadamente 23°26', pues varía por el movimiento de nutación del nuestro planeta). [17] [18] [19]

parte del archipiélago ártico canadiense) o Devon (territorio de Canadá, siendo la mayor isla deshabitada del planeta). [20] [21] [22] [23] [24]

El Océano Glacial Ártico, además de estar conectado con los Océanos Pacífico a través del Mar de Bering (en el Estrecho de Bering, punto de mayor cercanía entre Norteamérica y Asia) y el Océano Atlántico (en el Mar de Labrador y el Mar de Groenlandia), se subdivide en varios mares tributarios del mismo, y que deberemos conocer de cara a trazar las rutas de navegación disponibles en la zona a la hora de estudiar las ventanas de tiempo. Entre dichos mares podemos señalar como más importantes:

- Mar de Chukotka
- Mar de Siberia Oriental
- Mar Láptev
- Mar Kara
- Mar de Barents
- Mar de Groenlandia
- Mar Blanco
- Bahía de Baffin
- Estrecho de Hudson
- Bahía de Hudson
- Mar de Beaufort
- Además, y aunque no pertenecen al Océano Glacial Ártico, también veremos dónde se sitúan los siguientes lugares:
- Mar de Noruega
- Mar del Norte
- Mar de Labrador
- Estrecho de Davis
- Mar de Bering

A continuación, y para poder situarlos y tener una visión general de la posición de todos estos puntos, los veremos representados gráficamente.

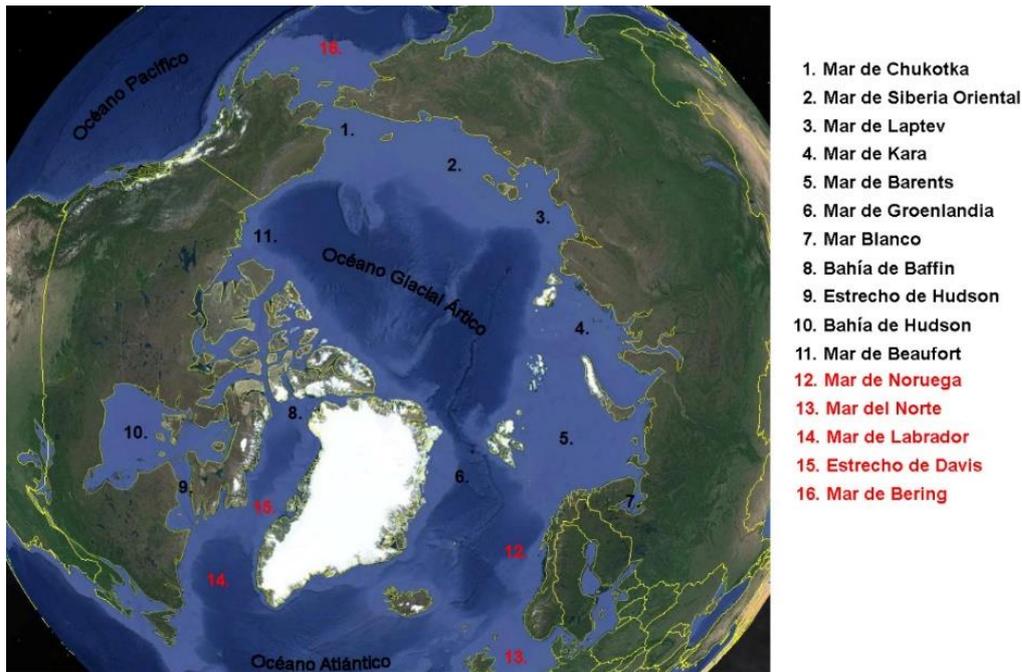


Ilustración 4. Regiones del Océano Glacial Ártico. Fuente: Elaboración propia.

Por último, y como se mencionó anteriormente, el Océano Glacial Ártico está cubierto por una placa de hielo con variaciones estacionales en su extensión. Esta se puede dividir en dos partes, siendo una de ellas la parte de hielo más cercana al Polo Norte geográfico y que permanece congelada durante todo el año, y por otra parte está la parte de la capa de hielo que varía estacionalmente. Su espesor es variable pues, aunque alcanza entre 3 y 4 metros de espesor en grandes extensiones, puede llegar a los 20 metros de espesor en algunas crestas formadas por la rotura y amontonamiento de la placa. En las zonas más meridionales, en las afueras de la banquisa (si tomamos como centro el Polo Norte) el hielo tendrá espesores mucho menores (menores al metro e, incluso, unos pocos centímetros) y llegando a desaparecer durante los meses más cálidos en el ártico (entre junio y agosto, ambos meses incluidos), mientras que en los meses más fríos (de septiembre a mayo) la banquisa se extiende hasta alcanzar sus máximas extensiones, cubriendo la gran mayoría del Océano Glacial Ártico y alcanzando las costas de Norteamérica y Asia. [25] [26] [27]

Cabe destacar que la extensión de la plataforma de hielo del Ártico decrece rápidamente año tras año debido al calentamiento global. Por una parte, se puede ver en el rápido aumento de las temperaturas medias obtenidas de las mediciones en la región, que en datos del Goddard Institute for Space Studies de la NASA y del NSIDC han aumentado más de 4°C en el periodo comprendido entre 1960 y 2019. Por otra parte, los registros en la extensión de la placa de hielo del Ártico entre el año 1979 y el 2019, también dados

por el NSIDC, muestran una pérdida en la extensión media tanto en invierno como en verano, algo que se ve fácilmente en la disminución de la placa en invierno de 16.588 km² (Marzo de 1979) a 14.971 km² (Marzo de 2012) o 6.936 km² (Septiembre de 1979) a 3.506 km² (Septiembre de 2012). Esto supone pérdidas de miles de millones de toneladas de hielo en un periodo de 40 años y una tendencia negativa en la evolución de la extensión de la banquisa de hielo del Océano Glacial Ártico. [28] [29]

Pero, por otra parte, abre la posibilidad de navegar a través de aguas del Ártico durante periodos de tiempo cada vez mayores, como podremos ver más adelante. Esto no solo supondrá una reducción drástica en la distancia de las rutas comerciales entre Asia y Europa/Norteamérica, sino además un menor volumen de emisiones por parte de la flota mercante que transite por estas aguas, algo que no solo aumentará la eficiencia y velocidad de las comunicaciones marítimas con Oriente, sino que también disminuirá su impacto ambiental.

Capítulo I.III. Batimetría.

La batimetría del Océano Glacial Ártico se muestra bastante variable. Tiene una profundidad media de 1.205 metros, con su máxima en el Abismo de Molloy, que llega a los 5.607 metros bajo la superficie. La batimetría del fondo oceánico de la región se caracteriza por la presencia de dorsales de fallas, llanuras abisales extensas y cuencas, además, los materiales mayoritarios son los agregados de arena y grava, con presencia de placeres. Además, el fondo es rico en depósitos de minerales (nódulos polimetálicos, mayoritariamente) y campos de petróleo y gas natural. Esto último convierte las aguas del Ártico en un lugar de interés para muchos países y empresas, además de una de las zonas con más probabilidades de albergar conflictos políticos y bélicos en caso de deshielo total. [30] [31] [32] [33]

Es característica la presencia de plataforma continental en una gran parte del fondo oceánico, ocupando esta entre la mitad un tercio del mismo. El norte de la placa de Eurasia se adentra hasta 800 km en la zona del Mar de Siberia Oriental y hace del norte de Asia y Europa una zona de bajas profundidades, donde el Mar de Láptev tiene las menores (entre 10 y 40 metros). Esto hace del Océano Ártico la masa oceánica con mayor presencia de plataforma continental bajo su superficie.

Además de la plataforma continental, el Océano Glacial Ártico se ubica sobre una zona de cuencas y dorsales oceánicas, situadas en torno a la zona central del Océano Glacial Ártico. Estas cuencas son la Euroasiática (con entre 4.000 y 4.500 metros de

profundidad, es donde se sitúa el Abismo de Molloy) y la Asiático-Americana (en torno a 4.000 metros, también llamada Norteamericana). Ambas están separadas por la dorsal de Lomonósov, y a su vez se dividen en dos de la siguiente forma:

La cuenca Euroasiática se divide en la cuenca de Nansen y la cuenca del Fram por la dorsal de Gakkel, que la atraviesa.

La cuenca asiático-Norteamericana se divide en la cuenca canadiense y la cuenca de Makarov por el paso de la dorsal Alpha.

Esto deja la orografía del fondo oceánico de la siguiente forma:



Ilustración 5. Relieve submarino de la cuenca del Océano Glacial Ártico. Fuente: Elaboración propia.

Capítulo I.IV. Meteorología y condiciones oceánicas.

Para concluir con este capítulo introductorio sobre el Océano Glacial Ártico debemos hablar de la meteorología en el ártico y sus condiciones marítimas, datos de vital importancia a la hora de navegar por las rutas disponibles en esta región.

Al contrario que en otras zonas de nuestro planeta en las que podemos encontrar hasta 4 estaciones repartidas a lo largo del año, las regiones circundantes a cualquiera de los Polos de nuestro planeta se caracterizan por la presencia de tan solo dos estaciones, verano e invierno. Se podría considerar, dado el reparto de las horas de luz a lo largo del año en el Océano Ártico, que el verano tiene lugar durante la parte del año en que el Sol es visible y la región se encuentra iluminada, mientras que el invierno se da en los meses de oscuridad absoluta. El periodo nocturno comienza en torno al 22 de

septiembre, durante el equinoccio de otoño, momento en que marca en el hemisferio norte la entrada en el otoño y la disminución progresiva de las horas de luz solar hasta el solsticio de invierno, día con la noche más larga en el hemisferio norte. Esta noche terminará y dará paso al periodo diurno en torno al 20 de marzo, durante el equinoccio de primavera.

Es importante tener en cuenta que, debido al clima polar que caracteriza esta zona del mundo, la variación térmica a lo largo de las diferentes jornadas es realmente estrecha, existiendo poca variación térmica entre días de la misma época del año. Sin embargo, la diferencia de temperaturas entre estaciones (poniendo, por ejemplo, la media de los meses más fríos y la media de los meses más cálidos) es bastante reseñable, sobrepasando fácilmente los 15°C de diferencia entre verano e invierno. [34] [35]

GHCN V4 adj - homogenized

Polar Gmo Imetkrenkelj (80.6000N, 58.0000E) RSM00020046					Station Nord (81.6000N, 16.6497W) GLE00147401				
YEAR	D-J-F	M-A-M	J-J-A	S-O-N	YEAR	D-J-F	M-A-M	J-J-A	S-O-N
2000	-20.29	-15.73	0.39	-7.34	2000	-28.77	-20.17	1.80	-18.30
2001	-17.82	-18.35	0.10	999.90	2001	-28.19	-22.27	3.03	-15.40
2002	999.90	999.90	999.90	999.90	2002	-27.37	-20.73	3.77	-12.87
2003	999.90	999.90	999.90	999.90	2003	-27.00	-20.57	4.76	999.90
2004	999.90	999.90	999.90	999.90	2004	999.90	999.90	999.90	999.90
2005	-14.27	-18.29	0.14	-9.67	2005	999.90	999.90	999.90	-16.36
2006	-13.73	-13.87	-0.25	-8.20	2006	-25.10	-17.13	1.37	-15.37
2007	-18.70	-12.48	-0.13	-6.52	2007	-28.07	999.90	999.90	-15.67
2008	-19.03	-17.09	-0.24	-7.47	2008	-27.40	-20.97	3.80	-14.60
2009	-18.67	-18.20	-0.04	-3.60	2009	-26.10	-19.54	2.47	-15.20

Ilustración 6. Temperaturas medias por trimestres en dos estaciones del Océano Glacial Ártico. Fuente: Elaboración propia.

Cabe destacar la diferencia en la meteorología en el Ártico dependiendo de la época, pues mientras que el invierno (bajo la oscuridad continua) se caracteriza por las condiciones de frío y estabilidad atmosférica, con cielos despejados, durante los veranos (durante el día continuo) son comunes las condiciones de humedad y niebla, con abundantes precipitaciones en forma de nieve y ciclones débiles con lluvia y nieve. Esto hace de la meteorología durante los meses de invierno la adecuada para la navegación, pues asegura mar en calma y condiciones estables, mientras que durante el verano las condiciones prometen oleaje (que, además, se forma aún más fácilmente debido al retroceso de la capa de hielo y formación de aguas abiertas, sometidas al viento de esta época del año) y malas condiciones para la navegación.

Esto supone una desventaja a la hora de navegar en aguas del Océano Glacial Ártico, pues, aunque las condiciones idóneas para la navegación serían durante el invierno, es durante el verano cuando la capa de hielo ha retrocedido lo suficiente para liberar las rutas de navegación a través de estas aguas.

Capítulo II. Navegación en aguas del Océano Glacial Ártico.

Habiendo situado la zona de estudio, es hora de aproximarnos a una de las cuestiones más básicas que el planteamiento de este trabajo suscita: ¿Por qué puede interesar a la flota mercante recorrer las aguas del Océano Glacial Ártico, teniendo en cuenta los riesgos que conlleva?

A lo largo de este Capítulo daremos respuesta a esta importante cuestión, pues depende de la correcta exposición de esta idea que el resto del trabajo tenga un mínimo sentido o interés.

Además de esto, las regiones de nuestro planeta más cercanas a los Polos Norte y Sur traen consigo, debido a las latitudes extremas, una serie de inconvenientes desde el punto de vista técnico que deben ser tenidos en cuenta a la hora de preparar la navegación por el Ártico. Estas dificultades van desde el tipo de cartas a emplear en dichas zonas, diferentes a las utilizadas en latitudes menores más cercanas al Ecuador (dada la ineficacia de la proyección Mercator en latitudes extremas, por la deformación a la que somete las dimensiones de dichos lugares), hasta la necesidad de instalar a bordo equipos de navegación radioelectrónica, comunicaciones o seguridad diferentes de los empleados en latitudes inferiores, puesto que las redes de satélites necesarias para la navegación oceánica (por ejemplo, INMARSAT o GPS) disponibles en zonas ecuatoriales o cercanas a este no dan cobertura óptima a lugares cercanos a los Polos, debido a la curvatura terrestre. [36]

También es importante estudiar la legislación que pudiese afectar a la navegación en aguas del Océano Glacial Ártico, puesto que la región ártica es un enclave sujeto a numerosos tratados dado el interés que despierta en la comunidad internacional por los recursos vírgenes que alberga, así como el interés geoestratégico producto de la confluencia de países tan diversos como Rusia, Estados Unidos o Noruega (parte de la Unión Europea, al igual que Islandia, también presente en el Ártico) en esta región del mundo, existiendo por tanto presencia de 3 de los mayores bloques económicos, políticos y militares del mundo. Por último, no podemos olvidar el interés de la comunidad internacional desde el punto de vista climático, pues el Ártico está siendo una de las zonas más afectadas (por los cambios en su meteorología y geografía) debido al calentamiento global y su consecuente cambio climático. Además, los cambios producidos en esta zona afectarán a regiones distantes del mundo, pues el Ártico actúa como agente regulador del clima global, pues son parte del “sistema de refrigeración” del planeta dado el albedo de la placa de hielo, que refleja gran parte de la radiación

solar entrante. Sin hielo, con el océano al descubierto, se absorbería más radiación solar y elevaría la temperatura, fundiendo más rápido el hielo. Esto alteraría la salinidad del agua, lo que influiría o incluso alteraría las corrientes marinas a escala global, provocando daños aún mayores a escala planetaria. [37] [38]

Finalmente, veremos qué rutas existen para transitar el Océano Glacial Ártico, así como los puntos de interés (puertos, por ejemplo) para la flota mercante a lo largo de sus costas. De esta forma, todo quedará preparado para la presentación y análisis de los datos que nos servirán para construir la ventana de tiempo disponible para la navegación por el Ártico.

Capítulo II.I. Qué interés tiene la navegación por el Ártico.

Esta cuestión de capital importancia tiene, por supuesto, su propio desglose y análisis propio. La principal consideración de las rutas del Ártico (que, más tarde, veremos en detalle), siendo estas la Ruta Marítima del Norte (también llamada Paso del Noreste o RMN, NSR en inglés) y el Paso del Noroeste, como alternativas a las rutas marítimas tradicionales entre Asia y Europa o Norteamérica vienen, principalmente, del significativo ahorro de distancia entre estas dos zonas de alto valor económico. Este ahorro de distancia implica un menor costo en combustible, pertrechos y gastos en tripulaciones, algo que es importante desde el punto de vista de armadores y navieras de todo el mundo. [39] [40]

Por otra parte, un menor consumo es, a su vez, una cantidad menor de emisiones de gases de efecto invernadero y contaminantes. Esto convierte el impacto ambiental de la Ruta Marítima del Norte, por ejemplo, en mucho menor que las rutas de navegación entre puertos asiáticos y europeos a través del canal de Suez.

De cualquier forma, es importante tener en cuenta que las rutas marítimas a través de las aguas del Océano Glacial Ártico no son siempre las más cortas, poniendo como ejemplo la Ruta Marítima del Norte (que rodea la costa norte de Europa y Siberia hasta el Estrecho de Bering), esta sólo recorta distancia entre los puertos de Europa y Asia cuando tratamos con puertos al norte del Canal de la Mancha y al norte de Shanghái. En caso contrario, para puertos del sur de Europa con puertos del sudeste asiático sigue siendo preferible la ruta a través del Canal de Suez. [41] [42]

Pero en los casos favorables, por ejemplo, uniendo el puerto de Róterdam (14.800.000 TEUs en 2019) con puertos como Shanghái (43.303.000 TEUs en 2019), Busan (21.910.000 TEUs en 2019) o Tokio (4.000.000 TEUs en 2019) y utilizando la Ruta

Marítima del Norte se pueden llegar a recortar distancias de alrededor de 900 nm respecto a la ruta a través del Canal de Suez.

Un ejemplo de esto podemos verlo en la siguiente tabla, donde podremos apreciar la diferencia de distancias entre ambas rutas para algunos de los puertos asiáticos más importantes haciendo ruta hacia el puerto de Róterdam. [43] [44]

Con Róterdam como destino (en nm)				
Origen	Cabo de Buena Esperanza	Canal de Suez	Ruta Marítima del Norte (RMN)	Diferencia de distancia entre Suez y RMN
Shanghái	14.448	11.133	7.010	37
Hong Kong	14.084	10.744	7.667	29
Busan	13.796	10.557	8.046	24
Tokio	13.014	9.701	8.594	11
Saigón	12.258	8.887	9.428	-6

Ilustración 7. Comparación de rutas y ahorro de distancias. Fuente: Elaboración propia.

Así, utilizando la Ruta Marítima del Norte obtenemos ahorros de distancia de hasta el 37% (4.123 nm) al unir dos de los puertos más importantes del mundo como son Róterdam y Shanghái.

Por otra parte, debemos tener en cuenta la seguridad que la RMN ofrece debido a la zona que transita. Mientras que la ruta por el Canal de Suez implica parte de su recorrido por aguas comprometidas, como pueden ser las inmediaciones del Cuerno de África o la Península de Arabia (zonas de inestabilidad política y conflictividad desde el punto de vista bélico, además de los actos de piratería). Esto supone también un potencial riesgo para las tripulaciones y cargas de los buques que opten por esta ruta.

Ejemplo de esto son los intentos de asalto por parte de piratas a los buques atuneros “Txori Argi”, de bandera española, y el “Adria”, de bandera surcoreana en 2019, el secuestro del petrolero “Aris 13” en 2017, los secuestros de petroleros por parte de Irán durante el año 2019 o la Guerra Civil Yemení, activa desde 2015 y con la intervención militar de Arabia Saudí, por no hablar del precedente histórico de posibles cierres del Canal de Suez (que fue uno de los desencadenantes de la construcción de grandes superpetroleros, como el Esso Northumbria). [45] [46] [47] [48] [49] [50]

Mientras tanto, la RMN discurre mayoritariamente ante costas de Rusia y Noruega, regiones estables sin prácticamente población ni actividad, libre de conflictos y, por

supuesto, actividades piratas. Por otra parte, se debe tener en cuenta que Rusia considera las aguas de la RMN que se encuentran sobre la plataforma continental de Siberia como aguas propias, lo que conlleva el tener solicitudes de permisos, pagos de tasas y demás trámites burocráticos con los organismos dedicados a la gestión de la navegación en aguas de Rusia. Por ello, podríamos decir que (obviando los trámites y tasas necesarios, que además pueden conllevar aumento del tiempo en que se realiza la ruta) no solo pasa a ser una mejor ruta en cuanto a distancias a recorrer, sino en cuanto a seguridad de la navegación en caso de que la ruta esté libre de hielos.

Capítulo II.II. Condiciones de navegación.

Tal y como introdujimos en el Capítulo I.IV., en el Océano Glacial Ártico la meteorología y condiciones de la mar son completamente dependientes de la época del año en que nos encontremos, pues la extensión de la placa de hielo y las radiaciones solares entrantes son los factores determinantes en esta región.

Así, durante la noche en el Ártico, las condiciones serán óptimas para la navegación desde el punto de vista meteorológico (estabilidad atmosférica general, cielos mayormente despejados) mientras que las aguas del Océano Glacial Ártico se tornan impracticables dada la presencia de una capa de hielo lo suficientemente gruesa como para impedir el tránsito de los buques. Por el contrario, durante los meses de luz solar esto es prácticamente al revés, permitiendo el paso de los buques debido a la fusión y adelgazamiento de la placa, pero siendo habitual el mal tiempo.

Puesto que asumimos que es imposible navegar aguas del Ártico durante el invierno, deberemos atender a las condiciones de navegación más habituales o probables durante los meses en que las aguas del Océano Glacial Ártico son navegables.

Se considera que el Océano Glacial Ártico es navegable a través de la Ruta Marítima del Norte durante los meses de verano ártico, siendo estos junio, julio, agosto y parte de septiembre, que es cuando la placa de hielo ha retrocedido y gran parte de la RMN queda en forma de aguas abiertas, aunque depende de la zona a la que nos refiramos esto varía, puesto que hay zonas que por la influencia del clima continental y el flujo de agua más caliente desde las desembocaduras de Siberia lo que acelera la fusión del hielo mientras que otras, lejos de este factor, tardan más en quedar libres. Pero podemos considerar que es posible navegar desde Europa hasta Asia, de forma segura y con aguas libres de hielo (o con capas lo suficientemente delgadas como para ser navegables), durante los meses de julio, agosto y septiembre. [51] [52] [53]

Suponiendo el caso de que la ruta esté completamente despejada, las condiciones de navegación durante el verano ártico se caracterizan por la presencia de bancos de niebla y bruma espesa, producto de la diferencia de temperatura entre la superficie oceánica y el aire sumado a la humedad ambiental. La inestabilidad vertical que se produce, además, propicia la formación de borrascas y tormentas con su consecuente oleaje y viento. Al contrario que en aguas del Océano Glacial Antártico (situado alrededor de la Antártida, en el Polo Sur de nuestro planeta) que cuenta con una gran superficie de aguas libres entre la Antártida y la placa de hielo hasta las zonas continentales septentrionales (Sudamérica, África y Australia) donde las borrascas y tormentas formadas por las inestabilidades verticales (producto de la diferencia de temperatura entre el aire y el hielo) tienen vía libre para crecer y provocar olas de gran altura, el Océano Glacial Ártico se encuentra plagado de islas, zonas de baja profundidad, hielo y masas continentales que impiden que el viento pueda azotar grandes zonas de superficie al descubierto y generar grandes olas. [54]

Otro factor muy importante a tener en cuenta a la hora de navegar a través de las aguas del Océano Glacial Ártico durante los meses de verano son las precipitaciones, abundantes durante esta época del año. Los buques, una vez preparados para ello, no suelen tener problemas enfrentando precipitaciones en forma de lluvia al navegar por zonas con mal tiempo a menores latitudes. Pero las precipitaciones del Ártico no son siempre lluvia (que fácilmente desembarcaría a través de imbornales), pues en muchas ocasiones nieva o graniza. Esto supone un problema a la hora de enfrentar dichas precipitaciones pues la nieve y el granizo, a bajas temperaturas y con humedad ambiental, tienden a acumularse y apelmazarse en la cubierta, magistral... Y esto puede llevar a problemas de estabilidad en caso de precipitaciones persistentes si no se mantiene una rutina de limpieza de las diferentes áreas o toman medidas para evitar la acumulación de nieve o granizo.

Aunque, como todo lo que tenga que ver con la región ártica, esto está cambiando rápidamente producto del calentamiento global y el cambio climático. Con la fusión de gran parte de la capa de hielo y su pérdida de extensión mínima y máxima, el viento tiene cada vez mayores superficies de aguas libres que, al ser azotadas por este, dan lugar a cada vez mayores olas. Además, estos cambios también provocarán en un futuro, sumado el aumento de las temperaturas en la región, mayores precipitaciones debido a la formación, de forma más habitual, de borrascas y tormentas en estas latitudes. Por ello, de cara a la utilización de las rutas árticas, las tripulaciones de los buques que por allí naveguen deberán ir preparados y tomar todas las medidas de

seguridad y prevención adecuadas para hacer frente a las condiciones de navegación del duro y exigente Océano Glacial Ártico. [55] [56] [57] [58]

Capítulo II.III. Navegación en el Océano Glacial Ártico.

Como habíamos adelantado anteriormente, el Océano Glacial Ártico es, dada su latitud extrema, un lugar que da ciertos problemas a la hora de aplicar los métodos convencionales de navegación, ya sean cartas, radioelectrónica, comunicaciones, etc.

En vista de los muchos problemas que surgen de cara a lo más importante de la navegación en el Ártico, que es la navegación propiamente dicha, vamos a hacer un pequeño recorrido por los puntos, a juicio de quien redacta este trabajo, más importantes. Estos son:

- Cartografía en el Ártico
- Aguja náutica
- Navegación satelital
- Ayudas a la navegación
- Comunicaciones
- Redes SAR

De esta forma obtendremos, sumado a lo que ya hemos visto sobre la navegación a través del Océano Glacial Ártico, una visión más general en la que sostener una futura conclusión sobre la viabilidad de esta zona de navegación.

Capítulo II.III.a. Cartografía en el Ártico.

Al principio de este Capítulo II comentábamos el problema de las cartas náuticas convencionales, que se basan en la proyección Mercator concretamente en la proyección UTM, Universal Transverse Mercator, que en lugar de ser tangente al Ecuador se representa siendo secante a un meridiano de referencia) para representar la cartografía de las regiones de nuestro planeta más cercanas a los polos. La distorsión que provoca tal proyección sobre el plano hace que no sean fiables en lo que a escalas y dimensiones se refiere.

El problema de la proyección Mercator con las latitudes extremas se debe, precisamente, a su planteamiento: Es una representación cilíndrica en la que se mantiene paralelos el eje terrestre con el eje del cilindro. Así, la deformación solo es

mínima en las regiones cercanas al Ecuador mientras que crece y hace inservible este tipo de proyección al movernos hacia el Norte o el Sur.

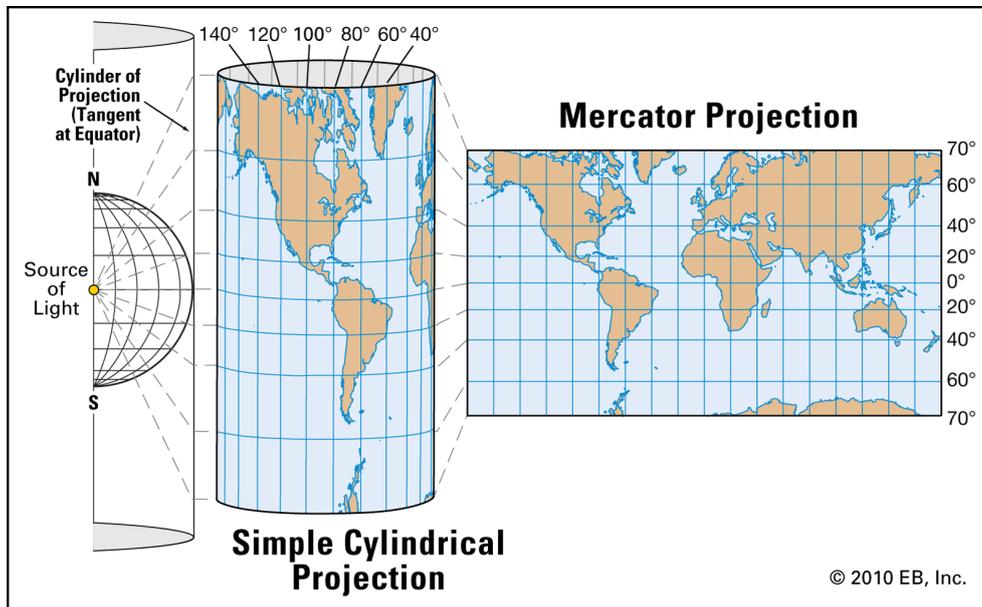


Ilustración 8. Proyección Mercator. Fuente: <https://www.britannica.com/science/Mercator-projection>

Debido a esto, aunque es ampliamente utilizada en cartas náuticas para zonas más cercanas al Ecuador, queda automáticamente excluida para cualquier tipo de operación en aguas del Océano Glacial Ártico.

Como alternativa, surgen otros tipos de proyección que pueden ser muy útiles en estas latitudes, como pueden ser:

- Proyección conforme cónica de Lambert, o proyección de Lambert, es una proyección cónica en la que se toman dos paralelos de referencia, se superpone un cono de referencia secante a los dos paralelos. Esto da lugar a que la distorsión en la zona entre los paralelos de referencia sea mínima y nula en los propios paralelos de referencia, aumentando al alejarse de estos. [59]

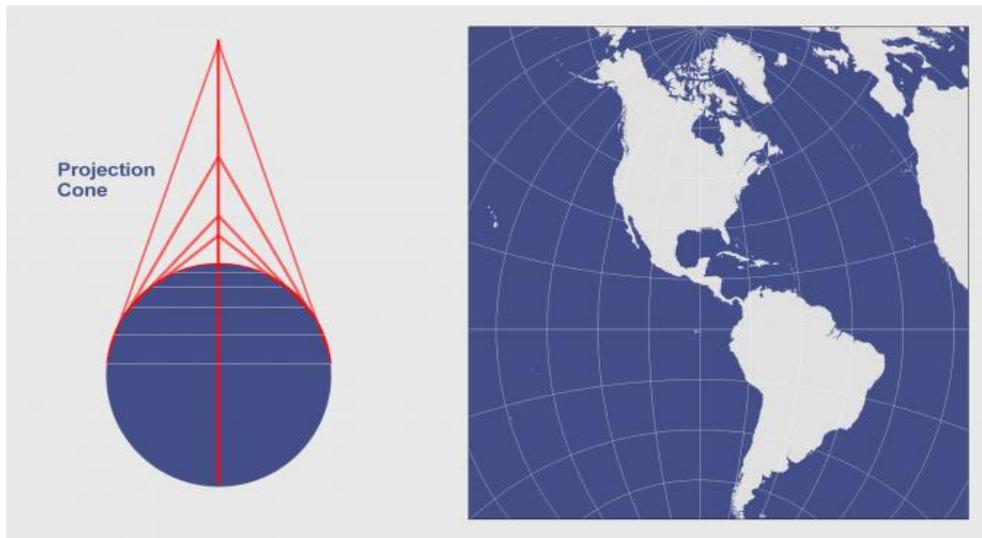


Ilustración 9. Proyección conforme cónica de Lambert. Fuente: <https://acolita.com/proyeccion-conica-lambert-albers-y-polyconic/>

- La proyección estereográfica polar, la más utilizada para la representación de las regiones polares, se basa en colocar como punto central de referencia el Polo a representar, de forma que los meridianos escapan de este en forma radial y los paralelos forman anillos concéntricos en el Polo. Esto hace que en las zonas alejadas al Polo a representar la distorsión sea mínima, aumentando al desplazarnos hacia el Ecuador (hacia “fuera” del centro). [60] [61]

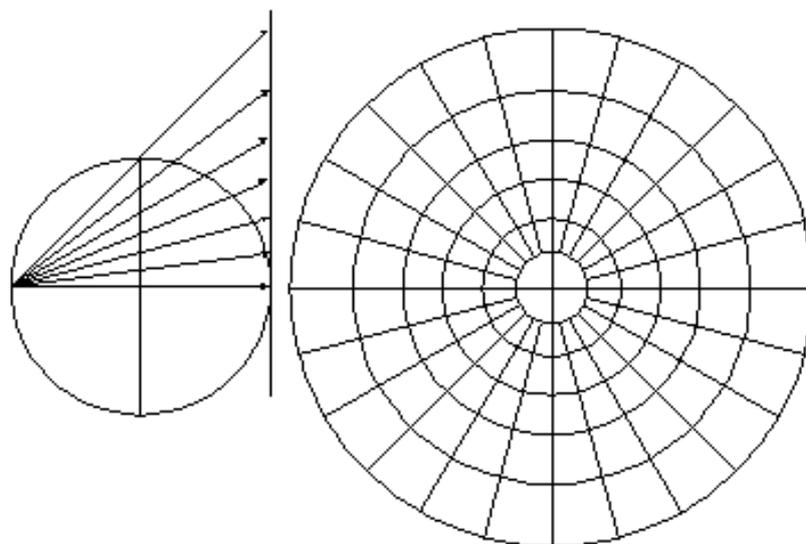


Ilustración 10. Proyección estereográfica polar. Fuente: http://193.147.167.77/index.php/Archivo:Proyecci%C3%B3n_estepolar.png

Dadas estas opciones, representar en cartas náuticas la región del Océano Glacial Ártico se hace posible, ese aspecto del problema de la cartografía en el Ártico. Pero este no es todo el problema, puesto que el otro gran escollo que surge al tratar con la cartografía disponible es la falta de precisión en la representación de la mayoría de accidentes geográficos (rocas superficiales, forma de la costa, bancos de arena...).

Esta falta de precisión se debe al poco tránsito que ha habido en dicha zona de navegación por parte de equipos de cartografía, dado el poco interés por explotar esta ruta en el pasado. Es probable que, incluso si las de navegación del Océano Glacial Ártico se popularizan, se tarden años en elevar los conocimientos geográficos de la zona a los estándares actuales.

Capítulo II.III.b. La aguja náutica.

Una de las herramientas más elementales para la navegación junto con las cartas náuticas, siendo de vital importancia para seguir la derrota trazada y llegar a puerto de forma segura y efectiva.

En el presente, ha caído en cada vez mayor desuso dados los avances en navegación radioelectrónica (sistemas de posicionamiento mediante satélites, cartas electrónicas, utilización de sistemas RADAR...) y dispositivos disponibles de los cada vez más modernos buques de la flota mercante a nivel global.

Sin embargo, en caso de necesidad, esta tampoco se podría utilizar de forma fiable para navegar por el Océano Glacial Ártico debido a su propio funcionamiento. Al encontrarse en esas latitudes, las líneas del campo magnético terrestre son cada vez más perpendiculares a la aguja náutica, que permanecería paralela a la superficie terrestre gracias al cardán que la sostiene dentro de la bitácora. Debido a que la precisión y correcta orientación de la aguja depende completamente de la componente horizontal del campo magnético terrestre y esta tiende a cero al acercarnos a cualquiera de los Polos Magnéticos terrestres (que, a su vez, suelen encontrarse en posiciones cercanas a los Polos Geográficos), las agujas náuticas convencionales sufren de una pérdida de precisión importante cuando navegamos a través de las regiones polares en las inmediaciones del Polo Magnético correspondiente.

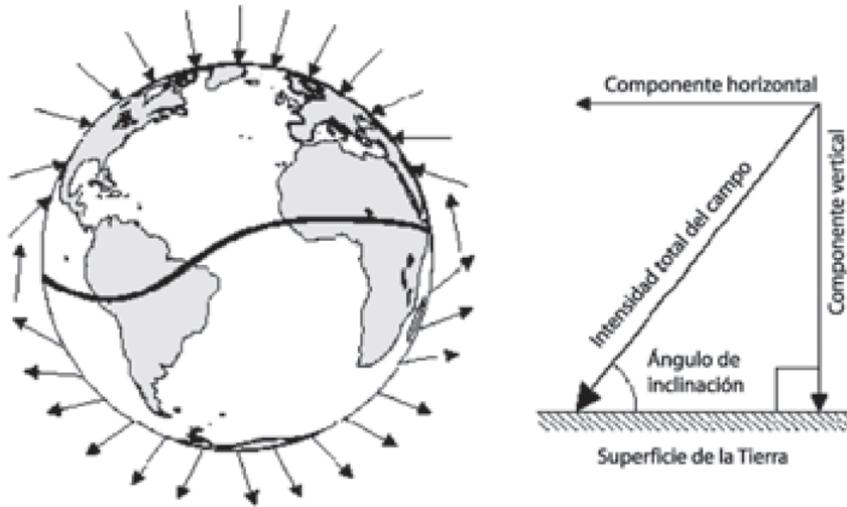


Ilustración 11. Diagrama del campo magnético terrestre y descomposición vectorial. Fuente: https://www.researchgate.net/figure/FIGURA-1-Izquierda-Diagrama-del-campo-magnetico-terrestre-mostrando-como-las-lineas-del_fig1_230813593

De esta forma, la solución para poder contar con una aguja que marque correctamente el norte (verdadero, en este caso) pasa por contar con una aguja giroscópica bien calibrada antes de aventurarnos a navegar a través del Océano Glacial Ártico, pues al ser completamente independiente del campo magnético terrestre tenemos la certeza de que nos garantizará una precisión adecuada. [62] [63] [64]

Capítulo II.III.c. Navegación satelital.

Los sistemas de navegación por satélite también se ven perjudicados en latitudes extremas, y eso se debe a algo tan natural como la forma de la propia Tierra.

La forma de la Tierra se clasifica, dentro de la geodesia, como un elipsoide de revolución. En torno a dicha forma orbita la red de satélites del GPS a altitudes comprendidas alrededor de los 20.000 km de altura (que entra en la categoría de MEO), en órbita inclinada de aproximadamente 55° respecto al Ecuador terrestre. Dada esta configuración, y teniendo en cuenta que cualquier ruta que transite por el Océano Glacial Ártico lo hace a latitudes muchas veces superiores a 70°N y 75°N , hace que no haya suficientes satélites del GPS sobre el horizonte la mayor parte del tiempo, lo que hace que los datos de posición que pudieran llegar a dar no fueran todo lo precisos que se requiere en una zona de navegación tan exigente como es la del Ártico. Por otra parte, el DGPS tampoco podría ayudar a mejorar la precisión de este sistema de posicionamiento en el Ártico, pues depende de estaciones fijas en tierra con un alcance de entre 200 y 250 nm, algo que dado lo desolado de la mayor parte de la costa en torno

al Océano Glacial Ártico (que hace inviable por los costes que supondría el despliegue de este tipo de estaciones) y las grandes distancias que abarca invalidan también el uso del DGPS. [65] [66] [67]

La solución a este problema pasaría por utilizar otros sistemas de posicionamiento por satélite de forma complementaria al GPS. Estos sistemas alternativos podrían ser el GLONASS, que con una inclinación orbital de 64,8° da un mejor alcance a las regiones cercanas al Polo Norte y Polo Sur de nuestro planeta o el sistema Galileo, con 56° de inclinación orbital máxima podría colaborar en la mejora de la precisión hasta cierto punto. También es importante destacar que los sistemas complementarios existentes para la mejora de la precisión, como pueden ser EGNOS o WAAS no están disponibles en el Ártico, puesto que los satélites de tales sistemas se encuentran en órbitas geoestacionarias, por lo tanto, bajo el horizonte en esas latitudes. [68] [69] [70] [71]

Esto añadido a que gran parte de los dispositivos de navegación por satélite son capaces ya de combinar la señal del GPS con la señal del GLONASS y Galileo los podría convertir en una opción para mejorar la precisión de los sistemas de navegación por satélite en la región Ártica, aunque cabe destacar que la calidad y precisión deberá ser mejorada de cara a poder utilizarlos con las máximas garantías de seguridad y calidad.

Hay que añadir que no solo se trata de un problema con la precisión global, incluso complementando las señales de los diferentes sistemas de navegación satelital, pues estas señales pueden verse gravemente afectadas por la actividad solar en la ionosfera terrestre. Esto, en latitudes extremas como es el caso del Océano Glacial Ártico, puede llevar a un deterioro aún mayor de la ya poco precisa señal obtenida de los satélites, algo que los dispositivos no puede corregir de ninguna forma. Así, la navegación por satélite en la región Ártica requeriría de una fuerte inversión para mejorar la cobertura y precisión en altas latitudes, mediante la instalación de estaciones del DGPS en las costas siberianas o del norte de Canadá, por ejemplo. [72]

Otra alternativa para mejorar la navegación radioelectrónica en esta zona sería, de hecho, la implementación de sistemas previos incluso a la navegación por satélite: Los sistemas de navegación hiperbólica, como podrían ser el LORAN o el sistema ruso CHAYKA (“gaviota”, en ruso). Ambos operan en la misma banda de frecuencias (entre 90 y 100 kHz) y pueden ser complementarios entre ellos y superan en alcance al DGPS (LORAN-C, por ejemplo, tenía un alcance de hasta 1.650 nm durante la noche y de hasta 2.250 nm durante el día, seis a nueve veces superior al de una estación del DGPS), aunque requerirían de la instalación y mantenimiento de estaciones a lo largo

de las costas del Océano Glacial Ártico y de su implementación por parte de Estados Unidos, que dio de baja el sistema en el año 2010. [73] [74] [75]

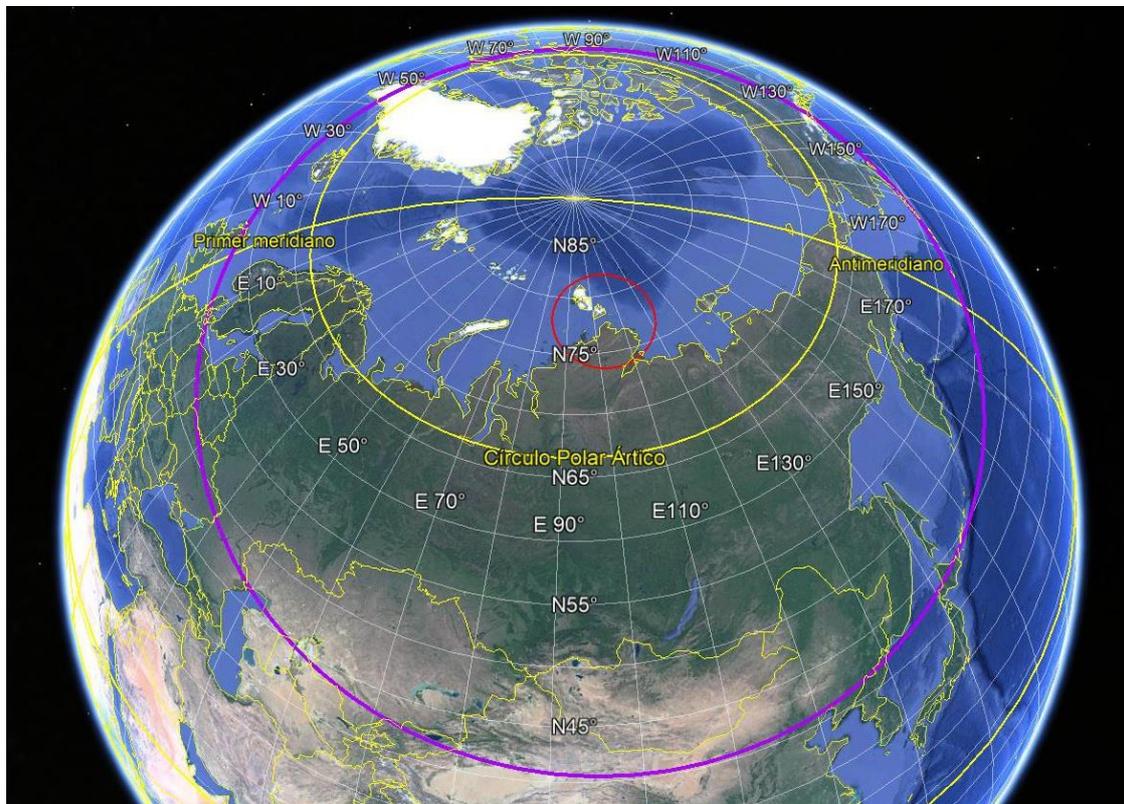


Ilustración 12. Rangos de las estaciones DGPS (círculo rojo) y estaciones LORAN-C durante el día (círculo púrpura). Fuente: Elaboración propia.

Capítulo II.III.d. Ayudas a la navegación.

Las ayudas a la navegación (siendo estas las boyas, faros y señales luminosas, balizas y radiobalizas, reflectores de radar, entre otras), también conocidas como AtoN son, a día de hoy, una herramienta esencial para una navegación segura. Gracias a las AtoN podemos prevenir accidentes de varios tipos (ya sea varadas, abordajes, daños en el casco...) al utilizarlas para señalar, por ejemplo, rocas sumergidas, pecios u otros peligros para los buques.

Dado el abandono y poco interés de cualquiera de las zonas de navegación del Océano Glacial Ártico, dado que es actualmente cuando han empezado a cobrar protagonismo (y aún más importante, a ser navegables), no hay presencia de ningún tipo de AtoN, salvo en las zonas más transitadas en torno a los puertos siberianos activos durante el verano Ártico, de los que hablaremos más adelante.

Respecto a esta grave carencia de AtoN en la zona, la IALA estudia la implementación de diferentes tipos de AtoN, entre las que destacan las VAtoN que simularían en las pantallas de radar de los buques que transiten las aguas del Océano Glacial Ártico las ayudas necesarias para la navegación, ubicando los dispositivos VAtoN en una serie de localizaciones limitadas. La gran ventaja que reportan este tipo de AtoN, además del menor mantenimiento que requieren (algo muy ventajoso dado lo costoso y lejano que sería un viaje para reparar alguna AtoN en mal estado a, por ejemplo, el Mar de Siberia Oriental o el Mar de Beaufort), es la posibilidad de realizar correcciones en el tipo de AtoN que proyectan en las pantallas de radar de los buques, puesto que se puede realizar de forma rápida y sin la necesidad de acudir al lugar, ahorrando costes. [76] [77] [78]

Aunque, y desgraciadamente para los buques que naveguen a través del Océano Glacial Ártico en los próximos veranos en tales latitudes, no hay planes o previsión de instalar y poner en servicio estas VAtoN en un futuro cercano, lo que sigue dejando esta región sin las ayudas a la navegación pertinentes y necesarias dada la imprecisa y relativamente escasa información que se dispone del estado de las rutas de navegación en aguas del Ártico.

Capítulo II.III.e. Comunicaciones.

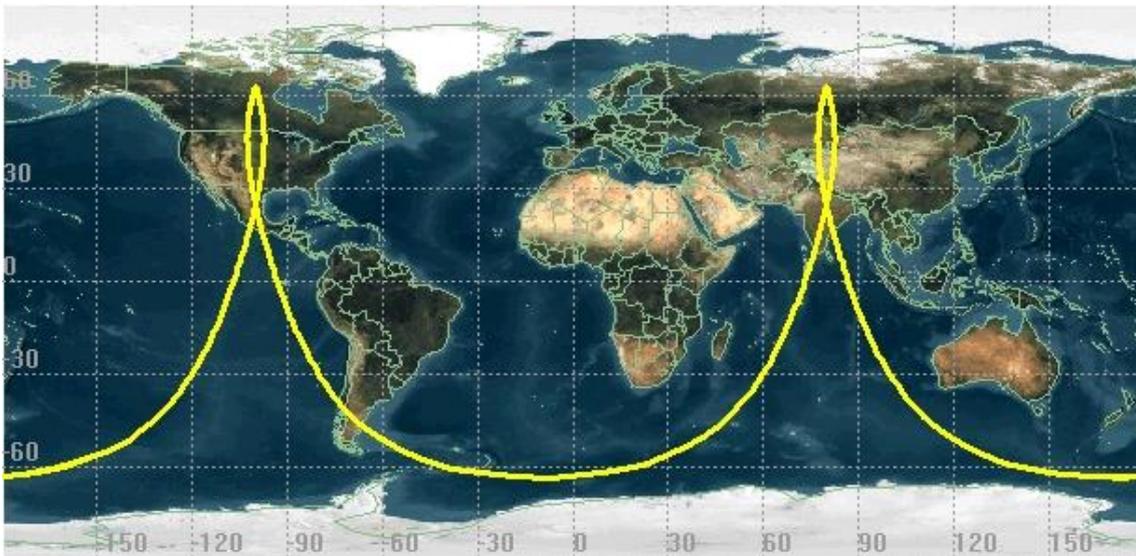
Las comunicaciones en el Océano Glacial Ártico y, en general, en toda el área del Ártico, son realmente un problema dado lo desolado del territorio, la falta de población o núcleos urbanos de ningún tipo y, debido a esto último, de infraestructuras dedicadas a las telecomunicaciones como pueden ser repetidores o antenas instaladas con este fin.

A esto se suma que cualquier tipo de telecomunicación basada en la reflexión de ondas en la ionosfera (ondas celestes o “skywaves”) se ve afectado por las interferencias y cortes en la señal provocados por los fenómenos que suceden a estas latitudes (principalmente, la alta ionización de las partículas en la ionosfera, que es lo que provoca las tan conocidas auroras boreales). A esto se suma las características del terreno, mayoritariamente permafrost y amplias áreas rocosas, que dificultan la transmisión debido a la pobre conductividad de tales suelos, algo de vital importancia para la transmisión de ondas terrestres y, por tanto, difusión de las transmisiones. Esto implica que el transmisor debe contar con una potencia de emisión mucho mayor que uno situado a menores latitudes a fin de poder lograr el mismo rango. [79] [80] [81]

Dados estos dos factores, las comunicaciones basadas en la reflexión de ondas en la ionosfera se reservan para latitudes bajas y medias, donde dicha capa de la atmósfera es mucho más estable. Esto se debe a que, para la reflexión de ondas en la atmósfera,

se requiere de una concentración óptima de partículas ionizadas. En caso de haber concentraciones demasiado altas, las ondas serán absorbidas en lugar de reflejadas. En altas latitudes, desgraciadamente, se producen altas concentraciones de partículas ionizadas que absorben en parte las ondas de las transmisiones y las reflejan, distorsionadas, en direcciones extrañas. Así, los equipos basados en la High Frequency (HF, 3 MHz to 30 MHz) o la Medium Frequency (MF, 300 kHz to 3 MHz) se convierten en métodos poco fiables para las comunicaciones en caso de querer emplear ondas celestes (reflejadas en la ionosfera). [82]

La alternativa a esto pasa por utilizar satélites de telecomunicaciones situados en órbitas de Mólniya, un tipo de órbita de alta inclinación creada específicamente para dar cobertura de comunicaciones por satélite en altas latitudes. Y este método no está exento de pegas, puesto que las instalaciones dedicadas a operar con satélites en este tipo de órbitas aumentan en complejidad, requiriendo dos antenas en lugar de una. Esto se debe a que, por los cambios continuos en la distancia entre el satélite y la estación que implica una órbita de Mólniya la potencia y frecuencia (esto último debido al efecto Doppler) varían, así como el haz de cobertura (que depende de la altitud del satélite, también variable), siendo necesario programar la selección del satélite del que se recibe la señal en función de las posiciones en que se encuentren los diferentes de la red satelital en dicha órbita. [83] [84]



*Ilustración 13. Líneas de sobrevuelo de los satélites en órbita de Mólniya sobre la superficie terrestre.
Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/%C3%93rbita_de_M%C3%B3lniya#/media/Archivo:Molniya.jpg*

Otra alternativa podrían ser los satélites de la red Iridium, dedicados específicamente a establecer una red satelital para proveer de SSM a las regiones fuera de la cobertura de

los servicios de telefonía, permitiendo las comunicaciones de voz y datos entre dispositivos conectados de la red de satélites. Dada la inclinación de la órbita de Iridium, que es de 86,4º, es viable que den cobertura a los buques en el Océano Glacial Ártico, aunque el hecho de que sea un sistema privado de comunicaciones por satélite dificulta su implementación en todos los buques, pues los armadores o navieras son los que toman la decisión de contratar el servicio. [85] [86] [87]

Por último, aunque existen cables de fibra óptica que pasan bajo las aguas del Océano Glacial Ártico (como es el caso del cable Reino Unido-Japón que pasa por el Paso del Noroeste), pero no existen terminales ni conexiones que se puedan emplear para proveer de conexión a la World Wide Web en la región Ártica a los buques mercantes.

De esta forma, queda claro que otro aspecto a mejorar son las redes de comunicaciones disponibles en el Ártico, puesto que al igual que las herramientas de navegación son parte vital de una travesía segura.

Capítulo II.III.f. Redes SAR.

Este es, quizás, el apartado que menos explicaciones necesita y el más obvio dada la información que ya tenemos sobre la región del Océano Glacial Ártico: Las labores de los equipos SAR se tornan extremadamente difíciles en esta zona del planeta.

Esto es, en primer lugar, debido a su extrema lejanía y falta de estaciones en las costas del Ártico. Esto hace que un desplazamiento para socorrer a un buque en situación de emergencia suponga afrontar distancias de miles de millas en el peor de los casos. Y en una situación de emergencia el tiempo es crucial, por lo que una espera prolongada hasta que los equipos SAR lleguen es altamente riesgosa para el buque y tripulación accidentados.

A esto se suma que los equipos SAR movilizados también enfrentarían los problemas en la navegación específicos de la región, lo que incluye lo expuesto en los puntos anteriores, de forma que también correrían el riesgo de verse en una situación de emergencia.

Por último, cabe destacar que los problemas para situar correctamente al buque o buques en situación de emergencia, dados los problemas de comunicaciones y navegación por satélite, lo que puede complicar aún más las tareas de búsqueda y rescate. Aunque, por suerte, esto se solventa mediante la implementación del sistema COSPAS-SARSAT en buques que naveguen en latitudes extremas, puesto que sus

satélites (especializados en labores SAR) vuelan en órbita polar baja, dando cobertura a la región Ártica en caso de emergencia. [88] [89]

Al margen de los problemas que puedan existir para las labores SAR en aguas del Ártico, la infraestructura dedicada a esta labor existe. Se trata del Arctic Search and Rescue Agreement (cuyo nombre oficial es Agreement on Cooperation on Aeronautical and Maritime Search and Rescue), un tratado internacional al que están vinculados los estados miembros del Consejo Ártico y que coordina las cobertura y respuesta de las labores SAR ante cualquier emergencia (aeronáutica o marítima) en la región. Además, divide y reparte el Ártico en zonas de responsabilidad para los diferentes países presentes.

El área queda repartida tal y como se puede ver la siguiente imagen:

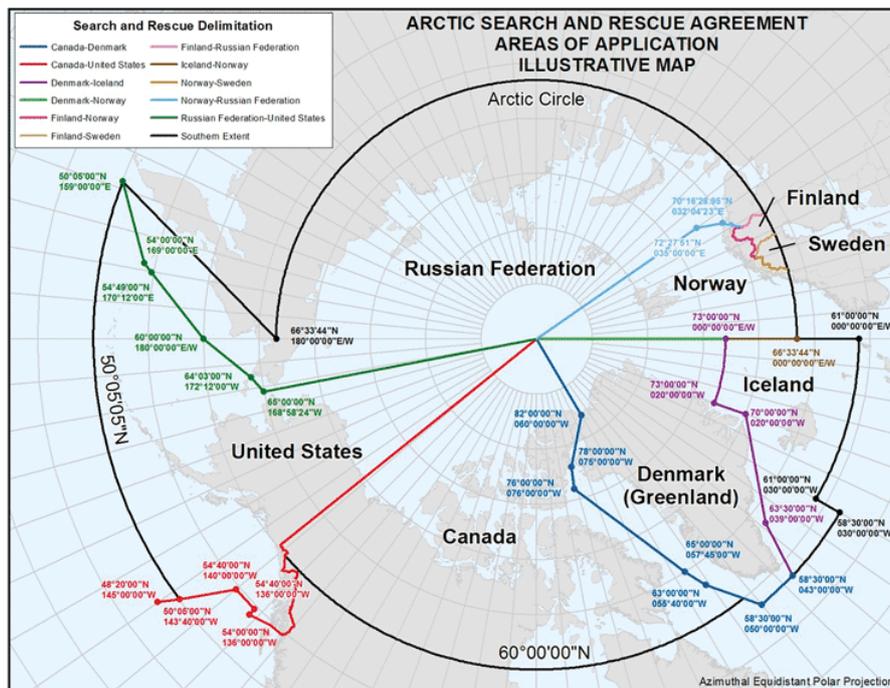


Ilustración 14. Áreas de responsabilidad SAR de los diferentes países del Consejo Ártico. Fuente: https://en.wikipedia.org/wiki/Arctic_Search_and_Rescue_Agreement#/media/File:Arctic_search_and_rescue_agreement_-_areas_of_application_-_illustrative_map.gif

Por otra parte, entre los centros de coordinación de la región destacan los ubicados en Rusia y en Canadá, puesto que dos de las principales rutas que discurren por el Ártico transitan aguas de ambos países. Entre estos centros podemos destacar los JRCC de Victoria, Trenton y Halifax, y los MRSC de Quebec y St. John's en Canadá, y los MRCC de Murmansk y MRCC de Dikson (que se reparten el sector occidental y oriental de la

RMN respectivamente) junto con los MRSC de Tiksi y MRSC de Pevek en Rusia. Estos centros cumplen con el manual IAMSAR, estando provistos de los equipos necesarios para las labores SAR que se requieran en la región del Ártico.

Capítulo II.IV. Legislación al respecto: El Código Polar.

Con el aumento del interés por parte de diferentes países del mundo en la navegación a través del Océano Glacial Ártico, y el cada vez mayor tráfico en la región debido a la mejora de las condiciones de navegación y el imparable incremento ventanas de tiempo para transitar por sus aguas, se hizo patente la necesidad de establecer normativas a nivel internacional respecto a la navegación en aguas del Océano Glacial Ártico. [90] [91]

Es así como en el seno de la OMI nace el Código Internacional para los Buques que operen en Aguas Polares, conocido comúnmente como Código Polar. Este código se aplica a todos los buques que deseen navegar tanto en aguas del Océano Glacial Ártico como en aguas del Océano Glacial Antártico, protegiendo ambas regiones (cuyos ecosistemas son altamente sensibles, dada la situación de estrés a la que se ven sometidos por el calentamiento global y cambio climático) de la posible contaminación causada por la flota mercante que transite sus aguas (mediante la enmienda en el Convenio MARPOL, que entró en vigor en el año 2017) así como la prevención de accidentes y aumento de los estándares de seguridad en la navegación para buques y tripulaciones (por medio de una enmienda al Convenio SOLAS, que entró en vigor junto con la enmienda al MARPOL en el año 2017).



Ilustración 15. Áreas de aplicación del Código Polar. Fuente: Elaboración propia.

El Código Polar se divide en dos partes, divididas a su vez en dos partes cada una, de la siguiente forma:

- Parte I.A. Medidas de seguridad.
- Parte I.B. Orientaciones adicionales relativas a las disposiciones de la introducción y de la Parte I.A.
- Parte II.A. Medidas de prevención de la contaminación.
- Parte II.B. Orientaciones adicionales relativas a las disposiciones de la introducción y de la Parte II.A.

De esta forma, en la Parte I.A. se definen categorías de buque para la navegación en aguas polares, pudiendo ser estos de Categoría A (capaces de navegar en, como mínimo, hielo medio del primer año con fragmentos de hielo viejo, siendo estos tipos de hielo que haya permanecido fundido por más de un invierno con espesores de entre 0,7 y 1,2 metros, con fragmentos de hielo que haya sobrevivido, al menos, a una fusión de verano y con espesores de hasta 3 metros o más), Categoría B (buques no incluidos en la Categoría A, capaces de navegar en aguas con hielo del primer año con espesores de entre 0,3 y 0,7 metros, con fragmentos de hielo viejo) o Categoría C (buques fuera de las Categorías A y B, diseñados para navegar en aguas libres de hielo o con capas de hielo de espesor inferior a las demás categorías).

En esta parte también se establece la obligatoriedad de los buques con intención de transitar aguas dentro de los límites establecidos por el Código Polar de contar con un Certificado específico que habilite al buque y a su tripulación como aptos para dicha travesía, así como la obligación de llevar a bordo un Manual de Operaciones en Aguas Polares (PWOM) que proporcionará tanto al propietario del buque, como al armador, Capitán y tripulación del mismo de información acerca de las capacidades y limitaciones operacionales del buque durante su travesía en aguas del ártico o antártico, para facilitar la toma de decisiones en cualquier situación. La Parte I.A. también recoge normativa sobre la construcción y diseño de los buques cuyo objetivo sea la navegación polar, estructura de los buques, compartimentación y estabilidad, integridad estanca al agua e intemperie, instalaciones de máquinas a bordo de tales buques, equipos de seguridad, contra incendios, salvamento, seguridad de la navegación y comunicaciones, cubriendo todos los aspectos que pudiésemos mencionar en Capítulos anteriores de este trabajo, así como normas respecto a la correcta planificación del viaje y a la dotación y formación de la misma de cara a mantener unos niveles de seguridad adecuados.

La Parte I.B. comprende un conjunto de recomendaciones a la Parte I.A., actuando de forma complementaria con esta. De la misma forma, la Parte II.A. cubre todos los

aspectos referentes a la prevención de la contaminación del medio marino en las aguas de aplicación de este Código, tanto contaminación por hidrocarburos como por sustancias nocivas transportadas a granel, sustancias perjudiciales transportadas en bultos, aguas sucias de los buques o basuras de los buques. La Parte II.B., al igual que pasara con la Parte I.B. respecto a la Parte I.A., reúne una serie de recomendaciones y orientaciones adicionales a los diferentes apartados de la Parte II.A.

En las siguientes infografías, publicadas por la OMI con el objetivo de hacer más accesible los términos del Código Polar, se observan de forma resumida y gráfica los términos explicados anteriormente, tanto para la Parte I como para la Parte II.

CÓMO EL CÓDIGO POLAR PROTEGE EL MEDIO AMBIENTE

HIDROCARBUROS

DESCARGAS
La descarga en el mar de hidrocarburos o mezclas oleosas desde cualquier buque está prohibida

ESTRUCTURA
Se exigen el doble casco y el doble fondo para todos los petroleros, incluidos los de menos de 5 000 TPM (buques de las categorías A/B construidos el 1 de enero de 2017 o posteriormente)

FUELOIL PESADO
El fueloil pesado está prohibido en el Antártico (de conformidad con el Convenio MARPOL). Se alienta a los buques a no utilizar ni transportar fueloil pesado en el Ártico

LUBRICANTES
Considerar la utilización de sistemas basados en agua o lubricantes biodegradables no tóxicos en los componentes lubricados situados en el exterior del casco sumergido en contacto directo con el agua de mar.

ESPECIES INVASIVAS

ESPECIES ACUÁTICAS INVASIVAS
Se adoptarán medidas para reducir al mínimo el riesgo de especies acuáticas invasivas a través de la contaminación biológica y el agua de lastre de los buques

AGUAS SUCIAS

DESCARGAS I
No se permite descarga alguna de aguas sucias en las aguas polares (salvo en circunstancias específicas)

INSTALACIONES DE TRATAMIENTO
La descarga se permite si el buque cuenta con una instalación de tratamiento de aguas sucias aprobada y descarga aguas sucias tratadas lo más lejos posible de la tierra más próxima, cualquier hielo fijo, barrera de hielo o zonas con una concentración de hielo específica

DESCARGAS II
• Las aguas sucias que no estén desmenuzadas ni desinfectadas podrán descargarse a una distancia superior a 12 millas marinas de cualquier barrera de hielo o hielo fijo
• Las aguas sucias desmenuzadas y desinfectadas podrán descargarse a una distancia superior a 3 millas marinas de cualquier barrera de hielo o hielo fijo

BASURAS

PLÁSTICOS
 Toda descarga de plásticos está prohibida (de conformidad con el Convenio MARPOL)

DESECHOS DE ALIMENTOS I
La descarga de desechos de alimentos en el hielo está prohibida

DESECHOS DE ALIMENTOS II
Los desechos de alimentos que se hayan desmenuzado o triturado (de tamaño no superior a 25 mm) podrán descargarse solamente cuando el buque no se encuentre a menos de 12 millas marinas de la tierra más próxima, la barrera de hielo más próxima o el hielo fijo más próximo

CADÁVERES DE ANIMALES
La descarga de cadáveres de animales está prohibida

RESIDUOS DE CARGA
Los residuos de carga y los agentes y aditivos de limpieza contenidos en el agua de lavado de las bodegas sólo podrán descargarse si: no son perjudiciales para el medio marino; los puertos de origen y destino se encuentran en las aguas árticas; y no existen instalaciones de recepción adecuadas en dichos puertos. Las mismas prescripciones se aplican a la zona del Antártico de conformidad con el Convenio MARPOL.

SUSTANCIAS QUÍMICAS

DESCARGAS
La descarga de sustancias nocivas líquidas (NLS) o de mezclas que las contengan está prohibida en las aguas polares

INFORMACIÓN DE REFERENCIA

EL CÓDIGO INTERNACIONAL PARA LOS BUQUES QUE OPEREN EN AGUAS POLARES ENTRARÁ EN VIGOR EL 1 DE ENERO DE 2017

SE APLICA A LOS BUQUES QUE OPERAN EN AGUAS ÁRTICAS Y ANTÁRTICAS. SE AÑADE A LAS PRESCRIPCIONES ACTUALES DEL CONVENIO MARPOL.

PREVE LA SEGURIDAD DE LAS OPERACIONES DE LOS BUQUES Y PROTEGE EL MEDIO AMBIENTE ABRINDANDO LOS RIESGOS ÚNICOS PRESENTES EN LAS AGUAS POLARES QUE OTROS INSTRUMENTOS NO CONTEMPLAN

DEFINICIONES

CATEGORÍAS DE BUQUES
Existen tres categorías de buques proyectados para operar en aguas polares en:

A) como mínimo, hielo medio del primer año
B) como mínimo, hielo delgado del primer año
C) aguas libres/condiciones del hielo menos rigurosas que las de las categorías A y B

HIELO FIJO: hielo marino que se forma y permanece fijo a lo largo de la costa, donde se une a la orilla, a una pared de hielo, a un frente de hielo, entre bajos o icebergs varados

BARRERA DE HIELO: capa de hielo flotante de considerable espesor, entre 2 y 50 m o más sobre el nivel del mar, unida a la costa

OMI ORGANIZACIÓN MARÍTIMA INTERNACIONAL

Ilustración 16. Infografía sobre la Parte I del Código Polar. Fuente:

<http://www.imo.org/es/MediaCentre/HotTopics/polar/Documents/How%20the%20Polar%20Code%20protects%20the%20environment%20%28Spanish%20infographic%29.pdf>

¿QUÉ SUPONE EL CÓDIGO POLAR PARA LA SEGURIDAD DE LOS BUQUES?

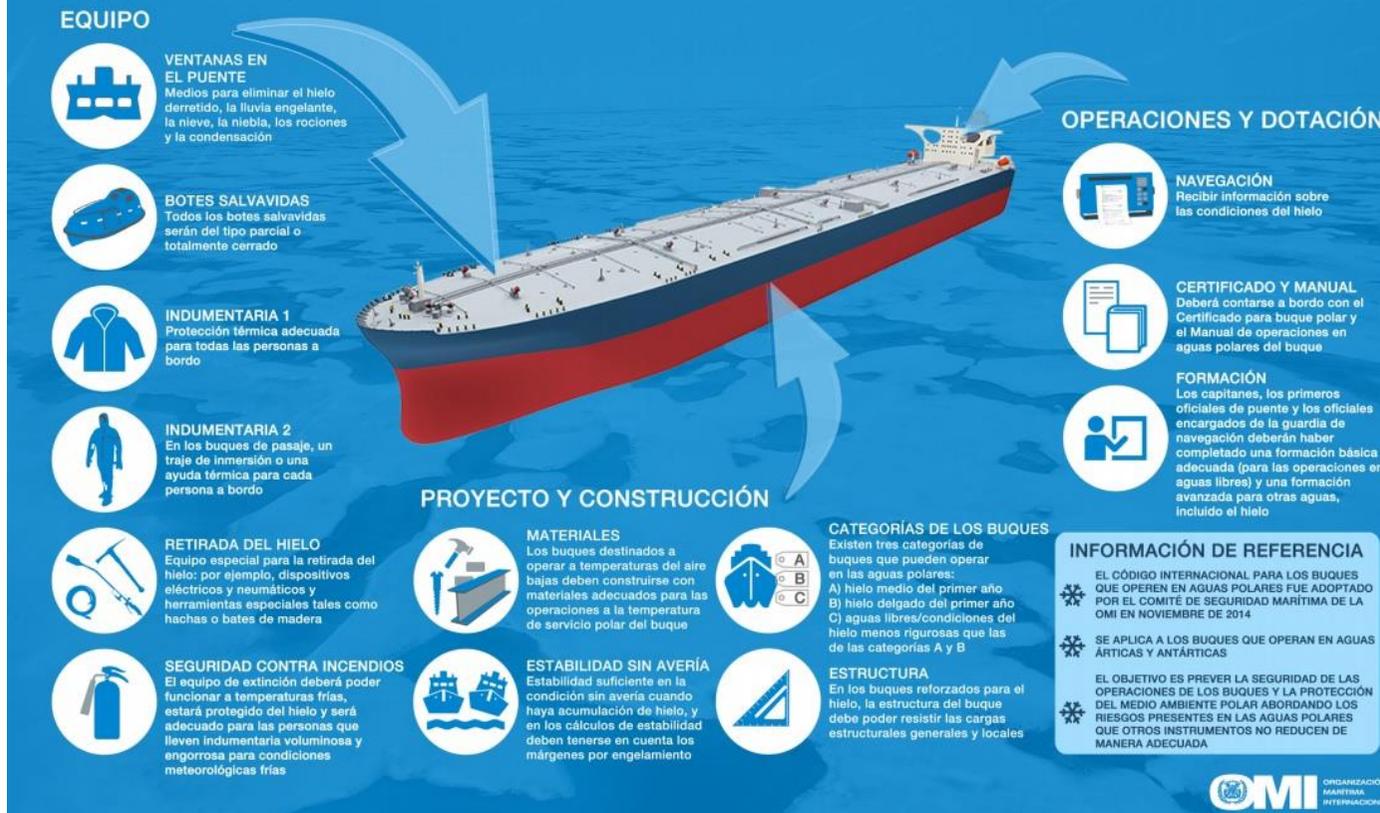


Ilustración 17. Infografía sobre la Parte I del Código Polar. Fuente: http://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/polar/Documents/Polar%20Code%20Ship%20Safety%20-%20Infographic_SPANISH.pdf

Gracias a este Código, producto de la cooperación internacional a través de la OMI, y más concretamente del MSC y el MEPC para la Parte I y la Parte II respectivamente, en vigor desde el 1 de mayo de 2017, se garantizan unas normas de seguridad y prevención de la contaminación del frágil entorno marítimo de las regiones polares, de urgente necesidad dado el imparable deterioro de dichas regiones (especialmente la región del Ártico), el aumento del tráfico marítimo y, por supuesto, las extremadamente exigentes y hostiles condiciones de navegación a las que se ven sometidos los buques y tripulaciones que se aventuran a través de las rutas marítimas de los océanos polares de nuestro planeta.

Capítulo II.V. Rutas disponibles para la navegación en aguas del Océano Glacial Ártico.

Tras haber acotado y estudiado las condiciones en el Océano Glacial Ártico, así como los problemas que enfrentan (y, probablemente, enfrentarán en un futuro cercano) las cada vez más tripulaciones que se aventuran a navegar en estas aguas, quedan algunas preguntas aún no resueltas, pero de gran interés.

La pregunta que nos atañe en este apartado es de gran importancia, dado que va a definir precisamente las verdaderas condiciones de navegación: ¿De qué rutas disponemos en caso de querer cruzar el Ártico? [92] [93]

Para dar respuesta a esta pregunta lo primero que debemos hacer es definir qué tipos de ruta se pueden utilizar para cruzar las aguas del Ártico, y esto depende principalmente del objetivo del buque que transite dicha región. Podemos, por lo tanto, diferenciar en dos tipos de ruta:

- Rutas intra-árticas: Cuando el inicio, el final o la ruta al completo se encuentran en las costas del Océano Glacial Ártico. Un ejemplo sería una ruta entre los puertos de Murmansk (ciudad portuaria de la costa norte de la península de Kola, en Rusia) y Busan (en Corea del Sur).
- Rutas trans-árticas: Cuando tanto el puerto de salida como el puerto de destino se encuentran fuera de las aguas del Ártico. Una ruta trans-ártica podría ser una que parte de Shanghái con destino a Róterdam.

En nuestro caso, aunque vamos a centrarnos principalmente en las rutas trans-árticas que conectarían los puertos del Asia con los de Europa y Norteamérica, comentaremos también una cuarta ruta que conecta directamente el continente norteamericano con puertos del norte de Rusia.

Para este supuesto, hay principalmente cuatro rutas posibles que transitan las aguas del Océano Glacial Ártico conectando el Atlántico Norte con el norte del Pacífico. Dos de estas rutas dependen completamente de la fusión del hielo, siendo de carácter estacional, mientras que la otra es una proyección que, a día de hoy, es imposible llevar a cabo (pues depende de la fusión del grueso de la banquisa en torno al Polo Norte geográfico).

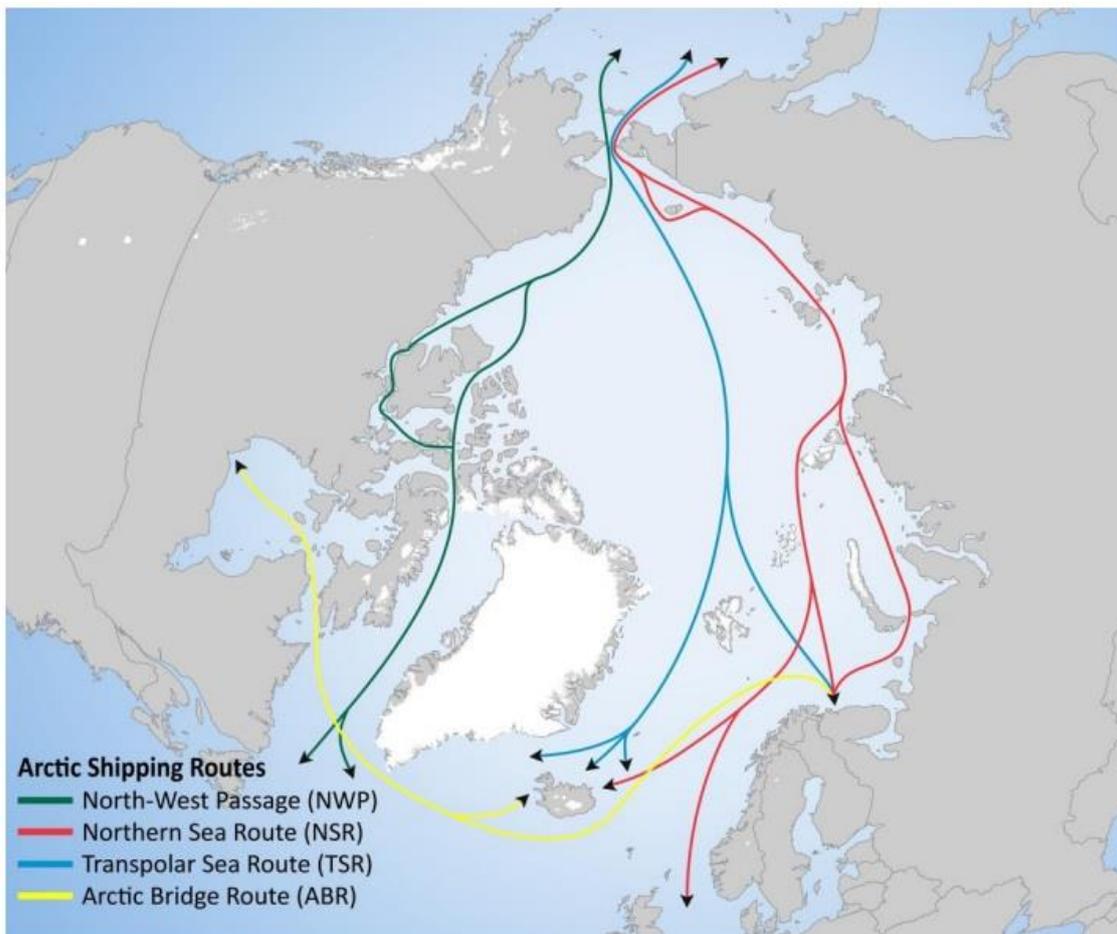


Ilustración 18. Rutas existentes en a través del Océano Glacial Ártico. Fuente: https://arcticyearbook.com/images/yearbook/2012/Scholarly_Papers/14.Humpert_and_Raspotnik.pdf

Capítulo II.V.a. Ruta Transpolar.

La ruta Transpolar (o, por sus siglas en inglés, Transpolar Sea Route o TSR) es, actualmente, la más complicada de llevar a cabo entre todas las rutas. Esta es, probablemente, la ruta de tipo trans-ártica por definición. Esta ruta, que sería la más directa posible entre el Pacífico y el Atlántico, está proyectada para el periodo de tiempo en que la banquisa de hielo en torno a Polo Norte desaparezca completamente o adelgace como para ser posible navegar a través de ella con seguridad.

Como su propio nombre indica, esta hipotética ruta une ortodrómicamente el Estrecho de Bering y el norte de Europa, suponiendo el máximo ahorro de distancia posible en lo que a rutas entre Asia y Europa/Norteamérica se refiere, recorriendo alrededor de 2.100 nm. Además, se encuentra fuera de los límites de las EEZ de los estados árticos, lo que convierte a la TSR en una ruta libre de posibles tasas y trabas administrativas por parte de dichos países.

Dada la reducción de la capa de hielo ártica debido al calentamiento global, se estima que a mediados del siglo XXI esta ruta será transitable con relativa seguridad de no frenar o reducirse el ritmo al que la extensión máxima de la placa mengua.

Uno de los primeros buques en utilizarla fue el Snow Dragon, buque rompehielos de bandera China dedicado a la investigación polar, durante el verano Ártico del año 2012. [94] [95]

Capítulo II.V.b. Ruta del Puente Ártico.

La ruta marítima del Puente Ártico (en inglés, Arctic Bridge Route o ABR), del tipo intra-ártico casi en su totalidad, se utiliza específicamente para la navegación entre el puerto de Churchill (único puerto de la costa norte de Canadá, situado en la Bahía de Hudson, siendo utilizado principalmente para el comercio con el puerto de Murmansk, que actúa como puerta a Rusia y Europa de las mercancías que exporta Canadá a estos territorios) y los puertos de Reykiavik, en Islandia, y Murmansk, en Rusia. Tiene aproximadamente 3.600 nm de recorrido desde Churchill hasta Murmansk, lo que la hace una ruta asequible para la exportación de grano desde el norte canadiense a territorio ruso.

Churchill tiene la característica de estar conectada con el resto de Canadá únicamente mediante una vía férrea y un aeródromo, además del puerto, pues carece de carreteras hacia el resto del territorio. Así, las mercancías llegaban directamente hasta el puerto para ser embarcadas rumbo a Islandia y Europa. Cabe decir que el comercio desde este puerto ha caído con el paso del tiempo, lo que pone en riesgo la supervivencia de esta ruta marítima comercial.

Esta ruta recorre la Bahía de Hudson desde su extremo suroeste (donde se encuentra Churchill) hasta el Estrecho de Hudson, al noreste, siguiendo hacia el este para desembocar en el Mar de Labrador, desde el cual se puede transitar al Atlántico Norte para pasar, posteriormente, a Islandia y al Mar de Barents, en el que se encuentra Murmansk.

Debido a la extensión que alcanza la placa de hielo del Ártico sobre el norte de Canadá, por su configuración en islas (pues esta región es ocupada por el Archipiélago Ártico Canadiense) que permite la extensión del frío clima del Océano Glacial Ártico sin la oposición del clima continental del interior del continente norteamericano, la placa de hielo suele ocupar toda la Bahía de Hudson, Estrecho de Hudson y parte del Mar de Labrador durante los meses de invierno, paralizando la ruta hasta el mes de mayo, con la fusión del hielo y hasta el mes de septiembre, que es cuando comienza de nuevo a formarse la placa con la llegada del invierno. [96]

Capítulo II.V.c. Paso del Noroeste.

El Paso del Noroeste (conocido como Northwest Passage, o NWP) es una ruta de navegación que une el norte del Pacífico (a través del Estrecho de Bering) y el Mar de Beaufort con el Atlántico Norte, atravesando las aguas entre el Archipiélago Ártico Canadiense y la Bahía de Buffin y el Mar de Labrador. Esta es, probablemente, una de las dos rutas más factibles actualmente para unir los puertos de Asia con los puertos de Europa rápidamente. Sin embargo, el NWP cuenta con una serie de inconvenientes que dificultan su elección como la mejor ruta posible en aguas del Océano Glacial Ártico.

En primer lugar, la falta de puertos o infraestructuras en todo el recorrido hacen de esta una región aún más inhóspita que la costa de Siberia, en la que a pesar de la falta de infraestructuras si existen algunos puertos repartidos a lo largo del recorrido de la RMN. Canadá, por el contrario, no posee ningún puerto de interés en esta área, aunque existan comunidades diseminadas por el territorio del norte de Canadá y Archipiélago Ártico Canadiense.

Otra pega, al igual que ocurriera en la RMN, es que Canadá considera las aguas y estrechos por los que discurre el NWP como aguas interiores, algo a lo que, en virtud de la UNCLOS, muchos países se oponen y argumentan que dichos estrechos deben ser considerados como estrechos internacionales, permitiendo el libre tránsito sin la necesidad de trámites y pago de peajes.

Por último y más importante, dadas las condiciones climáticas del norte de Canadá y la geografía del lugar, siendo un gran archipiélago con múltiples entradas desde el Océano Glacial Ártico, la placa de hielo se vuelve especialmente persistente en muchos de los estrechos que se dan en el NWP, haciendo que el tiempo en que esta ruta está disponible respecto a la RMN sea menor.

El recorrido detallado de la ruta, rumbo al este, comienza cruzando el Estrecho de Bering y entrando en el Mar de Chukotka. En este punto, un buque que tome el NWP se adentrará en el Mar de Beaufort hacia el este, bordeando la costa norte de Alaska y Canadá hasta los estrechos del Archipiélago Ártico Canadiense. Llegado este punto, hay varias posibles rutas a elegir para llegar al Mar de Labrador. Entre dichas posibles rutas navegables encontramos:

- Estrecho de McLure, que forma parte de la posible ruta más septentrional, además de la variante más directa. A través de este se llega al Estrecho de Lancaster tras pasar el Vizconde Melville Sound. Continuando hacia el Este se alcanza la Bahía de Baffin, al sur de la cual y tras atravesar el Estrecho de Davis se alcanza el Mar de Labrador y, por tanto, el Atlántico Norte.
- Golfo de Amundsen, en el extremo sureste del Mar de Beaufort, pasando al Estrecho del Príncipe de Gales al norte e incorporándose a Vizconde Melville Sound, lo que permite continuar la ruta como si hubiésemos accedido a través del Estrecho de McLure.

Es importante saber que, aunque el calentamiento global también afecta al deshielo en esta parte del Océano Glacial Ártico, el tránsito a través del Estrecho de McLure suele ser inviable por la cantidad de hielo presente en sus aguas, algo que también suele ocurrir con el Estrecho de Lancaster. Esto hace que, entre las rutas, no sea la mejor de las posibles. [97] [98] [99] [100] [101] [102] [103]

Capítulo II.V.d. Ruta Marítima del Norte.

La ya conocida Ruta Marítima del Norte (Northern Sea Route, NSR o Northwest Passage), de la que hemos hablado en múltiples ocasiones a lo largo de este trabajo, es la ruta que recorre la costa norte de Siberia desde el Estrecho de Bering y Mar de Chukotka hasta llegar a Europa.

Esta ruta, de tipo trans-ártica o intra-ártica en función del puerto de destino, se caracteriza por la influencia del clima continental de Siberia (más cálido que el clima polar del Océano Glacial Ártico) y la presencia de desembocaduras de ríos (como son Yeniséi, Lena, Obi o Kolyma, entre otros) con aguas más cálidas que las presentes en la costa. Esto hace que la fusión de la placa de hielo que durante el invierno alcanza las costas de Siberia ocurra mucho antes que en otras regiones, como es el caso del NWP. Al quedar las aguas libres de hielo antes, pudiendo ser navegables entre julio y septiembre, a veces incluso hasta octubre, el aprovechamiento de esta ruta es superior al de su principal competidora (por supuesto, el NWP).

Cabe destacar que el recorrido de la RMN transita, en su mayoría, sobre la plataforma continental de Rusia con limitaciones en el calado en algunas partes del recorrido. Por otra parte, al ser consideradas aguas territoriales de Rusia, es necesario solicitar con antelación permiso de paso, así como cumplir con todos los requisitos que se pudieran imponer, además de abonar las tasas correspondientes. Esto puede suponer pérdidas de tiempo si no se lleva a cabo con suficiente antelación.

Pero, en cambio, esta ruta cuenta con varios puertos ubicados a lo largo de su recorrido. Esto hace que, aunque el panorama general del recorrido sea inhóspito y desolado, se cuente con lugares de paso en el camino, que pueden servir para hacer paradas en caso de urgencia, por ejemplo. La RMN cuenta también con varios centros dedicados a labores SAR a lo largo de su recorrido, algo que no ocurre en ninguna de las demás rutas que naveguen en aguas del Océano Glacial Ártico. Otra ventaja de la RMN es la presencia de la empresa estatal federal rusa Atomflot (o Rosatomflot, parte del grupo Rosatom, que es la Corporación Estatal para la Energía Atómica Rosatom, empresa pública encargada de los complejos nucleares en Rusia), que cuenta con varias bases en torno a la RNM y, además, con la mayor flota de rompehielos atómicos del mundo. La presencia de Atomflot garantiza que, a pesar de las dificultades que presentan las tareas SAR en la región, se cuente con buques capaces de llegar hasta buques siniestrados o en situación de emergencia.

La historia de esta ruta comienza con la llegada de la radio, los buques de vapor y los rompehielos. Gracias a estos avances tecnológicos se hizo posible plantear siquiera una ruta estable a través de esta región. Fue en 1932 cuando el profesor Otto Schmidt navegó la ruta al completo, desde Arkhangelsk (en el Mar Blanco) hasta el Estrecho de Bering en un solo verano, sin necesidad hacer la invernada correspondiente. Tras probar de nuevo la ruta en los dos años siguientes, la RMN se abrió de forma oficial a la explotación comercial en 1935. Así, en 1936 parte de la Flota del Báltico utilizó esta ruta camino al Pacífico, en preparativo de las actividades bélicas posteriores por parte de Japón. Es también en el año 1932 cuando se crea la Administración de la Ruta Marítima del Norte con Otto Schmidt como primer director, siendo el cuerpo encargado de esta ruta en la antigua Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas. Durante la Guerra Fría, y debido al aislamiento generado por la comunidad internacional, la URSS utilizó la RMN gracias a sus rompehielos atómicos, que encabezaban los convoyes y abrían paso por el hielo a los mercantes y buques militares de este país, dado que la RMN transcurre completamente en aguas de la URSS, lo que impedía bloqueos o protestas por parte de otros países. Además, y aunque la mayoría de datos siguen clasificados a día de hoy, se sabe que la URSS (junto con Estados Unidos) ganaron amplia experiencia en la

navegación submarina bajo el hielo del Ártico debido a las operaciones de espionaje y presión militar que la URSS y EEUU llevaban a cabo en estas aguas el uno contra el otro.

Se puede resaltar que la RNM se puede dividir en una parte oriental y una parte occidental según las condiciones del hielo, que tiende a fundirse en última instancia en el Archipiélago de Nueva Siberia, dificultando el paso entre ambos sectores. A parte de esta división, cuenta con varios puertos y rutas libre de hielos durante todo el año, como son los puertos de Murmansk en el sector occidental y los puertos de Petrapavlovsk en Kamchatka, Magadán, Vanino, Najodka y Vladivostok, en la costa rusa en el Pacífico, que forman parte del sector oriental. Por otra parte, y durante el verano en el Océano Glacial Ártico que permite la navegación debido al deshielo, se activan dos rutas regulares entre las ciudades de Murmansk y Dudinka en el sector occidental y entre Vladivostok y Pevek en el sector oriental. Los puertos entre Dudinka (situada en la ribera del río Yeniséi, que desemboca en el Mar de Kara) y Pevek (en la Bahía Chaunskaya, Mar de Siberia Oriental) cayeron en desuso tras la desintegración de la URSS, quedando sin rutas regulares y siendo abandonados paulatinamente.

El recorrido que describe la RMN, empezando desde el Estrecho de Bering con destino Murmansk transcurre de la siguiente forma: Al cruzar el Estrecho de Bering hacia el norte, el buque deberá poner rumbo al oeste siguiendo la costa de Siberia desde el Mar de Chukotka. Tras unas 350 nm de navegación con rumbo noroeste se llegaría al paso entre la Isla de Wrangler y el continente asiático, siendo recomendable pasar a media distancia entre ambos dado que es la zona de mayor calado (en torno a 50 metros). Tras este paso nos encontraríamos en el Mar de Siberia Oriental y deberíamos continuar con rumbo este noreste hasta el Archipiélago de Nueva Siberia (también conocido como Islas de Liajov) donde, dada la reducción drástica del calado, deberemos elegir con precaución el estrecho a transitar: Entre Siberia y la isla más al sur encontramos el Estrecho de Dmitri Laptev, con calados entre los 9 metros y los 15 en su centro, lo que dificultaría o haría imposible el tránsito de grandes buques. Entre las islas del sur y las del norte del archipiélago encontramos el Estrecho de Sánnikov, que con profundidades entre los 11 y los 19 metros también supone un riesgo para buques de amplio calado. En caso de no poder utilizar estos estrechos debido al calado del buque, deberíamos sobrepasar el archipiélago por el norte, llegando y superando los 77°N donde los calados sobrepasan los 50 metros fácilmente. Independientemente de la forma escogida, nos encontraremos en el Mar de Láptev (que es, con diferencia, el mar de los que componen el Océano Glacial Ártico con menores calados, convirtiéndolo en una zona de riesgo), a cuyo noreste se encuentra el siguiente objetivo, el Estrecho de Vilkitsky (punto de

máxima latitud de la RMN, con 78°N aproximadamente), entre las islas de Tierra del Norte y la península siberiana de Taymir. Este estrecho tiene una profundidad mínima de 62 metros en su zona central, por lo que no supone un problema en lo referente a calados. Tras esto nos encontraremos en el Mar de Kara, debiendo continuar hacia el sureste hasta el Estrecho de Kara (cuya profundidad mínima es de aproximadamente 35 metros en ciertos puntos). Tras esto habremos llegado al Mar de Pechora, a alrededor de 500 nm de navegación hasta el puerto de Murmansk. [104] [105] [106] [107] [108]

Pese a los problemas que esta ruta pueda generar, como son la división de la ruta en sectores hasta la fusión total del hielo, los problemas de calado debido a la escasa profundidad en el Mar de Láptev y oeste del Mar de Siberia Oriental y los inconvenientes respecto a las comunicaciones, navegación radioelectrónica o SAR, la RMN es la más fiable de las dos rutas disponibles para la navegación trans-ártica entre Asia y los puertos del norte de Rusia y Europa debido a las ventajas que tiene respecto a, por ejemplo, el NWP o la aún inviable TSR. Por ello, esta será la ruta seleccionada para la toma de datos en el Capítulo III.

Capítulo III. Composición de las ventanas de tiempo para la navegación en aguas del Océano Glacial Ártico.

En este último Capítulo, previo a la Conclusión final de este trabajo, deberemos establecer las ventanas de tiempo y, sumado a todos los datos expuestos, valorar si la navegación a través del Océano Glacial Ártico es realmente ventajosa o, por el contrario, las desventajas anulan completamente a las ventajas que pudiese dar a la flota mercante que la emplease como unión entre Asia y Europa o Norteamérica.

Para ello, un requisito indispensable será conocer las propiedades del agua marina, siendo la más importante su temperatura de congelación. Con ella podremos utilizar los datos recabados por el ECMWF para estimar en qué punto del año comienza la fusión del hielo en el Ártico, haciendo hincapié en qué datos utilizamos y de dónde se obtienen. Previo a extraer los datos de los ficheros del ECMWF, estableceremos varios puntos de referencia en los que tomar las temperaturas superficiales a lo largo de la RMN.

Sumado a esto, compararemos los datos sobre la extensión de la placa de hielo sobre el Océano Glacial Ártico para ver la tendencia de los máximos y mínimos de la misma, a fin de tener más datos con los que estimar la ventana de tiempo de cara al futuro.

En conjunto, con los datos obtenidos y analizados, la muestra debería ser lo suficiente fiable como para poder especular sobre el futuro de la ventana de tiempo para la navegación en el Océano Glacial Ártico.

Capítulo III.I. Propiedades físicas del agua de mar y su afección a la fusión de la capa de hielo del Ártico.

El primer paso para poder realizar una estimación correcta utilizando los datos de temperatura obtenidos del ECMWF es, de hecho, conocer cómo se comportan el agua de mar y el propio hielo en el Océano Glacial Ártico.

Las propiedades del agua de mar se pueden dividir en varias categorías, siendo las más interesantes para aproximarnos nuestro objetivo las propiedades térmicas, mecánicas y eléctricas. [109] [110]

Las propiedades térmicas del agua de mar dependen completamente del balance entre la energía absorbida de las radiaciones solares entrantes y la energía devuelta a la atmósfera. Así, mediante este balance (que se simplifica en pérdida o ganancia de calor), se define una de las características que más nos interesa del agua: su temperatura. Esta afectará a otras propiedades, como es el caso de la densidad del

agua y su reparto en los océanos, así como a su salinidad. La absorción de energía de las radiaciones solares, como norma general, dependen de la latitud. Esto se debe a que mientras que en regiones ecuatoriales la absorción de radiación es máxima, en regiones polares la devolución a la atmósfera por es también máxima.

Las propiedades mecánicas dependen de su salinidad, y son concretamente la densidad del agua de mar y la presión de la misma. La salinidad, principal variable de la que dependen las propiedades mecánicas, viene dada por las sales (principalmente cloruros, sulfatos y carbonatos) disueltos en el agua. Se mide en psu (practical salinity units), unidad basada en las propiedades eléctricas del agua, principalmente su capacidad conductiva por la presencia de las sales disueltas, siendo el psu equivalente a por mil (‰) o g/kg. Cabe destacar que la salinidad del agua de mar no es constante, existiendo variaciones en la salinidad tanto verticalmente (en función de la profundidad) como horizontalmente (dependiendo de la latitud y longitud). La salinidad influye, principalmente, en la conductividad eléctrica del agua marina, su densidad y, aún más importante, punto de congelación. Debido a esto, es otro de los factores que deberemos tener en cuenta para obtener una temperatura “estándar” de congelación del agua de mar en el Océano Glacial Ártico. [111] [112] [113]

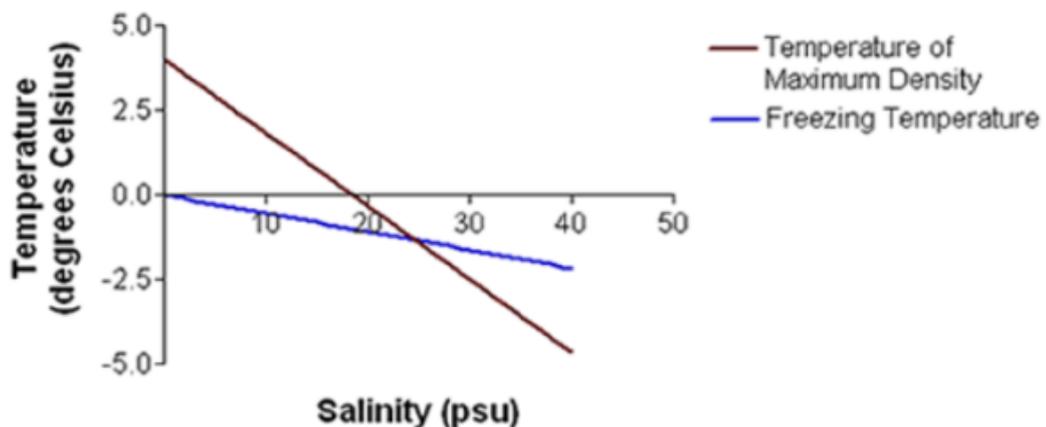


Ilustración 19. Relación entre salinidad (en psu) y temperatura (grados Celsius). Fuente: <https://diablobanquisa.files.wordpress.com/2016/10/psu.png>

Por último, las propiedades eléctricas del agua (también dependientes de la salinidad) consisten en la capacidad del agua marina como medio conductor de la electricidad. Esto se produce por la presencia de las moléculas de sales disueltas en el agua, que se disocian en iones positivos y negativos, que al verse sometidos a un campo eléctrico se

desplazan en sentido opuesto generando corrientes eléctricas. Gracias a esta propiedad conductora se puede determinar la salinidad del agua de mar con gran precisión.

Sabiendo esto, nos centraremos en las propiedades térmicas del agua de mar, su salinidad y, por supuesto, como afecta esta a la temperatura de congelación.

Capítulo III.I.a. Condiciones para la formación de hielo en aguas del Océano Glacial Ártico.

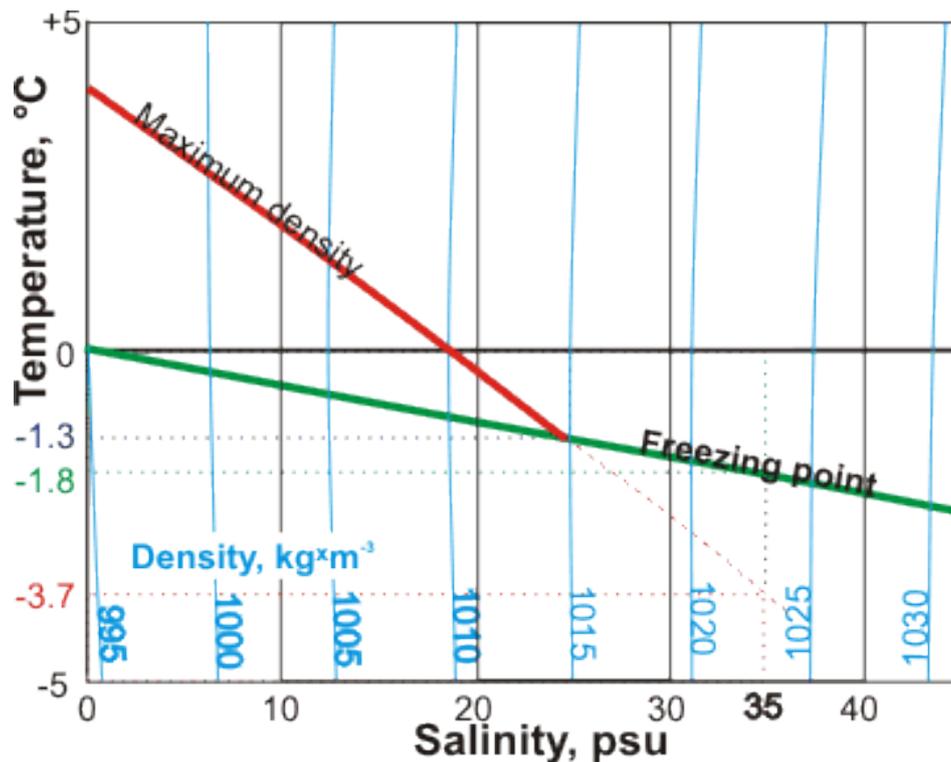
Es un dato muy conocido que la temperatura de congelación del agua dulce se encuentra en los 0°C , y que dicha temperatura es inversamente proporcional a la salinidad. Además, otro factor muy importante es la temperatura de máxima densidad del agua, que es el punto de temperatura en el que el agua alcanza su máxima densidad, cesando todo desplazamiento vertical y, por tanto, generando una estabilidad suficiente en la superficie como para que se enfríe y llegue a congelar.

El primer punto a tratar es el descenso de la temperatura de congelación del agua en función del aumento de salinidad. Como norma general, se considera que por cada 5 psu de incremento de la salinidad del agua la temperatura desciende en $0,28^{\circ}\text{C}$. En el Océano Glacial Ártico, según los estudios de la NSIDC, el psu promedio de cara a cualquier estudio es de 32 psu (más bajo que el de otros océanos, que van de 32 psu a 37 psu, debido a la influencia de los ríos siberianos y la fusión de la capa de hielo), pues se encuentra en el rango de 30 psu a 34 psu. Por tanto, se establece que la temperatura media de congelación del agua de mar en el Océano Glacial Ártico es de $-1,8^{\circ}\text{C}$ ($271,35\text{ K}$).

En segundo lugar, es importante tener en cuenta que el agua marina, al congelarse, expulsa las sales disueltas (formando depósitos llamados en inglés brine, salmuera) y queda como agua dulce en estado sólido. Esto da como resultado que la temperatura de fusión del hielo del Ártico sea, de hecho, 0°C . Debido a que la temperatura de congelación sea inferior a la de fusión del hielo, esta capa permanece en estado sólido de forma segura sobre la superficie oceánica hasta el aumento de la temperatura de la capa en sí misma o del aire circundante.

Por otra parte, no se puede decir que el agua de mar pueda alcanzar temperaturas de máxima densidad dada la salinidad y temperatura de congelación en las aguas del Océano Glacial Ártico, puesto que a partir de los 27 psu (con una temperatura de congelación de $-1,3^{\circ}\text{C}$) el agua no tiene temperatura de máxima densidad. De esta forma, el agua en el Ártico se repartirá verticalmente según su densidad sin llegar a un punto de máxima densidad y, por tanto, de estabilidad vertical (como ocurre con el agua

dulce en los lagos, con una temperatura de máxima densidad de 4°C y una temperatura de congelación de 0°C, debido a su cercanía a los 0 psu de salinidad). De esta forma, y debido a la gran diferencia de densidad entre la capa superficial y las inferiores (que hace que no existan prácticamente movimientos verticales entre ellas), la necesidad de que el agua se enfríe hasta los -1,8°C para comenzar a formar cristales de hielo no es necesario más allá de la capa superficial, que comprende unos 100 a 150 metros.



A partir de este punto, solo queda que el agua superficial se enfríe lo suficiente en el Océano Glacial Ártico como para empezar a formar hielo.

Capítulo III.I.b. Formación de hielo en el Océano Glacial Ártico.

La formación de hielo en estas aguas, vistas las condiciones de la misma para que esto ocurra, comienza cuando la temperatura cae por debajo de -1,8°C en la superficie.

Cuando esto ocurre, comienza la formación de hielo, en un principio en forma de pequeños cristales superficiales de apenas unos milímetros (con variedad de formas, como lenticulares, hexagonales o forma de agujas, según las condiciones ambientales).

Que al multiplicarse dan un aspecto grisáceo a la superficie oceánica. [114]

Si la superficie se encuentra en relativa calma, estos cristales comienzan a soldarse y unirse entre ellos formando una fina capa de hielo conocida como nilas, que al ser transparente permite ver el color oscuro del agua bajo ella. Según la nilas aumente su espesor irá adoptando el color blanquecino característico del hielo de reciente formación.

En caso de formarse en aguas turbulentas, los pequeños cristales de hielo que se forman en un principio se unen formando packs (denominados en inglés pancake ice), en forma de “tortas” o “galletas” de hielo. Estas chocarán con otras a su alrededor, uniéndose en capas de galletas de hielo pegadas las unas a las otras.



Ilustración 20. Nilas y Pancake Ice. Fuente: Elaboración propia a partir de <https://www.usgs.gov/media/images/young-ice> y http://icestories.exploratorium.edu/dispatches/wp-content/uploads/2008/04/ice_pancakeice2.jpg

A partir de la formación de nilas o pancake ice, el hielo irá acumulándose y creciendo en espesor hasta formar una capa de hielo o banquisa propiamente dicha. Por la parte superior, el hielo será cubierto por las precipitaciones (generalmente en forma de nieve) mientras que por su zona de exposición al agua marina seguirá creciendo mientras las condiciones de temperatura y salinidad lo permitan. El crecimiento del hielo se mide en cm/día, decreciendo este según aumenta el espesor de la capa de hielo debido al aislamiento cada vez mayor del agua de mar debido al hielo. La siguiente gráfica representa la tendencia general del crecimiento en función del espesor.

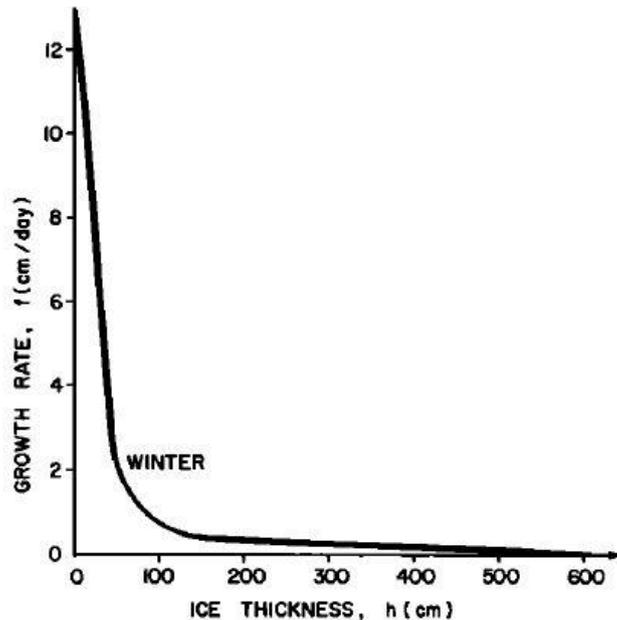


Ilustración 21. Relación de crecimiento de la placa de hielo, en función del espesor. Fuente: <https://forum.arctic-sea-ice.net/index.php/topic,119.msg69659.html#msg69659>

Durante el invierno las capas de hielo pueden llegar a alcanzar los 2 metros en condiciones favorables. Si sobreviven al siguiente verano, pasará a denominarse hielo multianual y debido a los procesos de congelación del siguiente invierno su contenido en sales (que, como vimos anteriormente, son expulsadas por el agua al congelarse) se reduce drásticamente (el hielo de primer año ronda las 10/1000 partes de sal, mientras que el hielo multianual suele estar por debajo de 2/1000 partes) lo que contribuye a aumentar su resistencia (pues incrementa su rigidez y solidez), haciendo que sobrevivir durante más inviernos sea más probable con cada invierno. En caso de llegar a esta etapa, el espesor promedio del hielo multianual es de 3 metros, con pocas variaciones debido a los ciclos de fusión y congelación del verano e invierno. Es importante saber esto de cara a la navegación en aguas del Océano Glacial Ártico, pues el Código Polar se basa en estas definiciones a la hora de establecer los límites de los buques según su categoría.

Capítulo III.II. Puntos de referencia en el recorrido de la RMN.

Ahora que conocemos las propiedades a tener en cuenta en las aguas del Océano Glacial Ártico, debemos establecer puntos de referencia a lo largo de la Ruta Marítima del Norte de los que extraer los datos de temperatura superficial necesarios para estimar la navegabilidad de la zona según la fecha.

Previamente a establecer los puntos, vamos a consultar hasta donde se extiende la placa del Ártico a lo largo del año y, concretamente, los meses en que comienza la fusión de la misma. De esta forma podremos saber cuáles son las zonas que, por lo general, tardan más en descongelarse. Con esto, podremos saber qué puntos de la ruta son críticos desde el punto de vista de la liberación de las aguas de cara a la navegación de los buques.

Tomando como referencia el día 12 de julio, pues según los datos del NSIDC esta es la fecha previa al total deshielo de la Ruta Marítima del Norte (que ocurrió en torno al día 15 de julio) en el año 2020, vamos a observar las gráficas de hielo en la región para los días previos a la completa liberación de la ruta en los últimos 5 años (desde el 2020 hasta el año 2014). De esta forma podremos establecer los puntos de referencia en las zonas que, por lo general, más tardan en despejarse de hielo.

Esto también tiene un doble propósito, pues el hecho de comprobar en que fechas el hielo estaba a punto de librar la RNM completamente nos puede dar una idea de la tendencia que pueda existir en las fechas de apertura de la ruta. Por otra parte, es importante tener en cuenta que la ausencia de hielo en forma de placa no implica que no existan icebergs u otras formas de hielo flotante a la deriva en alguna parte del trayecto.

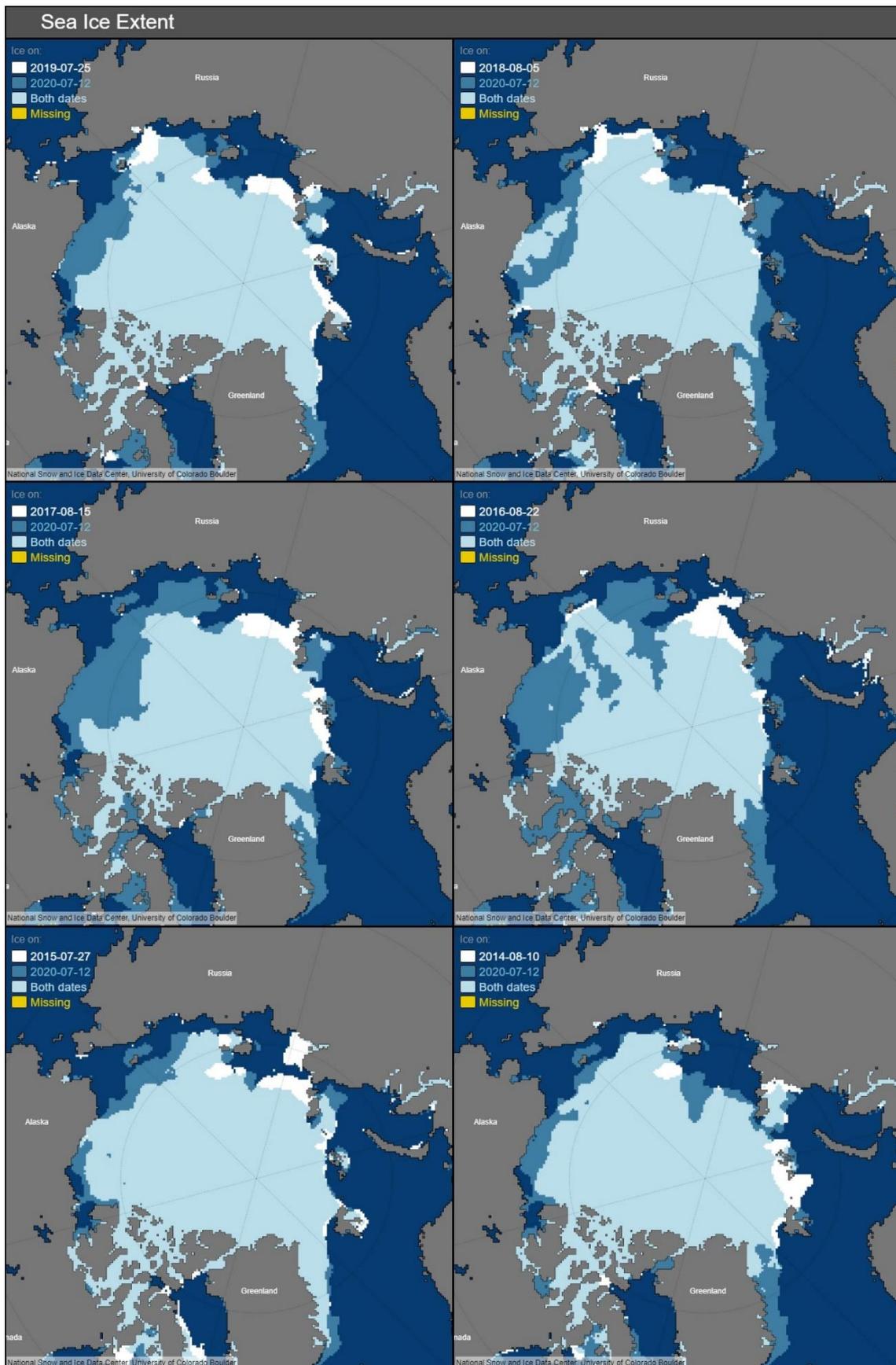


Ilustración 22. Extensiones de la placa de hielo ártica. Fuente: Elaboración propia a partir de <http://nsidc.org/arcticseaicenews/sea-ice-comparison-tool/>

Con estas imágenes como referencia (todas de, como máximo, 4 días antes de la liberación completa de la RMN) podemos localizar varias zonas que, aparentemente, son críticas en la completa liberación de la ruta. Aunque aparentemente se podría (atendiendo a las fechas en que la ruta queda libre)

En total, son seleccionadas 6 zonas diferentes a lo largo del recorrido de la RMN. Varias de estas zonas de referencia son de aquellas zonas críticas por su tardía fusión de la placa de hielo ártica, mientras que otras, aun sabiendo que pierden la capa de hielo rápidamente en los meses de verano (como es el caso del Estrecho de Bering y el Mar de Chukotka), se seleccionan por su interés como inicio o destino de la ruta durante su fase trans-ártica.

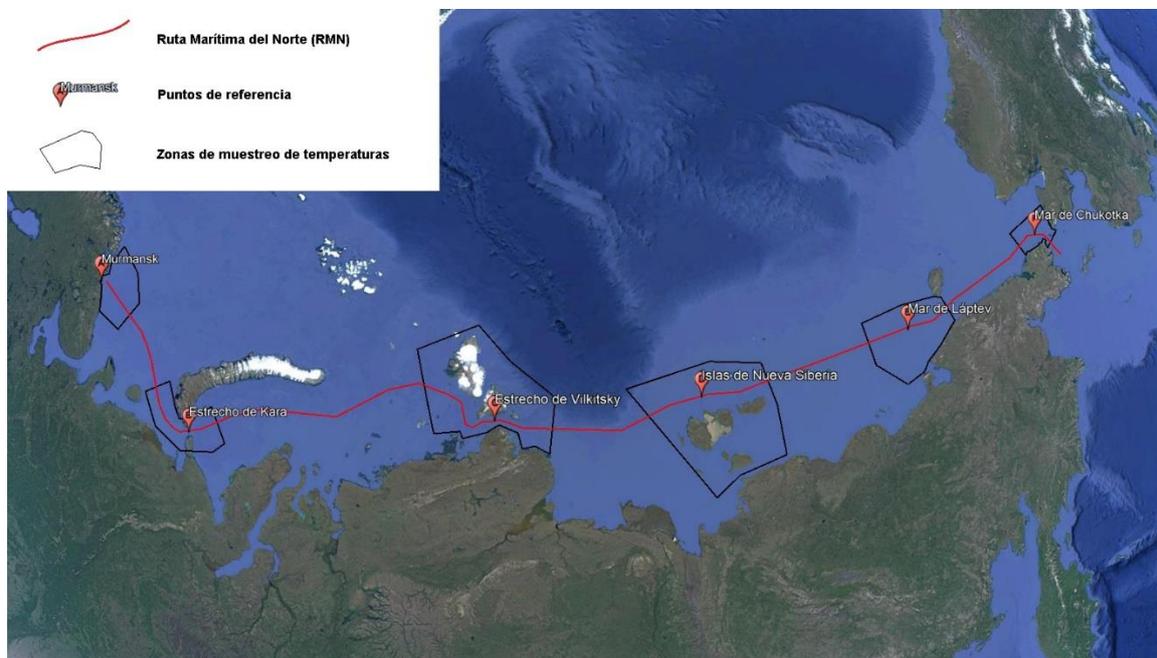


Ilustración 23. Ruta Marítima del Norte y zonas de referencia. Fuente: Elaboración propia.

La RMN trazada sigue el recorrido de menos distancia posible (tan solo 3.600 nm) con una profundidad mínima de 24 metros localizada entre la Isla de Wrangler y las costas de Siberia. Tal y como está configurada, la ruta trazada a través de las aguas del Océano Glacial Ártico recorre la mínima distancia posible, navegando de forma que la profundidad siempre permita pasar a buques de hasta 20 metros de calado, por lo que los grandes mercantes podrían utilizar esta ruta nexa entre los puertos de Asia y de Europa.

Los puntos de referencia en cuestión serán, de oeste a este:

- Murmansk: Como puerto más importante de Rusia en la región y, además, puerto libre de hielo durante todo el año, se toma como inicio de la RMN trazada.
- Estrecho de Kara: Por ser uno de los 4 estrechos de la ruta, y además una zona con posibilidad de albergar hielo durante el verano ártico, aunque suele estar despejada para el momento en que la RMN se encuentra libre de hielo.
- Estrecho de Vilkitsky: Posiblemente uno de los puntos críticos de la ruta, casi a mitad de camino de la misma, suele ser uno de los últimos puntos que pierde la capa de hielo durante el verano.
- Islas de Nueva Siberia: Otro de los puntos críticos de la ruta debido a la tardía fusión del hielo respecto a otras zonas, es además una zona de profundidades mínimas que puede suponer un riesgo para tripulaciones poco experimentadas o mal preparadas. Elegimos trazar la ruta al norte de las islas en lugar de cruzando los estrechos para garantizar el paso de buques de hasta 20 metros de calado con seguridad.
- Mar de Láptev: Zona seleccionada al oeste de la Isla de Wrangler y al norte de la Bahía de Chaunskaya y el puerto de Pevek, en el sector oriental de la RMN. Es otro de los puntos de fusión tardía y, por tanto, zona de muestreo de temperaturas de alto valor.
- Mar de Chukotka: El Mar de Chukotka es de las zonas que antes pierde la cobertura helada al llegar el verano, pero es una zona de alto interés dado que supone el final (o inicio) de la ruta hacia (o desde) el Pacífico.

Ahora, teniendo claras las características del agua de mar a las que debemos atender y habiendo seleccionado las áreas de muestreo a lo largo de la Ruta Marítima del Norte, estamos listos para recabar y presentar los datos de temperatura de las zonas de muestreo seleccionadas.

Capítulo III.III. Presentación de datos y construcción de la ventana de tiempo.

En esta última parte presentaremos los datos a utilizar para elaborar las ventanas de tiempo disponibles para el tránsito por la RMN. Pero, previa a la presentación de los datos, debemos saber quién y de donde los obtiene. Tras esto, se expondrá la forma en que los datos son gestionados para su posterior presentación y análisis.

Capítulo III.III.a. El ECMWF.

Los datos de temperatura que utilizaremos en la elaboración de las ventanas de tiempo son tomados por el ECMWF desde 1978. Concretamente, disponemos de datos tomados desde el año 1978 hasta el año 2017.

Es importante destacar que, de cara a los estudios sobre meteorología, se utilizan periodos de 30 años de mediciones que son conocidos como “normales climatológicas”. Estos periodos de 30 años son los utilizados a la hora de hacer predicciones o comparar eventos meteorológicos ocurridos con similares en el pasado. Las normales climatológicas se actualizan terminados los periodos de 30 años. [115]

La ECMWF, además, nos provee de 3 tipos de datos diferentes entre ellos: SST, SKT y T2M. SST son las siglas de Sea Surface Temperature, tomada solo de la superficie de los diversos cuerpos de agua del mundo. SKT significa Skin Temperature, que es la temperatura superficial del planeta, incluyendo superficie terrestre. Por último, T2M significa Temperature 2 Meters, que es la temperatura a dos metros de la superficie (sea terrestre o acuática), es decir, de la capa de aire sobre el suelo. En nuestro caso, el conjunto de datos que realmente es útil para cumplir con los objetivos propuestos es el SST, pues es el que realmente puede determinar la presencia o ausencia de placa de hielo sobre las aguas del Océano Glacial Ártico.

Capítulo III.III.b. Muestras de temperatura.

Este es, sin contar la conclusión, es el último apartado de este trabajo y se basará totalmente en la exposición de datos SST para algunas regiones designadas según se explica abajo.

El modo en el que procesaremos los datos será el siguiente: Se mostrará gráficamente la evolución de la placa, en máximos y mínimos, a lo largo de los últimos 30 años (una imagen del máximo y mínimo de la placa cada 5 años, entre 1987 y 2017). Por último, se mostrará una composición de los máximos y mínimos de 1987 y 2017 acompañados de la gráfica de temperaturas SST de toda la normal climatológica para 4 zonas designadas del Océano Glacial Ártico. Tras esto, se expondrán las gráficas de temperatura para los puntos de referencia de la RMN designados como Estrecho de Kara, Estrecho de Vilkitsky, Islas de Nueva Siberia y Mar de Láptev. Las gráficas de estos 4 puntos de referencia mostrarán la evolución de la temperatura anual durante el año 2017 y durante 2007, pudiendo ver su tendencia, así como la gráfica de la normal meteorológica 1987 a 2017.

Dadas las limitaciones técnicas y la imposibilidad de acceder a un centro de cálculo o similar en el que procesar los datos del ECMWF, para poder comprobar la variación de la temperatura del Ártico se delimitarán una serie de regiones de muestra según se muestra en la imagen, obteniendo la tendencia de la temperatura en los 30 años entre 1987 y 2017.

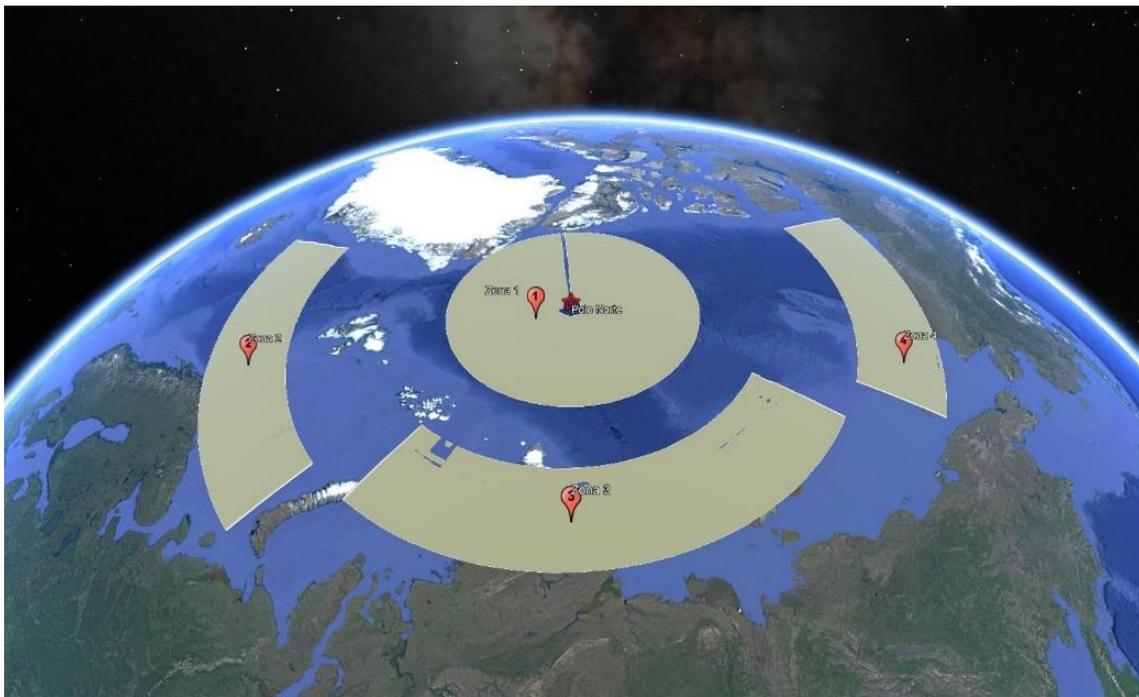


Ilustración 24. Zonas de referencia en el Océano Glacial Ártico. Fuente: Elaboración propia.

Zona 1. Temperaturas y Tendencia 1987-2017.

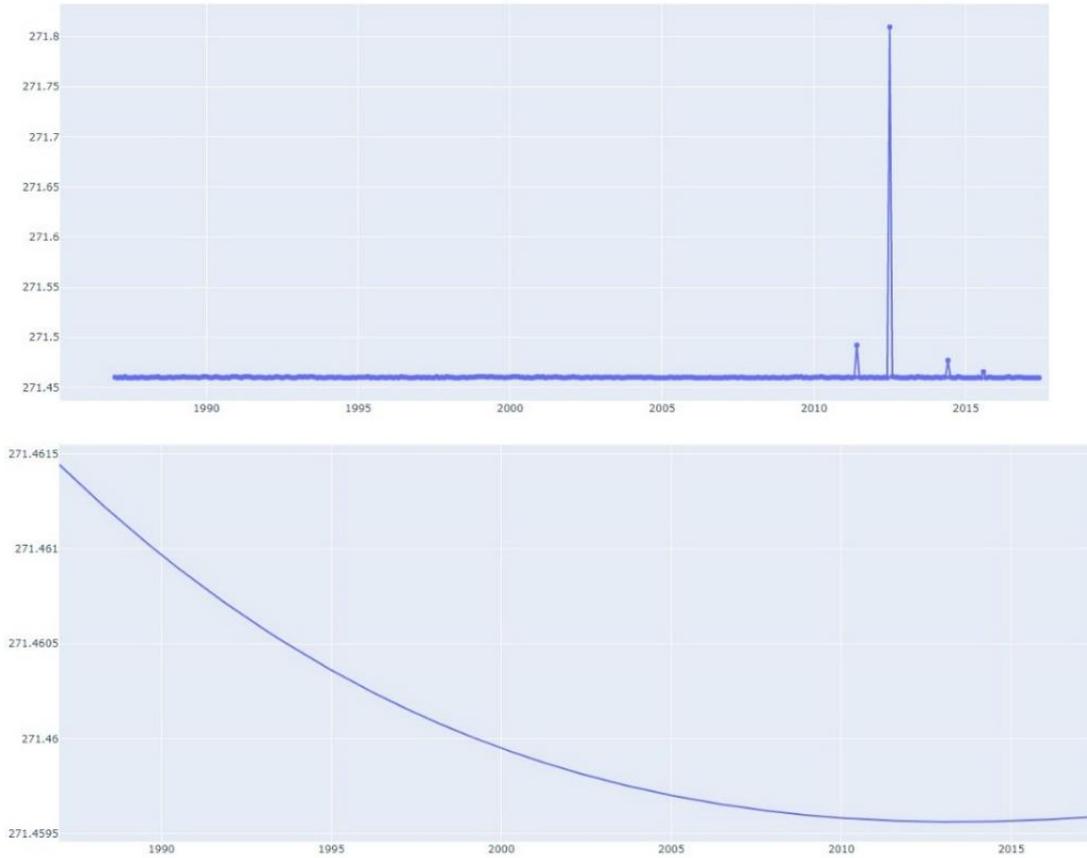


Ilustración 25. Temperatura y Tendencia de la Zona 1. Fuente: Elaboración propia.

Zona 2. Temperaturas y Tendencias 1987-2017.

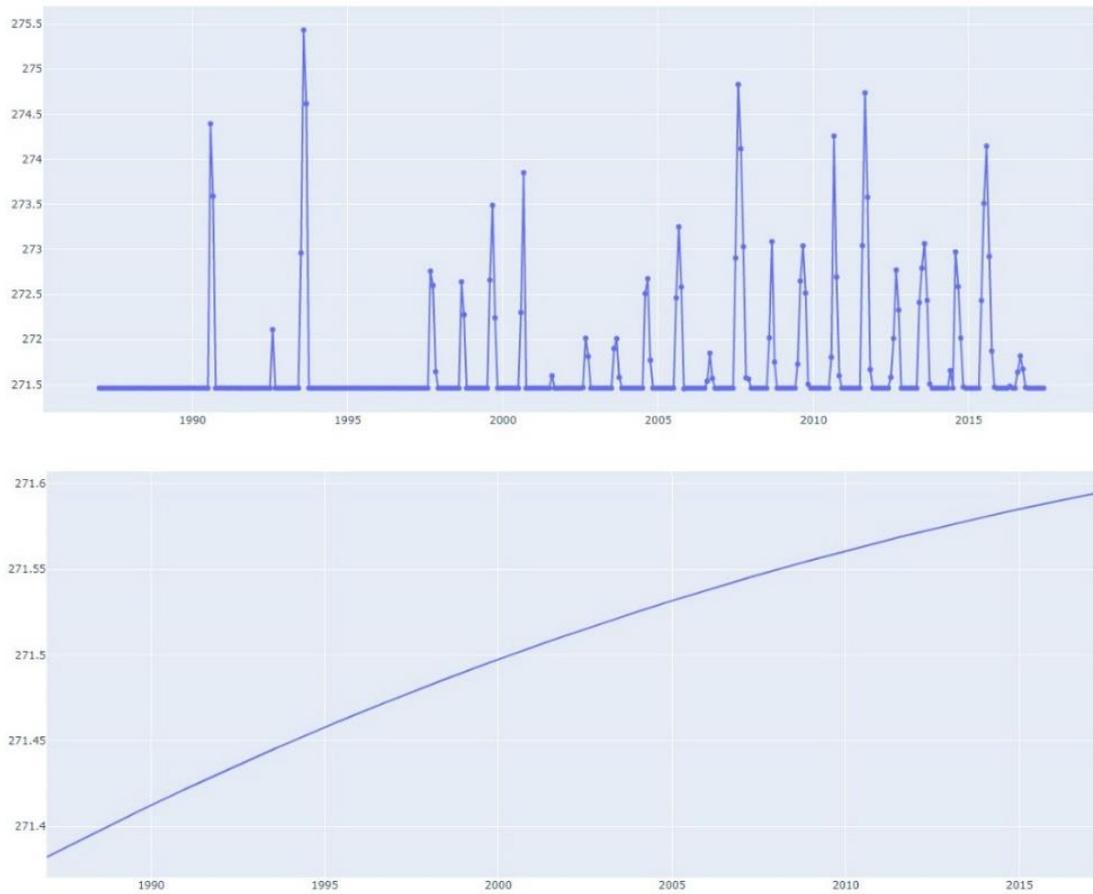


Ilustración 26. Temperatura y Tendencia de la Zona 2. Fuente: Elaboración propia.

Zona 3. Temperatura y Tendencias 1987-2017.

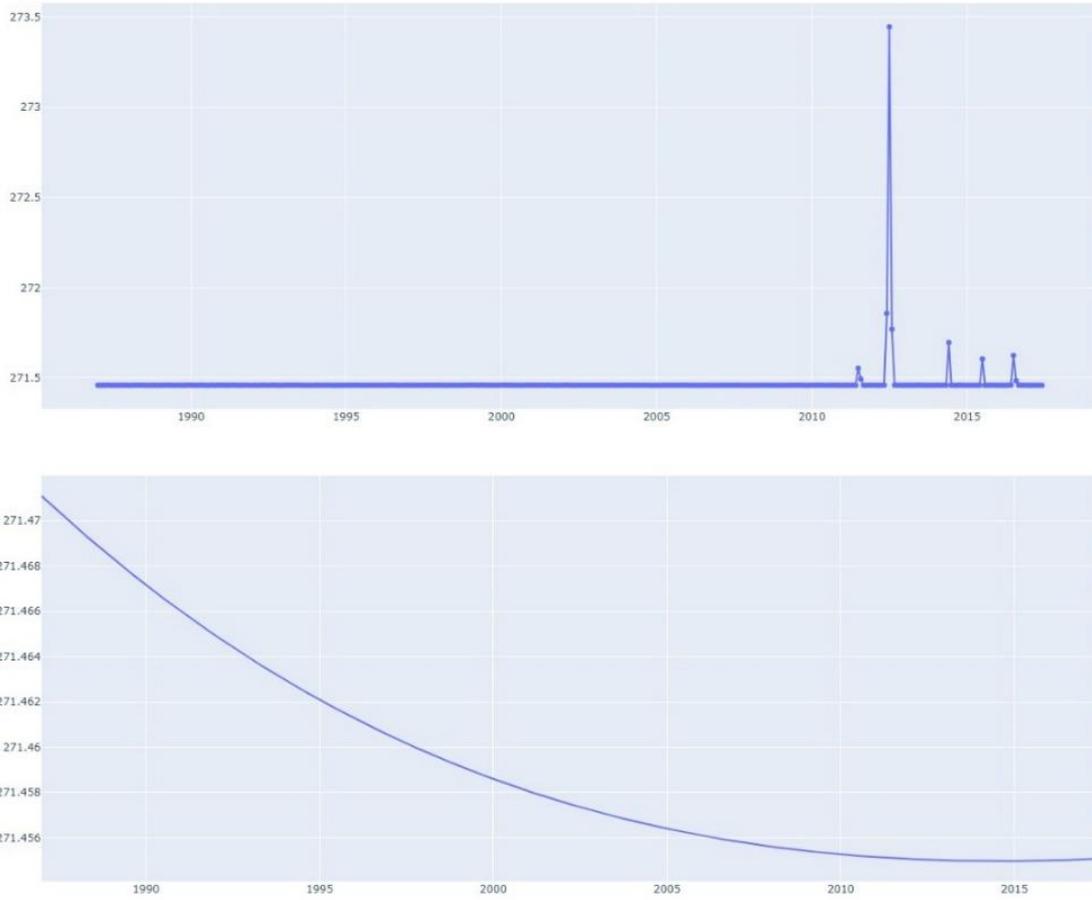


Ilustración 27. Temperatura y Tendencia de la Zona 3. Fuente: Elaboración propia.

Zona 4. Temperatura y Tendencias 1987-2017.

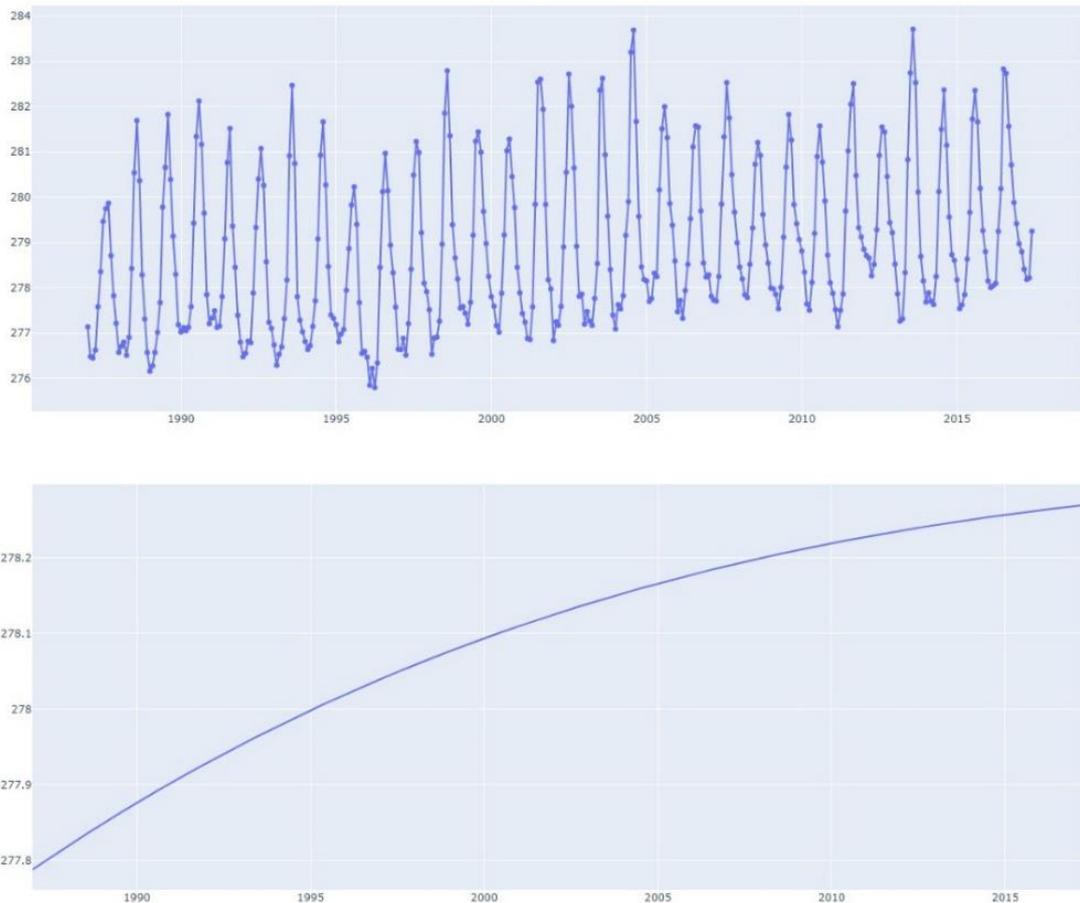


Ilustración 28. Temperatura y Tendencia de la Zona 4. Fuente: Elaboración propia.

Según las gráficas de las zonas, se puede apreciar que conforme nos acercamos al presente son más comunes los picos de temperatura. Además, por cómo se comportan las tendencias, se podría llegar a la conclusión de que, en la normal meteorológica entre 1987 y 2017, las temperaturas tienden a subir en las zonas en contacto con el Océano Pacífico y Atlántico (Zona 4 y Zona 2, respectivamente), mientras que las aguas en las Zonas 1 y 3, inmersas en el Océano Glacial Ártico, tienden a disminuir su temperatura con el paso del tiempo. Esto es algo que podemos constatar atendiendo a las extensiones máximas y mínimas de la banquisa del Ártico, pues se podrá ver que se reduce en mayor medida en las inmediaciones de las Zonas 2 y 4.

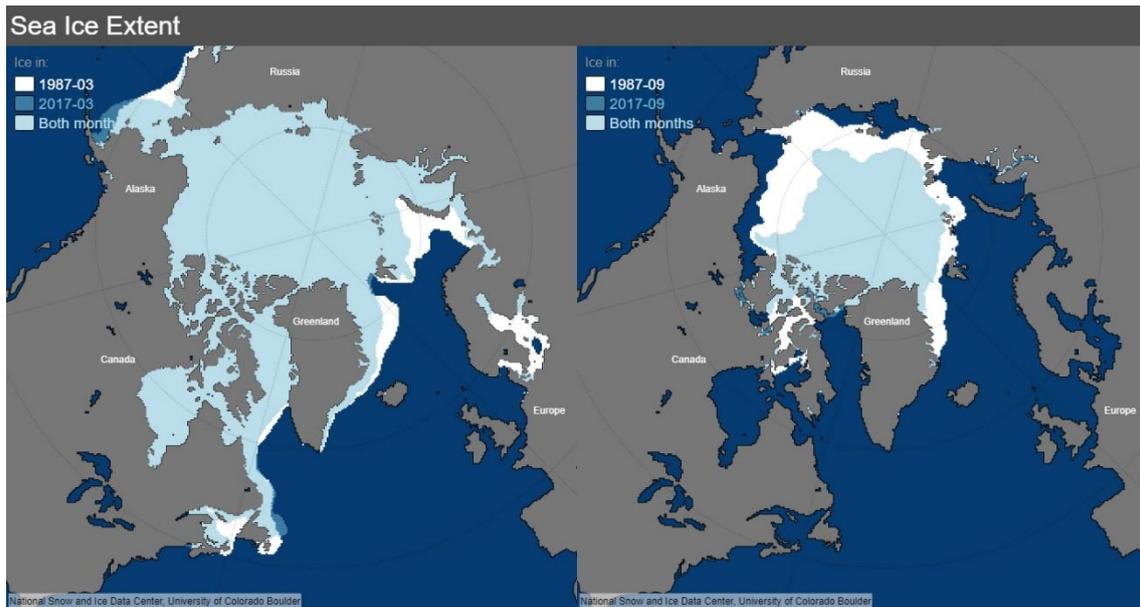


Ilustración 29. Extensiones de la placa de hielo ártica. Fuente: Elaboración propia a partir de <http://nsidc.org/arcticseaicenews/sea-ice-comparison-tool/>



Ilustración 30. Extensiones de la placa de hielo ártica. Fuente: Elaboración propia a partir de <http://nsidc.org/arcticseaicenews/sea-ice-comparison-tool/>

Tras haber comprobado que esto se cumple y que, efectivamente, la pérdida de hielo en la banquisa sobre el Océano Glacial Ártico y las temperaturas en la zona van en ligero aumento, toca exponer los datos extraídos de los puntos de referencia a lo largo de la Ruta Marítima del Norte.

Previo a esto, debemos recordar que la temperatura objetivo a la que el agua de mar en el Ártico se congela es de $-1,8^{\circ}\text{C}$ (271,35 K), por lo que todo aquel registro por encima

de esta en las gráficas implicará aguas con hielo en proceso de fusión o libre de hielos en los meses correspondientes. Por otra parte, cabe destacar que, por motivos desconocidos y ajenos a mi persona, los datos para los puntos de referencia del Estrecho de Vilkitsky y de las Islas de Nueva Siberia se presentan de forma extraña, tanto en el registro de temperaturas como en la tendencia de la misma respecto al tiempo. Al no ser capaz de resolver este inconveniente, pues desconozco su causa, los datos de dichas referencias serán introducidos tal y como son extraídos del programa.

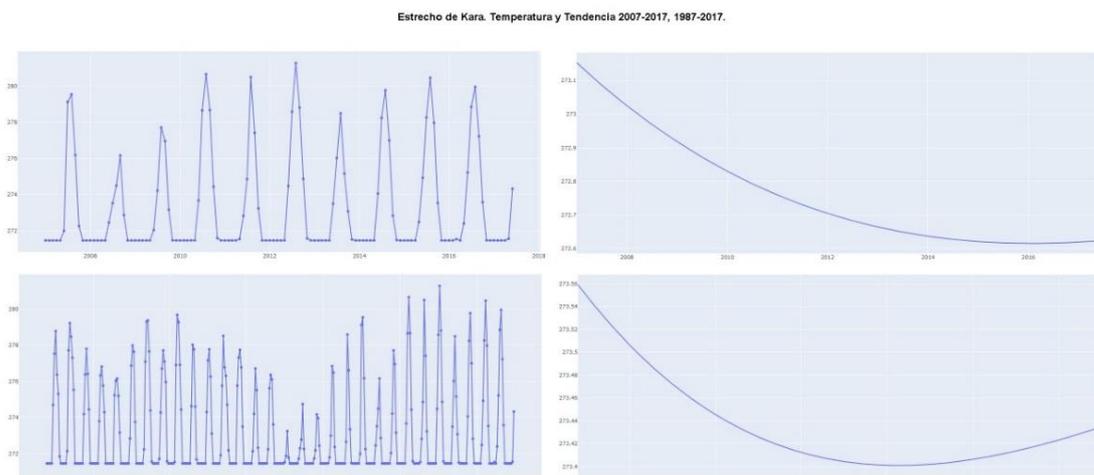


Ilustración 31. Temperatura y Tendencia en el Estrecho de Kara. Fuente: Elaboración propia.

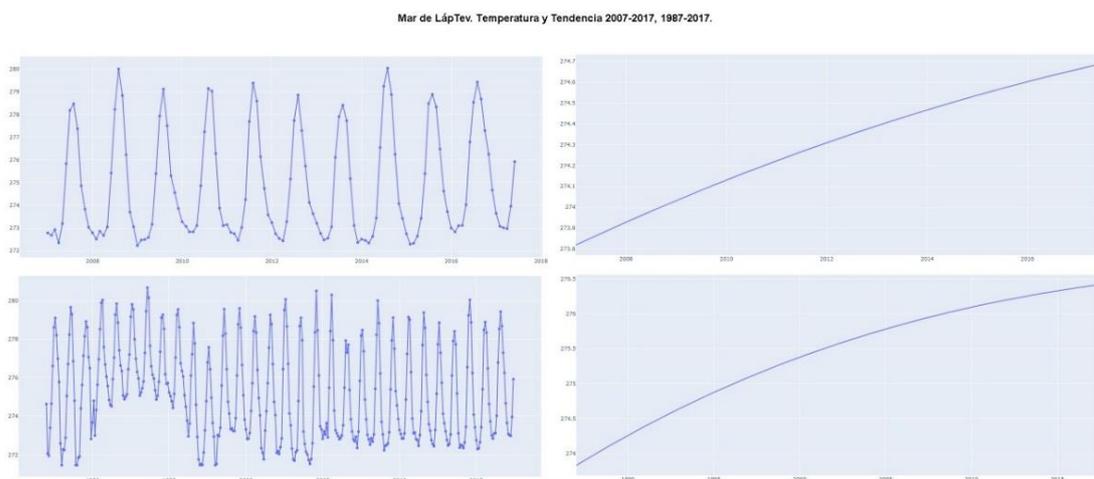


Ilustración 32. Temperatura y Tendencia en el Mar de Láptev. Fuente: Elaboración propia.

Islas de Nueva Siberia. Temperatura y Tendencia 2007-2017, 1987-2017.

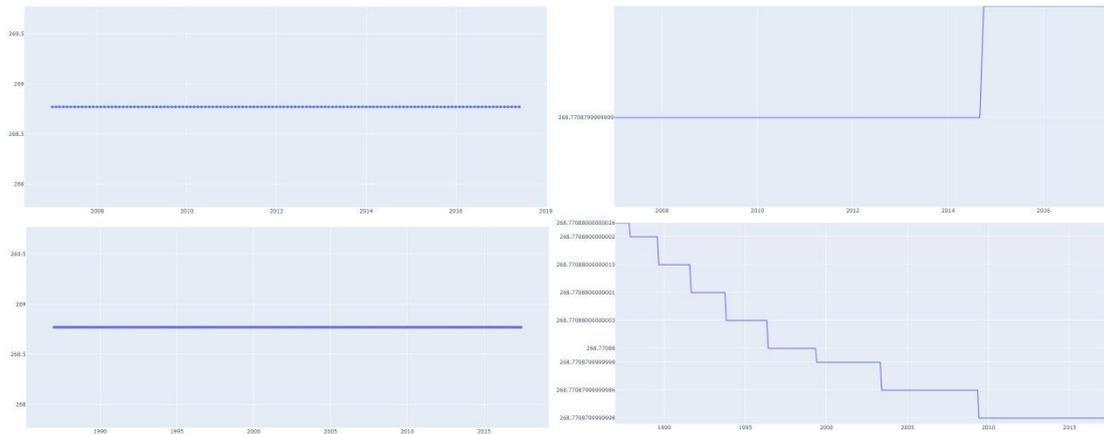


Ilustración 33. Temperatura y Tendencia en las Islas de Nueva Siberia. Fuente: Elaboración propia.

Estrecho de Vilkitsky. Temperatura y Tendencia 2007-2017, 1987-2017.

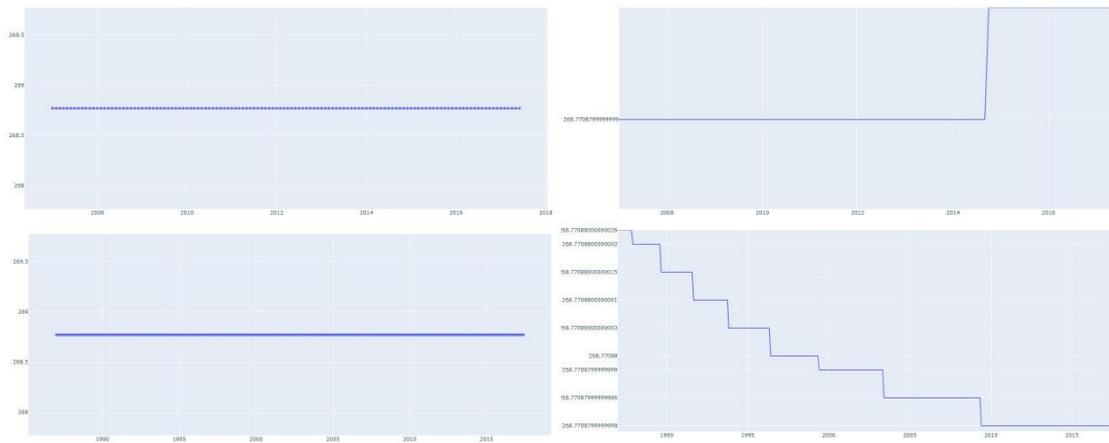


Ilustración 34. Temperatura y Tendencia en el Estrecho de Vilkitsky. Fuente: Elaboración propia.

De esta forma, podemos ver que las temperaturas en dos lugares tan opuestos como el Mar de Láptev y el Estrecho de Kara tienen actualmente una tendencia al alza, lo que significará, de continuar, un futuro de deshielo en el Ártico y una RMN libre de hielos desde antes cada verano ártico. Por otra parte, los datos tanto del Estrecho de Vilkitsky y las Islas de Nueva Siberia presentan el mismo error, aparentemente, lo que dificulta entender que representan. Pero, en el caso de las tendencias al menos, parece que se esté representando una tendencia al alza y una a la baja respectivamente.

Con todos los datos presentados y antes de pasar al apartado de Conclusión, debemos estimar las ventanas de tiempo para la RMN. Gracias a los datos obtenidos del NSIDC sobre las extensiones de la capa de hielo, así como los datos de temperatura y los

múltiples informes y fuentes de información al respecto que se han consultado para la redacción de este texto, podemos estimar que la RMN queda libre de hielo completamente todos los años durante la primera quincena de agosto. Aunque es reseñable el hecho de que esta fecha puede adelantarse o retrasarse en caso de anomalías climáticas (como ocurriera en 2012, año en que se registró el record de mínima extensión (y, por tanto, máxima fusión de la capa de hielo del Ártico). Por otra parte, y dada la dificultad que existe para desarrollar modelos para la previsión de hielo con niveles de precisión adecuados, la tarea de predecir en que ventana de tiempo estará disponible la Ruta Marítima del Norte es ardua y extremadamente compleja. Lo que es seguro es que, de continuar el ritmo de emisiones por parte de la humanidad y, de esta forma, el calentamiento global que provoca, esta ventana aumentará hasta que llegue a ocupar todo el verano Ártico o, incluso, todo el año). Y esto abrirá de forma definitiva las rutas árticas, así como la opción al desarrollo de las costas de Siberia.

Conclusiones.

Tras un largo recorrido, en el que hemos valorado todas las posibles variables de la navegación a través de las aguas del Océano Glacial Ártico (con el que comenzábamos este trabajo), tenemos finalmente sobre la mesa todos los datos necesarios para poder meditar y opinar sobre la navegación a través de las rutas del Ártico.

La principal ventaja, central en la argumentación a favor de, por ejemplo, la Ruta Marítima del Norte como sustituta de la ruta del Canal de Suez es el ahorro de distancia que supone recorrer las aguas del Ártico en lugar de la ruta a través del Índico, Mediterráneo y Atlántico, pues como pudimos comprobar, se podía recortar hasta el 37%, lo que puede llegar a suponer un ahorro de hasta 4.000 nm. Por otra parte, este recorte en distancia supone, paradójicamente, un aumento del tiempo de travesía respecto a la ruta del Canal de Suez debido a las bajas velocidades que se pueden desarrollar en el Océano Glacial Ártico debido a las malas condiciones de navegación que se dan, como norma general.

Pero hay muchas desventajas en usar esta ruta, pues desde las comunicaciones y la navegación hasta los trámites administrativos y tasas que se deben pagar, sin olvidar las limitaciones de calado de la ruta en ciertas zonas y la escasa disponibilidad de la ruta, de tan solo dos meses, tres en el mejor de los casos.

Aunque al comienzo del estudio y composición de este Trabajo de Final de Grado la intención era establecer como una alternativa viable y duradera las rutas de navegación a través del Océano Glacial Ártico (concretamente, la Ruta Marítima del Norte), tras profundizar en dicho tema y conocer todas las desventajas y ventajas llego a la conclusión de que, desde un punto de vista práctico, es mejor utilizar las rutas convencionales probadas a lo largo de décadas, dadas las enormes dificultades que supone la navegación por el Ártico, que aunque rentables debido al recorte de distancia se vuelven menos prácticas por la pérdida de tiempo, elemento esencial en el éxito de las rutas marítimas comerciales.

Conclusions.

After a long development in which we've studied all the possible variables of navigation through the waters of the Arctic Ocean (with which we began this work), we finally have on the table all the necessary data to be able to judge and talk about navigation through the Arctic routes.

The biggest advantage (central in the argument in favor of, for example, the Northern Maritime Route as a substitute for the Suez Channel Route) is the distance saved when we use routes through arctic waters instead of the route through the Indian, Mediterranean and Atlantic, because as we could see, it could be cut up to 37%, which can lead to save up to 4,000 nm. On the other hand, this reduction in distance supposes an increase in navigation time respect to the Suez Canal route due the low speeds that ships can develop in the Arctic Glacial Ocean because of to the poor navigation conditions that usually occur.

But there are many disadvantages in using this route from communications and navigation to administrative procedures and fees that must be paid, regarding too the limitations of the draft at the route in certain areas and the short time when the route is available, up to two months, three at best.

Although at the beginning of the study and composition of this Final Degree Project, the intention was to establish as a viable and lasting alternative the navigation routes through the Arctic Glacial Ocean (specifically, the Northern Maritime Route), but after deepening this topic and knowing all the disadvantages and advantages I get to the conclusion that (from a practical point of view) it's better to use the conventional routes proven over decades, because the many difficulties of navigating the Arctic, than although profitable due to the shortening commercial distance becomes less practical due to loss of time, essential elements in the success of maritime routes.

Bibliografía

- [1] J. McDermott, «Willoughby, Sir Hugh,» 2004. [En línea]. Available: <https://www.oxforddnb.com/view/10.1093/ref:odnb/9780198614128.001.0001/odnb-9780198614128-e-29599>.
- [2] «Richard Chancellor,» de *Encyclopedia of World Biography*, Detroit, Gale Virtual Reference Library, 1997.
- [3] R. Vaughan, *The Arctic: A History*, Sutton Publishing Ltd, 2007.
- [4] R. H. Fisher, *The Voyage of Semen Dezhnev in 1648: Bering's precursor*, Londres: Hakluyt Society, 1981.
- [5] B. Dymytryshyn, *Russia's Conquest of Siberia*, 1985.
- [6] H. Chisholm, *Encyclopedia Britannica: A Dictionary of Arts, Sciences, Literature, and General Information*, Encyclopedia Britannica.
- [7] <https://es.wikipedia.org/>, «Estrecho de Bering,» 6 8 2020. [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Estrecho_de_Bering#Historia.
- [8] <https://es.wikipedia.org/>, «Historia de la ciencia del cambio climático,» 4 7 2020. [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Historia_de_la_ciencia_del_cambio_clim%C3%A1tico.
- [9] <https://es.wikipedia.org/>, «Svante August Arrhenius,» 27 7 2020. [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Svante_August_Arrhenius.
- [1] «<https://nsidc.org/>,» [En línea]. Available: [https://nsidc.org/arcticseaicenews/charctic-interactive-sea-0\]_ice-graph/](https://nsidc.org/arcticseaicenews/charctic-interactive-sea-0]_ice-graph/).
- [1] <https://es.wikipedia.org/>, «Calentamiento Global,» 7 8 2020. [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Calentamiento_global.
- [1] N. Oreskes, «The Scientist Consensus on Climate Change,» 3 12 2004. [En línea]. Available: <https://science.sciencemag.org/content/306/5702/1686>.
- [1] «<https://cryo.met.no/en/>,» [En línea]. Available: <https://cryo.met.no/en/latest-ice-charts>.
3]
- [1] «<http://ocean.dmi.dk/>,» [En línea]. Available: <http://ocean.dmi.dk/arctic/icecharts.uk.php>.
4]
- [1] «<https://www.natice.noaa.gov/>,» [En línea]. Available: <https://www.natice.noaa.gov/ims/>.
5]

- [1] «<https://nsidc.org/>,» [En línea]. Available: [https://nsidc.org/arcticseaicenews/charctic-interactive-sea-6\] ice-graph/](https://nsidc.org/arcticseaicenews/charctic-interactive-sea-6] ice-graph/).
- [1] M. Nuttall, Encyclopedia of the Arctic, Volumes 1, 2 and 3, Routledge, 2004.
7]
- [1] «<https://dle.rae.es/>,» [En línea]. Available: [https://dle.rae.es/c%C3%ADrculo#5hpzpsV&o=h.8\]](https://dle.rae.es/c%C3%ADrculo#5hpzpsV&o=h.8])
- [1] «http://www.neoprogrammics.com/obliquity_of_the_ecliptic/,» [En línea]. Available: http://www.neoprogrammics.com/obliquity_of_the_ecliptic/.
9]
- [2] <https://es.wikipedia.org/>, «Océano Ártico,» 7 8 2020. [En línea]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/Oc%C3%A9ano_%C3%81rtico#/media/Archivo:IBCAO_betamap.jpg.0\]](https://es.wikipedia.org/wiki/Oc%C3%A9ano_%C3%81rtico#/media/Archivo:IBCAO_betamap.jpg.0])
- [2] <https://es.wikipedia.org/>, «Anexo: Islas del Ártico,» 19 1 2020. [En línea]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/Anexo:Islas_del_%C3%81rtico.1\]](https://es.wikipedia.org/wiki/Anexo:Islas_del_%C3%81rtico.1])
- [2] «<https://www.cia.gov/>,» [En línea]. Available: [https://www.cia.gov/library/publications/the-world-2\] factbook/geos/xq.html.2\]](https://www.cia.gov/library/publications/the-world-2] factbook/geos/xq.html.2])
- [2] «<https://www.ecured.cu/>,» 14 12 2019. [En línea]. Available: [https://www.ecured.cu/Oc%C3%A9ano_%C3%81rtico#Caracter.C3.ADsticas_del_fondo_del_oc.C3.A9ano_Glacial_.C3.81rtico.3\]](https://www.ecured.cu/Oc%C3%A9ano_%C3%81rtico#Caracter.C3.ADsticas_del_fondo_del_oc.C3.A9ano_Glacial_.C3.81rtico.3])
- [2] M. Pidwirny, «<http://www.physicalgeography.net/>,» 19 4 2010. [En línea]. Available: [http://www.physicalgeography.net/fundamentals/8o.html.4\]](http://www.physicalgeography.net/fundamentals/8o.html.4])
- [2] «<https://www.ecured.cu/>,» 15 12 2019. [En línea]. Available: [https://www.ecured.cu/Casquete_polar.5\]](https://www.ecured.cu/Casquete_polar.5])
- [2] NSIDC, «Arctic sea ice extent at maximum below average,» 7 4 2008. [En línea]. Available: [http://nsidc.org/arcticseaicenews/2008/04/arctic-sea-ice-extent-at-maximum-below-average-thin/.6\]](http://nsidc.org/arcticseaicenews/2008/04/arctic-sea-ice-extent-at-maximum-below-average-thin/.6])
- [2] C. Langway, The history of early polar ice cores, Cold Regions Science and Technology, 2008.
7]
- [2] «<https://nsidc.org/>,» 4 5 2020. [En línea]. Available: [https://nsidc.org/cryosphere/arctic-8\] meteorology/climate_change.html.8\]](https://nsidc.org/cryosphere/arctic-8] meteorology/climate_change.html.8])
- [2] «<https://nsidc.org/>,» [En línea]. Available: [https://nsidc.org/arcticseaicenews/charctic-interactive-sea-9\] ice-graph/.9\]](https://nsidc.org/arcticseaicenews/charctic-interactive-sea-9] ice-graph/.9])
- [3] <https://es.wikipedia.org/>, «Océano Ártico. Geografía: Rasgos Submarinos.,» 15 9 2020. [En línea].
0] Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/Oc%C3%A9ano_%C3%81rtico#Rasgos_submarinos.0\]](https://es.wikipedia.org/wiki/Oc%C3%A9ano_%C3%81rtico#Rasgos_submarinos.0])
- [3] <https://es.wikipedia.org/>, «Placer (geografía),» 23 8 2020. [En línea]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/Placer_\(geograf%C3%ADa\).1\]](https://es.wikipedia.org/wiki/Placer_(geograf%C3%ADa).1])

- [3] «<https://www.britannica.com/>,» [En línea]. Available: <https://www.britannica.com/science/placer-2> deposit.
- [3] M. F. Navarrete, *Diccionario Marítimo Español*, 1831.
3]
- [3] M. Correa, «En el Polo Norte comienza una noche que durará 6 meses,» *Bioguía*.
4]
- [3] H. D. Curtis, *Orbital Mechanics for Engineering Students*, Butterworth-Heinemann, 2013.
5]
- [3] R. Rapp, *Geometric Geodesy, Part I*, Ohio State University Department of Geodetic Science and
6] Surveying, 1991.
- [3] «<https://www.eea.europa.eu/>,» 18 4 2017. [En línea]. Available:
7] <https://www.eea.europa.eu/es/articles/el-artico>.
- [3] «<https://es.greenpeace.org/>,» 2016. [En línea]. Available: <https://es.greenpeace.org/es/trabajamos-8>
8] [en/oceanos/artico/consecuencias-del-deshielo-del-artico/#:~:text=Seg%C3%BAn%20se%20caliente%20el%20%C3%81rtico,suelo%20permanenement%20congelada\)%2C%20provocar%C3%A1n%20un](https://es.greenpeace.org/es/trabajamos-8/en/oceanos/artico/consecuencias-del-deshielo-del-artico/#:~:text=Seg%C3%BAn%20se%20caliente%20el%20%C3%81rtico,suelo%20permanenement%20congelada)%2C%20provocar%C3%A1n%20un).
- [3] P. Berton, *The Arctic Grail The Quest for the North West Passage and the North Pole*, Nueva York:
9] Viking, 1988.
- [4] W. Østreng, K. M. Eger, B. Fløistad, A. Jørgensen-Dahl, L. Lothe, M. Mejlænder-Larsen y T.
0] Wergeland, *Shipping in Arctic Waters: A Comparison of the Northeast, Northwest and Trans Polar Passages*, Springer, 2013.
- [4] F. d. Pozo, «<http://www.ieee.es/>,» 25 2 2015. [En línea]. Available:
1] http://www.ieee.es/Galerias/fichero/docs_opinion/2015/DIEEEO22-2015_Artico-CambioClimatico_F.delPozo.pdf.
- [4] V. Yarmolovych, *La Ruta Marítima del Norte*, Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, 2016.
2]
- [4] A. B. F. e. al, *Commercial Arctic shipping through the Northeast*, Taylor & Francis, 2014.
3]
- [4] A. Orús, «<https://es.statista.com/>,» 13 3 2020. [En línea]. Available:
4] <https://es.statista.com/estadisticas/635312/principales-puertos-de-contenedores-a-nivel-mundial-por-volumen-de-carga-manipulada/>.
- [4] J. Ensunza, «Piratas atacan con granadas a un atunero vizcaíno y a un buque coreano en el Índico,»
5] *El Correo*, 24 4 2019.

- [4 «Piratas Somalíes capturan un petrolero en su primer secuestro de un buque comercial desde 2012,»
6] *El País*, 17 3 2017.
- [4 R. d. Miguel, «El Reino Unido confirma la captura por Irán de dos embarcaciones en el estrecho de
7] Ormuz,» *El País*, 22 7 2019.
- [4 A. I. Al-Moshki, «THE HOUTHIS: FROM A LOCAL GROUP TO A NATIONAL POWER,» *Yemen Times*,
8] 4 9 2014.
- [4 «La agitada historia del Canal de Suez,» *France24*, 11 11 2019.
9]
- [5 A. Visser, «Esso Northumbria (1970-1982),» 2012. [En línea]. Available:
0] <http://www.aukevisser.nl/uk/id198.htm>.
- [5 C. Dyrz, «<https://www.researchgate.net/>,» 2017. [En línea]. Available:
1] https://www.researchgate.net/publication/321687663_Safety_of_navigation_in_the_Arctic.
- [5 A. e. a. Buixadé Farré, «Commercial Arctic shipping through the Northeast Passage: Routes,
2] resources, governance, technology, and infrastructure,» de *Polar Geography*, Taylor&Francis, 2014.
- [5 Y. A. e. al, «<https://www.sciencedirect.com/>,» 4 2 2016. [En línea]. Available:
3] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308597X16000038>.
- [5 I. H. Organization, *Limits of the Oceans*, 3rd Edition, Monte-Carlo: IMP. MONÉGASQUE, 1953.
4]
- [5 R. M. Riley D. Champine, «<https://www.nationalgeographic.com/>,» [En línea]. Available:
5] <https://www.nationalgeographic.com/environment/2019/08/map-shows-how-ships-navigate-melting-arctic-feature/>.
- [5 C. Welch, «<https://www.nationalgeographic.com/>,» 23 3 2018. [En línea]. Available:
6] <https://www.nationalgeographic.com/news/2018/03/winter-arctic-sea-ice-second-lowest-record-spd/>.
- [5 «<https://oceanservice.noaa.gov/>,» [En línea]. Available:
7] <https://oceanservice.noaa.gov/economy/arctic/>.
- [5 V. a. Mar, «<https://www.vistaalmar.es/>,» 2 8 2014. [En línea]. Available:
8] <https://www.vistaalmar.es/medio-ambiente/cambio-climatico/4131-miden-olas-5-m-oceano-artico-donde-solo-hielo.html>.
- [5 J. P. Snyder, *Map Projections - A Working Manual*, Washington, DC: U. S. Geological Survey
9] Professional Paper, 1987.
- [6 J. W. Rager, L. L. Fry, S. S. Jacks y D. R. Hill, «DMA Technical Manual: Datums, Ellipsoids, Grids, and
0] Grid Reference Systems,» 9 1990. [En línea]. Available: https://earth-info.nga.mil/GandG/publications/tm8358.1/pdf/TM8358_1.pdf.

- [6] «<https://desktop.arcgis.com/>,» [En línea]. Available: [https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/guide-1\) books/map-projections/polar-stereographic.htm](https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/guide-1) books/map-projections/polar-stereographic.htm).
- [6] E. M. Rodríguez, «<https://emelon.webs.ull.es/>,» [En línea]. Available: <https://emelon.webs.ull.es/Apuntes/AGUJA%20GIROSC%C3%93PICA.pdf>.
- [6] M. Á. M. Navarro, «<https://www.manualvuelo.es/>,» [En línea]. Available: https://www.manualvuelo.es/2inst/29_brujl.html.
- [6] R. Sánchez Morata, «Navegar es preciso,» 13 7 2012. [En línea]. Available: [https://www.navegar-es-4\) preciso.com/news/compases-magneticos-en-altas-latitudes-john-m-macfarlane-2011-/](https://www.navegar-es-4) preciso.com/news/compases-magneticos-en-altas-latitudes-john-m-macfarlane-2011-/).
- [6] <https://es.wikipedia.org/>, «GPS. DGPS o GPS Diferencial,» 27 7 2020. [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/GPS#DGPS_o_GPS_diferencial.
- [6] C. I. o. T. NASA Jet Propulsion Laboratory, «The Global Differential GPS System,» [En línea]. Available: <https://www.gdgps.net/index.html>.
- [6] C. Dubois, «<https://www.allaboutcircuits.com/>,» 23 6 2018. [En línea]. Available: <https://www.allaboutcircuits.com/news/navigating-the-arctic-why-gps-might-fail-you/>.
- [6] N. a. T. Information and Analysis Center for Positioning, «GLONASS,» [En línea]. Available: <https://www.glonass-iac.ru/en/GLONASS/>.
- [6] <https://es.wikipedia.org/>, «Galileo (navegación por satélite),» 23 5 2020. [En línea]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/Galileo_\(navegaci%C3%B3n_por_sat%C3%A9lite\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Galileo_(navegaci%C3%B3n_por_sat%C3%A9lite)).
- [7] «<https://www.esa.int/>,» 24 4 2016. [En línea]. Available: https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Spain/EGNOS_navegacion_y_seguridad.
- [7] GARMIN, «What is WAAS?,» [En línea]. Available: <https://www8.garmin.com/aboutGPS/waas.html>.
1]
- [7] M. E.-G. S. S. Susan Skone, «<https://pdfs.semanticscholar.org/>,» University of Calgary, [En línea].
2] Available: <https://pdfs.semanticscholar.org/9310/b5eead25d784aef9e425fe3979184f7232c.pdf>.
- [7] M. Denny, The Science of Navigation: From Dead Reckoning to GPS, Baltimore: Johns Hopkins
3] University Press, 2012.
- [7] A. Cordwell, «<http://alancordwell.co.uk/>,» 5 5 2008. [En línea]. Available:
4] <http://alancordwell.co.uk/Legacy/radionavigation/russian/chayka.html>.
- [7] <https://en.wikipedia.org/>, «CHAYKA,» 22 2 2020. [En línea]. Available:
5] <https://en.wikipedia.org/wiki/CHAYKA>.
- [7] G. Wright, «<https://www.cambridge.org/core/>,» 3 2017. [En línea]. Available:
6] <https://www.cambridge.org/core/journals/journal-of-navigation/article/virtual-electronic-aids-to->

navigation-for-remote-and-ecologically-sensitive-
regions/4BED0282D310BF345EE2E0E0B79FD63B/core-reader#.

- [7] «EXPERTS ON ARCTIC NAVIGATION GATHERED FOR A SEMINAR AT IALA HEADQUARTERS ON 9 & 10 NOVEMBER 2017,» de *EXPERTS ON ARCTIC NAVIGATION GATHERED FOR A SEMINAR AT IALA HEADQUARTERS ON 9 & 10 NOVEMBER 2017*, París, 2017.
- [7] «[http://www.puertos.es/es-es/Paginas/IALA-.aspx#:~:text=La%20Asociaci%C3%B3n%20Internacional%20de%20Ayudas,y%20Autoridades%20de%20Faros%20\(IALA\).](http://www.puertos.es/es-es/Paginas/IALA-.aspx#:~:text=La%20Asociaci%C3%B3n%20Internacional%20de%20Ayudas,y%20Autoridades%20de%20Faros%20(IALA),» [En línea]. Available: <a href=)
- [7] H. Silver, *Wave Propagation in the Ionosphere*, Dordrecht: Kluwer Academic Publications, 1993.
- [9]
- [8] T. N. Davis, «<https://www.gi.alaska.edu/>,» 8 3 1982. [En línea]. Available: <https://www.gi.alaska.edu/alaska-science-forum/arctic-radio-propagation-0>.
- [8] F. Bekkadal, «Arctic Communication Challenges,» Trondheim, 2014.
- [1]
- [8] C. G. F. Charles E. Mayer, «Evaluation of HF Communications in the Arctic,» Polar Ice Coring Office, 2] Fairbanks, 1992.
- [8] Y. F. e. a. Kolyuka, «EXAMINATION OF THE LIFETIME, EVOLUTION AND RE-ENTRY FEATURES FOR THE "MOLNIYA" TYPE ORBITS,» Moscú, 2009.
- [8] R. M. Rodríguez-Osorio, «<https://list.gr.ssr.upm.es/>,» 2009. [En línea]. Available: <https://list.gr.ssr.upm.es/docencia/grado/csat/material/CSAT09-2-OrbitasConstelaciones.pdf>.
- [8] C. E. e. a. Fossa, «An overview of the IRIDIUM (R) low Earth orbit (LEO) satellite system,» de 5] *Proceedings of the IEEE 1998 National Aerospace and Electronics Conference. NAECON 1998.*, Dayton, 1998.
- [8] <https://en.wikipedia.org/>, «Iridium satellite constellation,» 21 8 2020. [En línea]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Iridium_satellite_constellation.
- [8] «<https://www.iridium.com/>,» [En línea]. Available: <https://www.iridium.com/solutions/maritime/merchant/>.
- [8] COSPAR-SARSAT, «Detailed Cospas-Sarsat System Description,» [En línea]. Available: <https://cospas-sarsat.int/en/>.
- [8] D. Dimitrios, «Arctic SAR: Current Infrastructure and Opportunities for Maritime Autonomous Surface Ships (MASS),» de *Arctic SAR: Current Infrastructure and Opportunities for Maritime Autonomous Surface Ships (MASS)*, 2019.

[9 Ministerio de Asuntos Exteriores y Cooperación, «<https://www.boe.es/>,» 5 5 2017. [En línea]. Available:
0] <https://www.boe.es/boe/dias/2017/05/05/pdfs/BOE-A-2017-4869.pdf>.

[9 «<http://www.imo.org/>,» [En línea]. Available:
1] <http://www.imo.org/es/MediaCentre/HotTopics/polar/Paginas/Default.aspx>.

[9 V. Rachold, «<https://www.arctic-office.de/>,» 8 2019. [En línea]. Available: https://www.arctic-office.de/fileadmin/user_upload/www.arctic-office.de/PDF_uploads/FactSheet_Shipping.pdf.

[9 <https://en.wikipedia.org/>, «Arctic shipping routes,» 21 8 2020. [En línea]. Available:
3] https://en.wikipedia.org/wiki/Arctic_shipping_routes#:~:text=Arctic%20shipping%20routes%20are%20the,and%20the%20Transpolar%20Sea%20Route..

[9 M. Humpert y A. Raspotnik, «The Future of Arctic Shipping Along the Transpolar Sea,» de *Arctic*
4] *Yearbook 2012*, University of the Arctic, 2012, pp. 281 - 301.

[9 <https://en.wikipedia.org/>, «MV Xue Long. Trans-Arctic voyage, 2012.,» 28 6 2020. [En línea]. Available:
5] https://en.wikipedia.org/wiki/MV_Xue_Long#Trans-Arctic_voyage,_2012.

[9 B. Muse, «Arctic Economics. The Arctic Bridge.,» 22 7 2008. [En línea]. Available:
6] https://benmuse.typepad.com/arctic_economics/2008/07/the-arctic-bridge.html.

[9 U. N. T. Collection, «Law of the Sea,» 10 12 1982. [En línea]. Available:
7] https://en.wikipedia.org/wiki/United_Nations_Convention_on_the_Law_of_the_Sea.

[9 <https://es.wikipedia.org/wiki/>, «Paso del Noroeste,» 28 7 2020. [En línea]. Available:
8] https://es.wikipedia.org/wiki/Paso_del_Noroeste.

[9 M. Byers y S. Lalonde, «Who Controls the Northwest,» de *VANDERBILT JOURNAL OF*
9] *TRANSNATIONAL LAW*, pp. 1133 - 1210.

[1 G. o. Canada, «Atlas of Canada,» [En línea]. Available: <https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-and-publications/maps/22020>.
]

[1 D. Smith, R. Gowan y M. McComb, *Geology and Resource Potential of a Proposed National Marine*
01 *Park Lancaster Sound*, Arctic Institute of North America Publications, 1989.
]

[1 <https://es.wikipedia.org/>, «Estrecho del Príncipe de Gales,» 20 9 2020. [En línea]. Available:
02 https://es.wikipedia.org/wiki/Estrecho_del_Pr%C3%ADncipe_de_Gales.
]

[1 <https://es.wikipedia.org/>, «Golfo de Amundsen,» 31 5 2020. [En línea]. Available:
03 https://es.wikipedia.org/wiki/Golfo_de_Amundsen.
]

[1 C. L. Ragner, Northern Sea Route Cargo Flows and Infrastructure - Present State and Future Potential, 04 The Fridjof Nansen Institute, 2000.

]

[1 <https://www.encyclopedia.com/>, «Dudinka,» 12 9 2020. [En línea]. Available: 05 <https://www.encyclopedia.com/reference/encyclopedias-almanacs-transcripts-and-maps/dudinka>.

]

[1 ATOMFLOT ROSATOM, «ATOMFLOT ROSATOM,» [En línea]. Available: <http://www.rosatomflot.ru/>. 06

]

[1 <https://ru.wikipedia.org/wiki/>, «Карские Ворота,» 8 9 2020. [En línea]. Available: 07 https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%B0%D1%80%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B5_%D0

]

[1 E. M. Pospelov, Географические названия России: Топонимический словарь (Nombres geográficos 08 de Rusia: diccionario toponímico), Moscú: Casa "Book Find", 2003.

]

[1 P. T.-G. Juan Luis Cifuentes Lemus, «<http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/>,» [En línea]. Available: 09 <http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/17/htm/oceano.htm>.

]

[1 «<https://tarwi.lamolina.edu.pe/>,» [En línea]. Available: 10 <https://tarwi.lamolina.edu.pe/licochea/propiedad1.html>.

]

[1 M. Chaplin, «<http://www1.lsbu.ac.uk/>,» 17 7 2020. [En línea]. Available: 11 http://www1.lsbu.ac.uk/water/water_on_earth.html.

]

[1 «<https://nsidc.org/>,» 3 4 2020. [En línea]. Available: 12 https://nsidc.org/cryosphere/seaice/characteristics/brine_salinity.html#:~:text=The%20Arctic%20Ocean%20is%20generally,may%20have%20even%20lower%20salinity..

]

[1 «<http://www.salinityremotesensing.ifremer.fr/>,» [En línea]. Available: 13 <http://www.salinityremotesensing.ifremer.fr/sea-surface-salinity/definition-and-units>.

]

[1 «<https://diablobanquisa.wordpress.com/>,» 2 9 2010. [En línea]. Available: 14 <https://diablobanquisa.wordpress.com/2010/09/02/formacion-y-desarrollo-del-hielo-marino/>.

]

[1 «<https://www.tiempo.com/>,» 14 7 2014. [En línea]. Available: <https://www.tiempo.com/ram/84152/los-15-periodos-de-referencia-climaticos-de-30-anos-y-la->

]

