
Emisiones y Efluentes de Cruceros en la Bahía de La Paz, México De enero de 2020 a junio de 2021

Edward W. Carr, Ph.D.
James J. Winebrake, Ph.D.
Energy and Environmental Research Associates, LLC

Tania Miranda
Instituto de las Américas

Mayo 2022



Resumen Ejecutivo

Los cruceros emiten contaminantes a la atmósfera, incluso cuando anclados. Además, un número cada vez mayor de estas embarcaciones están equipadas con Sistemas de Limpieza de Gases de Escape, también conocidos como depuradores, que vierten al océano efluentes de agua de lavado que se ha comprobado tienen un impacto negativo para la vida y los ecosistemas marinos. Esta tecnología funciona siempre que cualquiera de los motores de la embarcación esté encendido y consumiendo combustible, ya que se emplea para reducir los óxidos de azufre de los gases de escape de la embarcación, con el propósito de cumplir con una normativa impuesta por la Organización Marítima Internacional (OMI) en el 2020. En diferentes momentos de la pandemia de COVID-19, varios cruceros – mayores al tamaño promedio – anclaron en la Bahía de La Paz, Baja California Sur, México, en el Golfo de California, sin escalas programadas o actividades relacionadas con pasajeros, algunos durante varias semanas seguidas. Este estudio evalúa las emisiones atmosféricas y los efluentes de aguas de lavado de 10 de esos cruceros entre el 1 de enero de 2020 y el 30 de junio de 2021. Encontramos que durante el período de estudio, los 10 cruceros consumieron un total estimado de 436,300 toneladas métricas (Tm) de combustible, liberando a la atmósfera 108,760 Tm de dióxido de carbono (CO_2), 330 Tm de dióxido de azufre (SO_2) y 2,800 Tm de óxidos de nitrógeno (NO_x). Todos esos cruceros tienen instalados depuradores y descargaron en el Golfo de California un total de 8.06 millones de m^3 de aguas de lavado, lo que equivale a la capacidad de 3,224 albercas olímpicas. Llegamos a la conclusión que estas embarcaciones emitieron niveles significativos de contaminantes atmosféricos (incluidos aquellos que son perjudiciales para la salud humana y que contribuyen de forma significativa al cambio climático), así como efluentes de aguas de lavado contaminantes, mientras se encontraban ancladas de manera prolongada en la Bahía de La Paz, a la espera de que se levantaran las restricciones de la pandemia.

Lista de Figuras y Tablas

Figura 1: Vertidos de agua de lavado por tipo de embarcación, de un total de 10 gigatoneladas (Gt) al año.

Figura 2: Mapa de calor global que muestra las posiciones y la densidad de las emisiones de CO₂ de los 10 cruceros estudiados, desde el 1 de enero de 2020 hasta el 30 de junio de 2021.

Figura 3: Posiciones derivadas del Sistema de Identificación Automática (AIS, por sus siglas en inglés) para los cruceros anclados en la Bahía de La Paz.

Figura 4: Tendencia de las emisiones diarias de SO₂, por crucero, desde el 1 de enero de 2020 hasta el 30 de junio de 2021.

Figura 5: Suma de las emisiones mensuales de NO_x, SO₂ y PM de los 10 cruceros estudiados en la Bahía de La Paz, desde el 1 de enero de 2020 hasta el 30 de junio de 2021.

Figura 6: Posiciones de las embarcaciones a nivel global (arriba), alrededor de Baja California (abajo a la izquierda), y en la Bahía de La Paz (abajo a la derecha), coloreadas por mes.

Figura 7: Distribución de las cargas de los motores principales en el conjunto de datos observados.

Figura 8: Consumo de combustible por hora en función de la velocidad observada.

Tabla 1: Nombres y navieras de los 10 cruceros incluidos en este estudio.

Tabla 2: Consumo de combustible, emisiones y efluentes de aguas de lavado de los cruceros anclados en la Bahía de La Paz entre el 1 de enero de 2020 y el 30 de junio de 2021.

Tabla 3: Características de los cruceros incluidos en este estudio.

Tabla 4: Factores de ajuste por baja carga aplicados según la Tabla 3.10 del documento guía de la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés).

Tabla 5: Parámetros del modo de funcionamiento y cargas de los motores auxiliares y de la caldera.

Tabla 6: Porcentaje de emisiones globales, por embarcación, desde el 1 de enero de 2020 hasta el 30 de junio de 2021.

Tabla 7: Consumo de combustible, emisiones y efluentes de aguas de lavado en la Bahía de La Paz, por mes.

Lista de acrónimos

AIS: Sistema de Identificación Automática (por sus siglas en inglés)
CARB: Junta de Recursos del Aire de California (por sus siglas en inglés)
CO₂: Dióxido de carbono
COV: Compuestos orgánicos volátiles
ECA: Zonas de Control de Emisiones (por sus siglas en inglés)
EERA: Asociados de Investigación Energética y Medioambiental (por sus siglas en inglés)
FE: Factores de emisión de contaminantes
SLGE: Sistemas de Limpieza de Gases de Escape
EPA: Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (por sus siglas en inglés)
GEI: Gas de efecto invernadero
Gt: Gigatoneladas
HFO: Combustible pesado
ICCT: Consejo Internacional de Transporte Limpio (por sus siglas en inglés)
OMI: Organización Marítima Internacional
OMI 2020: Reglamento emitido por la Organización Marítima Internacional para limitar el contenido de azufre del combustible de los barcos al 0.5%; entró en vigor el 1 de enero de 2020.
GNL: Gas Natural Licuado
LSFO: Fuelóleos de bajo contenido en azufre (por sus siglas en inglés)
m³: Metro(s) cúbico(s)
MARPOL: Convenio Internacional para Prevenir la Contaminación por los Buques (por sus siglas en inglés)
MEPC: Comité de Protección del Medio Marino de la OMI (por sus siglas en inglés)
MGO: Gasóleo Marino (por sus siglas en inglés)
NO_x: Óxido de nitrógeno
OGV: Buques oceánicos
OMS: Organización Mundial de la Salud
MP: Materia particulada
SO_x: Óxidos de azufre
SO₂: Dióxido de azufre
Tm: Toneladas métricas

1. INTRODUCCIÓN.....	6
1.1 PROPÓSITO DEL ESTUDIO.....	6
1.2 CONTEXTO SOBRE LAS CONDICIONES ATMOSFÉRICAS Y LOS EFLUENTES DE LAS AGUAS RESIDUALES.....	6
1.2.1 OMI 2020	6
1.3 <i>El aumento de la adopción de depuradores en los cruceros.....</i>	<i>9</i>
2. RESULTADOS DEL ESTUDIO Y DISCUSIÓN	10
2.1 CRUCEROS ESTUDIADOS.....	10
2.2 <i>Emisiones y efluentes globales de los cruceros estudiados</i>	<i>11</i>
2.3 <i>Emisiones y efluentes de los cruceros estudiados en la Bahía de La Paz.....</i>	<i>12</i>
3. CONTEXTO AMBIENTAL.....	16
3.1 EFECTOS DE LOS EFLUENTES DE LOS DEPURADORES EN EL ENTORNO MARINO	16
3.2 <i>Contaminación del aire y del agua por los cruceros estudiados.....</i>	<i>17</i>
4. CONCLUSIONES	18
APÉNDICE	21
INSUMOS Y METODOLOGÍA DEL ESTUDIO	21
1.1 DATOS DE LAS EMBARCACIONES	21
1.2 <i>Datos de Actividad (AIS).....</i>	<i>21</i>
1.3 <i>Modelación de las Emisiones</i>	<i>23</i>
1.4 <i>Cargas y Emisiones de Motores Auxiliares y Calderas.....</i>	<i>26</i>
1.5 <i>Efluentes de los SLGE</i>	<i>27</i>

1. Introducción

1.1 Propósito del estudio

Los cruceros producen emisiones atmosféricas y descargas al agua mediante sus operaciones normales. Las emisiones atmosféricas incluyen aquéllas derivadas de la combustión de los motores principales y auxiliares y las calderas de la embarcación, de componentes contaminantes y que contribuyen al cambio climático, como óxidos de azufre (SO_x), óxido de nitrógeno (NO_x), dióxido de carbono (CO₂) y materia particulada (MP). En casos donde estén instalados y en funcionamiento sistemas de limpieza de gases de escape (SLGE), también conocidos como depuradores, que si bien eliminan los contaminantes de las emisiones de escape, se espera que aumenten los efluentes de aguas de lavado. Estas aguas de lavado se vierten al medio marino mediante depuradores de circuito abierto, y son efluentes que contienen gases de escape y partículas disueltas, incluyendo compuestos ácidos, sustancias tóxicas y metales pesados potencialmente perjudiciales para el ecosistema marino.

Durante la pandemia de COVID-19, embarcaciones de gran calado de diferentes navieras viajaron a la Bahía de La Paz, Baja California Sur, México, en el Golfo de California -sin pasajeros- con el propósito de esperar anclados en aguas tranquilas hasta que se levantaran las restricciones de viaje y se pudieran reanudar las operaciones con pasajeros. Durante este tiempo, esos barcos operaron en un modo de reposo en caliente (*warm lay-up*), con los sistemas abordo activos para mantener los controles de temperatura y humedad, de tal manera que el barco pudiera ser reactivado rápidamente en el caso de que se levantaran las restricciones de turismo relacionadas con la pandemia. Sin embargo, esto significó que el impacto ambiental de los barcos también fue mayor, a través de mayores cargas de motor, emisiones, y aguas de lavado procedentes de los depuradores de circuito abierto instalados.

El objetivo de este estudio es evaluar y cuantificar las emisiones atmosféricas y los efluentes de las aguas de lavado de diez embarcaciones que estuvieron ancladas en la Bahía de La Paz, en algún momento entre el 1 de enero de 2020 y el 30 de junio de 2021.

1.2 Contexto sobre las condiciones atmosféricas y los efluentes de las aguas residuales

1.2.1 OMI 2020

La industria marítima produce anualmente cerca del 3% del total de las emisiones de CO₂ globales, así como el 15% de las emisiones de SO_x y el 13% de las de NO_x.¹ Además, el combustible predominante utilizado en la industria marítima, conocido como Combustible Pesado (HFO, por sus siglas en inglés), es altamente peligroso para la salud humana cuando se quema. Según un artículo revisado por pares de 2018 publicado en *Nature*,² "antes de la existencia de los

¹ <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Fourth-IMO-Greenhouse-Gas-Study-2020.aspx>

² <https://www.nature.com/articles/s41467-017-02774-9.pdf>

combustibles más limpios para barcos, los impactos en la salud relacionados con las embarcaciones incluyen ~400,000 muertes prematuras por cáncer de pulmón y enfermedades cardiovasculares y ~ 14 millones de casos de asma infantil al año". Como parte del esfuerzo para abordar esta problemática, en 2008 la Organización Marítima Internacional (OMI) de las Naciones Unidas decidió reducir el límite de contenido de azufre permitido en el combustible para barcos, del 3.5% a 0.5%, a partir del 1 de enero de 2020.³

Esta normativa (conocida como OMI 2020) se inscribe dentro del marco del Convenio Internacional para Prevenir la Contaminación por los Buques -mejor conocido como MARPOL,⁴ adoptado en 1973 y modificado por Protocolo en 1978- y se espera que mejore la calidad del aire en las regiones costeras y que contribuya a enfrentar la crisis climática. Según la OMI, "el nuevo límite supondrá un decremento del 77% en las emisiones totales de SO_x de las embarcaciones, lo que equivale a una reducción anual de aproximadamente 8.5 millones de toneladas métricas de SO_x. También se reducirán las partículas nocivas que se forman al quemar el combustible".⁵

La OMI cuenta con 174 países miembros, y MARPOL se compone de seis anexos que abordan diferentes sustancias contaminantes. Es importante señalar que las normas de la OMI acordadas en el marco de MARPOL son vinculantes para los países signatarios. En cuanto a la contaminación atmosférica, el Anexo VI de MARPOL entró en vigor años más tarde, en 2005, y pretende limitar la emisión de los principales contaminantes atmosféricos contenidos en los gases de escape de las embarcaciones, incluidos el SO_x, el NO_x y las MP; prohíbe las emisiones deliberadas de sustancias que dañan la capa de ozono; y regula la incineración a bordo, así como las emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COV). Las enmiendas al Anexo VI en 2011 también introdujeron medidas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), así como las llamadas Zonas de Control de Emisiones (ECA, por sus siglas en inglés), cuyo objetivo es reducir en gran medida las emisiones de contaminantes atmosféricos en zonas marítimas designadas mediante la adopción de medidas especiales obligatorias para todas las embarcaciones. El límite de azufre en las ECA es del 0.1% desde 2015, incluso inferior al 0.5% establecido por la OMI 2020 en el resto de las aguas.

Según la OMI, existen diferentes vías para cumplir con la normativa de la OMI 2020 sobre los límites de azufre, como el uso de fuelóleos de bajo contenido en azufre (LSFO, por sus siglas en inglés) -con un contenido de azufre inferior al 0.5% m/m- y otras: "Los barcos también pueden utilizar otros combustibles, con bajo o incluso nulo contenido de azufre - por ejemplo, gas natural licuado, o biocombustibles. La limitación de los contaminantes atmosféricos mediante la instalación de sistemas de limpieza de los gases de escape, también conocidos como depuradores, se acepta si los Estados lo aprueban como medio alternativo para cumplir el requisito del límite de azufre".⁶

³ <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Sulphur-2020.aspx>

⁴ MARPOL está reconocido como uno de los convenios internacionales más importantes sobre el medio ambiente marino.

⁵ <https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/Pages/34-IMO-2020-sulphur-limit-.aspx>

⁶ <https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/Pages/34-IMO-2020-sulphur-limit-.aspx>

Así, la vía para cumplir con la OMI 2020 depende del propietario/operador del barco y deja abierta la posibilidad de que los barcos sigan quemando combustibles más baratos y contaminantes con alto contenido de azufre, siempre que depuren las emisiones resultantes. Los depuradores pueden reducir las emisiones de azufre en un 98%.⁷

1.2.2 Sistemas de Limpieza de los Gases de Escape, o depuradores

Hay diferentes tipos de SLGE, según su funcionamiento. Los depuradores de circuito abierto, que son los más comunes, utilizan agua de mar, que es alcalina, para neutralizar los óxidos de azufre de los gases de escape en una cámara especial, antes de liberarlos a la atmósfera, y luego descargan el agua de mar utilizada (conocida como agua de lavado o efluentes), de vuelta al océano. La mayoría de los depuradores de circuito abierto devuelven el agua de lavado al océano sin tratarla primero.

Según un estudio del Consejo Internacional de Transporte Limpio (ICCT, por sus siglas en inglés), en 2020 los depuradores de circuito abierto representaban el 85% del total de los SLGE instalados, ya que son menos costosos que los sistemas híbridos y de circuito cerrado. Los barcos equipados con este tipo de tecnología vierten el agua de lavado en el océano de forma más o menos continua mientras el barco consume energía, incluso en el puerto y en el muelle.

En cambio, los depuradores de circuito cerrado añaden sosa cáustica al agua de filtración para neutralizar la acidez de los gases de escape (en lugar de utilizar agua de mar), y recogen el lodo del depurador a bordo y lo almacenan para su eliminación en tierra. Los sistemas de circuito cerrado pueden funcionar en modo de descarga cero, en el que no se vierte nada al ecosistema marino. Por último, los depuradores híbridos pueden funcionar en modo abierto o cerrado. Según la investigación del ICCT, el 14% de las instalaciones de depuradores hasta la fecha eran sistemas híbridos y sólo el 1% eran de circuito cerrado.

La OMI estableció en 2015 las últimas directrices para la instalación de los SLGE y criterios para las aguas de lavado resultantes, así como para las pruebas y el cumplimiento a través de su Comité de Protección del Medio Marino (MEPC, por sus siglas en inglés),⁸ mucho antes de que entrara en vigor la OMI 2020. Sin embargo, sólo se espera, pero no se obliga, que los barcos controlen los parámetros químicos y físicos del agua de lavado de los depuradores, y las directrices de 2015 no incluyen límites para metales pesados. Cabe mencionar que las directrices del MEPC pretenden servir de orientación inicial para los barcos. Incluso, la propia OMI tiene la intención de revisarlas y modificarlas en un futuro, a medida que se disponga de más datos. Según el sitio web de la OMI, "el Subcomité (MEPC) de Prevención y Lucha contra la Contaminación está llevando a cabo una revisión de las directrices de 2015 sobre los SLGE".

⁷ <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1361920913001491?via%3Dihub>

⁸ El MEPC es un órgano subsidiario de la OMI que se reúne cada nueve meses para debatir y consensuar los asuntos más urgentes en materia de protección del medio ambiente marino.

Ya que la decisión de cómo cumplir con la OMI 2020 se deja en manos de los propietarios de los barcos, las compañías navieras y de cruceros pueden decidir la vía que mejor se adapte a su modelo de negocio. Por un lado, pueden invertir en adaptar los barcos para que funcionen con gas natural licuado (GNL) -que emite casi cero emisiones de azufre- o utilizar biocombustibles.⁹ Por otro lado, pueden utilizar LSFOs que aún son más caros, incluido el gasóleo marino (MGO, por sus siglas en inglés), que también cumplen la normativa de la OMI. Por último, pueden seguir quemando HFO y reequipar los barcos con SLGE, para garantizar que las emisiones cumplan con los límites de azufre impuestos.

1.3 El aumento de la adopción de depuradores en los cruceros

La decisión sobre cómo cumplir con la OMI 2020 varía entre las empresas y, desde luego, entre tipos de embarcación. Por ejemplo, un análisis del ICCT¹⁰ reveló que los graneleros, los porta-contenedores y los barcos petroleros constituyen alrededor de tres cuartas partes de la flota modernizada con depuradores, por número de barcos. De ellos, los graneleros son las embarcaciones más comunes con depuradores instalados, en términos absolutos: 1,246 barcos, o el 34% de todos los barcos equipados. No obstante, dentro de cada categoría de embarcación, el estudio también constata que los cruceros son los que más han instalado esta tecnología, dentro de cada tipo de barco.

De hecho, según un informe de 2021¹¹ de la Asociación Internacional de Líneas de Cruceros (CLIA, por sus siglas en inglés) -uno de los principales conglomerados del sector-, para finales de 2021 casi el 70% de la flota mundial de cruceros se habría adaptado con SLGE, y el 96% de las embarcaciones nuevas que no utilizan gas natural licuado, se adaptará con depuradores. Esto coincide con el hecho de que las cuatro mayores navieras de cruceros del mundo -Carnival Corporation, Royal Caribbean Cruises, Norwegian Cruise Line Holdings y MSC Cruises- están instalando o han instalado depuradores en la mayoría de sus embarcaciones. Según una investigación del *Miami Herald*, a partir del 1 de enero de 2020, de los 207 cruceros totales pertenecientes a estas navieras, el 68% de los barcos funcionaban con HFO y depuradores, el 31% con LSFO y sólo el 1% con GNL.¹²

Es importante señalar que, aunque los cruceros sólo representan el 4% de la flota total de barcos equipada con depuradores, éstos son responsables del 15% del total de las aguas de lavado vertidas a nivel global (ver *Figura 1*). De hecho, los cruceros son los principales responsables de las descargas de los depuradores en los puertos, ya que pasan alrededor del 25% de su tiempo en puerto y, en promedio, consumen tres veces más energía por hora de permanencia en el puerto que los petroleros y seis veces más que los porta-contenedores.

⁹ Aunque las emisiones de SO_x de los biocombustibles suelen ser menores que las de otros combustibles para embarcaciones, todavía emiten contaminantes.

¹⁰ *Global scrubber washwater discharges under IMO's 2020 fuel sulfur limit*, ICCT, 2021.

¹¹ <https://cruising.org/-/media/research-updates/research/2021-state-of-the-cruise-industry>

¹² *Cruise lines have a solution for a new clean fuel regulation. But is it the greenest option?* Dolven and Harris, Miami Herald, December 2020. <https://www.miamiherald.com/news/business/tourism-cruises/article224596880.html>

Por tanto, los cruceros son responsables del 96% de los efluentes en siete de los 10 puertos con más descargas de aguas residuales del mundo.¹³

Figura 1: Vertidos de agua de lavado por tipo de embarcación, de un total de 10 gigatoneladas (Gt) al año.



Fuente: *Global scrubber washwater discharges under IMO's 2020 fuel sulfur limit*, ICCT, 2021.¹⁴

2. Resultados del Estudio y Discusión

2.1 Cruceros estudiados

Este estudio se enfocó en los movimientos e impactos de los 10 cruceros mostrados en la *Tabla 1*, desde el 1 de enero de 2020 hasta el 30 de junio de 2021. Se sabe que todas estas embarcaciones estuvieron ancladas durante largos periodos de tiempo en la Bahía de La Paz, en Baja California Sur, en algún momento durante la pandemia de COVID-19, cuando la mayoría de los grandes cruceros estaban atracados por restricciones. Los datos muestran que, con la excepción de una visita del *Westerdam* en abril de 2020 y otra del *Koningsdam* en junio de 2020, todas las visitas y anclajes de los cruceros estudiados ocurrieron durante o después de febrero de 2021. Estos 10 cruceros navegaron por todo el mundo a lo largo de 2020 y 2021, con rutas que cambiaron tanto estacionalmente como en respuesta a las restricciones de la pandemia.

¹³ <https://theicct.org/sites/default/files/publications/scrubber-discharges-Apr2021.pdf>

¹⁴ Ibid.

Tabla 1: Nombres y navieras de los 10 cruceros estudiados.

		2020 - Escalas Programadas (Ene – Dic)	2021 - Escalas Programadas (Ene – Jun)
Holland America	Koningsdam	0	0
	Nieuw Amsterdam	0	0
	Noordam	0	0
	Westerdam	0	0
	Zuiderdam	0	0
Princess Cruises	Emerald Princess	2	0
	Grand Princess	1	0
	Majestic Princess	0	0
	Royal Princess	0	0
	Ruby Princess	0	0

Con base en una revisión de los itinerarios publicados de los cruceros, como se puede ver en la *Tabla 1*, estos cruceros estaban programados para hacer escala en La Paz tres veces en 2020 y ninguna escala programada en 2021.¹⁵

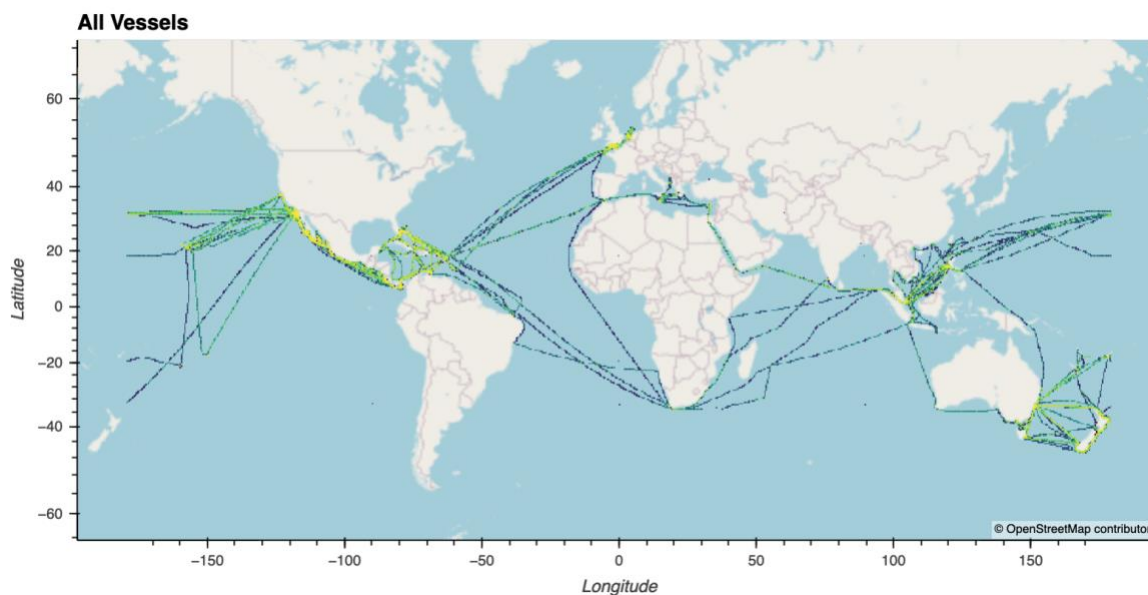
2.2 Emisiones y efluentes globales de los cruceros estudiados

Durante el periodo de estudio, los 10 cruceros de este análisis consumieron un total estimado de 436,300 toneladas métricas (Tm) de combustible a través de todas sus rutas en el mundo, lo que equivale a alrededor del 4.6% de la flota mundial de cruceros.¹⁶ Como se muestra en la *Figura 2* abajo, estos barcos operaron en todo el mundo durante este periodo, aunque las operaciones se concentraron en torno a México y el Caribe, el sudeste asiático y Australia y Nueva Zelanda. Las emisiones de dichos cruceros fueron proporcionalmente más altas que la media de la flota total de estos barcos, ya que tienen un mayor tonelaje que el promedio de los cruceros. Según datos públicos, los 10 cruceros de este estudio están equipados con depuradores de circuito abierto, que utilizan agua de mar para neutralizar los gases de escape.

¹⁵ <https://crew-center.com/la-paz-mexico-cruise-ship-schedule-2020>

¹⁶ <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Fourth-IMO-Greenhouse-Gas-Study-2020.aspx>

Figura 2: Mapa de calor global que muestra las posiciones y la densidad de las emisiones de CO₂ de los 10 cruceros estudiados, desde el 1 de enero de 2020 hasta el 30 de junio de 2021.



2.3 Emisiones y efluentes de los cruceros estudiados en la Bahía de La Paz

Las emisiones totales y los efluentes de aguas de lavado de estos cruceros, específicamente en la Bahía de La Paz, se muestran en la *Tabla 2* a continuación. En conjunto, los diez cruceros que atracaron en la Bahía durante la pandemia liberaron emisiones estimadas de 108,760 Tm de CO₂, 330 Tm de SO₂ y 2,800 Tm de NO_x. También vertieron unos 8.06 millones de m³ de aguas de lavado, lo que equivale a la capacidad de 2.13 millones de fosas sépticas típicas¹⁷ o de 3,224 albercas olímpicas. Hay que tener en cuenta que todas estas emisiones y efluentes se produjeron en visitas a la bahía que no estaban programadas en los itinerarios originales de esos barcos. Los datos, los cálculos y la metodología del estudio pueden consultarse en el apéndice del reporte.

Sumadas las estancias de las diez embarcaciones que anclaron en la Bahía de La Paz, se realizaron un total de 45 visitas, pasando casi 600 días en conjunto en la Bahía. El *Koningsdam* y el *Zuiderdam* pasaron 74.2 y 73.4 días en la Bahía, respectivamente, con emisiones de NO_x de 340 y 370 toneladas, y efluentes de aguas de lavado de casi un millón de m³ por cada embarcación.

Las mayores emisiones totales mensuales en la Bahía de La Paz de los barcos estudiados se produjeron en abril de 2021, mes en el que estos barcos – anclados – emitieron conjuntamente 730 Tm de NO_x, 90 Tm de SO₂, 35 Tm de MP y 2.1 millones de m³ de efluentes. El segundo y tercer mes más contaminantes fueron marzo y junio de 2021, respectivamente. En el Apéndice (*Tabla 7*) se pueden encontrar más detalles.

¹⁷ Sistema séptico para una casa típica de 3 dormitorios y 2,500 pies cuadrados = 3.79 m³ (1,000 galones).

Tabla 2: Consumo de combustible, emisiones y efluentes de aguas de lavado de los cruceros estudiados, anclados en la Bahía de La Paz, entre el 1 de enero de 2020 y el 30 de junio de 2021.

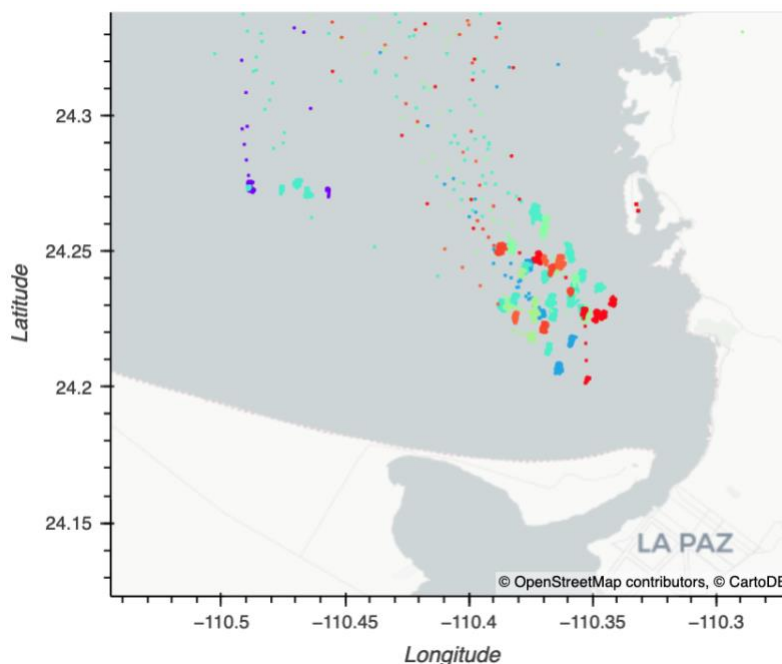
Naviera	Embarcación	Escalas La Paz	Tiempo La Paz (días)	Combustible (Tm)	CO ₂ (Tm)	NO _x (Tm)	SO ₂ (Tm)	MP (Tm)	Efluentes (m ³)
Holland America	Koningsdam	6	74.2	4,330	13,480	340	40	20	998,510
	Nieuw Amsterdam	3	43.8	2,550	7,950	220	20	10	589,380
	Noordam	5	68.0	3,960	12,350	350	40	10	914,890
	Westerdam	5	57.4	3,340	10,410	290	30	10	771,480
	Zuiderdam	5	73.4	4,280	13,320	370	40	20	986,710
Princess Cruises	Emerald Princess	5	69.4	4,050	12,620	350	40	20	934,360
	Grand Princess	4	57.3	3,340	10,420	310	30	10	771,320
	Majestic Princess	4	53.1	3,090	9,640	50	30	10	713,860
	Royal Princess	4	53.5	3,120	9,720	270	30	10	719,920
	Ruby Princess	4	48.8	2,840	8,850	250	30	10	655,670
Total		45	598.9	34,900	108,760	2,800	330	130	8,056,100

Después de un cuidadoso análisis, es evidente que las visitas a la Bahía de La Paz por parte de estos 10 cruceros no implicaron actividad alguna relacionada con pasajeros o en tierra, ya que los cruceros no estaban programados para visitar la región (ver *Tabla 1* - escalas programadas); no hicieron escala en las terminales de cruceros; y, todos permanecieron anclados en la Bahía (*Figura 3*). Las visitas a la Bahía de La Paz duraron varias semanas en muchos casos (*Figura 4*), y la actividad diaria de emisiones de SO₂ los muestra en un estado de reposo en caliente durante la pandemia de COVID-19.¹⁸

Durante el reposo en caliente, los cruceros dejan de realizar muchas de las operaciones relacionadas con el entretenimiento y hospitalidad de los pasajeros. Sin embargo, los motores principales siguen funcionando según sea necesario para la propulsión del barco y el mantenimiento de operaciones seguras. También se asume que los motores auxiliares siguen funcionando para mantener los sistemas críticos de la embarcación, incluidos los sistemas de calefacción y aire acondicionado a bordo, aunque los cruceros no lleven pasajeros. El mantenimiento de los sistemas de temperatura y humedad a bordo ayuda a evitar potenciales problemas de moho y condensación que pueden producirse cuando se opera en el entorno marino.

¹⁸ <https://www.royalcaribbeanblog.com/2020/08/20/what-does-it-mean-when-cruise-ship-goes-cold-lay-up-to-cost-millions-per-month-per-cruise-ship.html>
<https://www.cruiseindustrynews.com/cruise-news/22713-hot-lay-up-to-cost-millions-per-month-per-cruise-ship.html>
<https://www.forbes.com/sites/dougcollan/2020/08/10/where-are-all-the-cruise-ships/?sh=5eb5bb716f6a>

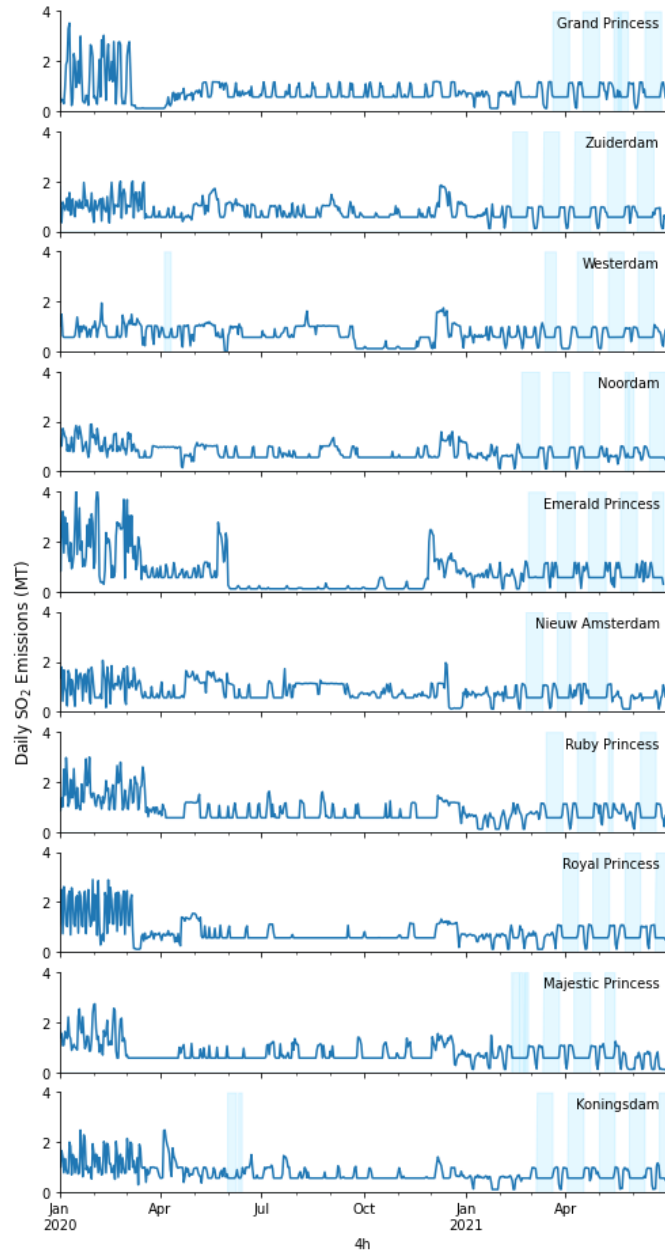
Figura 3: Posiciones derivadas del Sistema de Identificación Automática (AIS, por sus siglas en inglés), de los cruceros anclados en la Bahía de La Paz.



La pandemia de COVID-19 fue declarada oficialmente por la Organización Mundial de la Salud (OMS) de la ONU el 11 de marzo de 2020. Tras el inicio de la pandemia, al comenzar las restricciones de actividades económicas, los cruceros entraron en periodos de reposo en caliente, en los que redujeron significativamente las velocidades y la carga de los motores y operaron con tripulaciones esqueléticas, mostrando menores niveles de emisiones. Aproximadamente un año después del inicio de la pandemia, los diez cruceros estudiados viajaron a la Bahía de La Paz, Baja California Sur, y anclaron en reposo en caliente. Los periodos de tiempo durante los cuales estos cruceros estuvieron atracados en esta zona se muestran en las barras color azul claro de la *Figura 4* a continuación.

Sin embargo, vale la pena señalar que ninguno de estos cruceros tiene su puerto base en México. De hecho, como se detalla en la *Tabla 3* del Apéndice, cinco de ellos tienen su puerto base en Rotterdam (Países Bajos), cuatro en Hamilton (Bermudas) (un territorio insular británico en el Atlántico Norte) y uno en Vancouver (Canadá). Esto, por supuesto, plantea la cuestión de por qué estos cruceros estuvieron atracados en la Bahía de La Paz, en México, durante largos periodos de tiempo en reposo en caliente, y no en sus puertos de origen.

Figura 4: Tendencia de las emisiones diarias de SO₂, por crucero, desde el 1 de enero de 2020 hasta el 30 de junio de 2021. Las barras sombreadas en azul claro muestran los momentos en los que los cruceros estuvieron anclados en la Bahía de La Paz.



3. Contexto Ambiental

3.1 Efecto de los efluentes de los depuradores en el entorno marino

La información y los análisis públicos sobre los impactos en el ecosistema marino causados por las concentraciones de contaminantes de las aguas de lavado, son todavía escasos. Aunque hay muchos estudios sobre la contaminación y la acidificación de los océanos, todavía existen muchas preguntas sobre los impactos directos e indirectos de la contaminación derivada de los efluentes de los depuradores en el ecosistema marino. Aquí, las zonas de valor ecológico (como los estuarios, las bahías y los arrecifes de coral) son frágiles y requieren una atención especial para evitar perturbaciones ambientales que puedan desencadenar un efecto de deterioro en cascada que podría afectar el bienestar de una comunidad en el futuro.

Los depuradores reducen eficazmente el contenido de azufre de los gases de escape de los cruceros, lo suficiente para cumplir con el nuevo límite impuesto por la OMI. Sin embargo, esta tecnología utiliza agua de mar para disminuir el SO_x de esos gases, y luego se libera al océano en forma de agua de lavado. Esta agua de lavado es más ácida que el agua de mar y se ha descubierto que, además, contiene metales pesados y otros contaminantes. Entre los metales pesados presentes en los efluentes de los SLGE se encuentran el vanadio, el níquel, el cobre, el cadmio, el mercurio y el plomo—sustancias tóxicas que son ingeridas y absorbidas por los organismos vivos y que se acumulan a lo largo de la cadena alimentaria.

La naturaleza ácida de estos efluentes reduce el pH del agua de mar en las zonas donde los cruceros realizan las descargas. Esto puede suponer una amenaza para múltiples especies marinas, ya que puede afectar su capacidad para mantener un equilibrio fisiológico adecuado del pH o asimilar el carbonato cálcico para formar esqueletos y conchas.

Por otro lado, la acidificación de los océanos, como consecuencia del aumento de las concentraciones de óxidos de azufre, metales e hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) procedentes de los efluentes de las embarcaciones puede ser una cuestión importante en el futuro, ya que contribuiría aún más al cambio climático antropogénico. Por ello, es un área que requiere mayor investigación. Sin embargo, en general, existen muchas pruebas de que estos efluentes tienen un impacto negativo en el medio ambiente marino, ya que alteran el delicado equilibrio de estos ecosistemas (a través de cambios en la temperatura, la turbidez, el pH y otros factores), además de que afectan directamente a múltiples especies marinas por su carácter contaminante.

Dado que cada vez es mayor el número de embarcaciones que optan por la tecnología de los depuradores para cumplir con la OMI 2020, en lugar de utilizar combustibles con bajo contenido en azufre, y considerando que los ecosistemas marinos ya están sometidos a la presión de la contaminación y la acidificación de los océanos a causa del cambio climático, diversos estudios han concluido que el vertido de las aguas de lavado de los depuradores debe restringirse o, como

mínimo, regularse (especialmente en los ecosistemas marinos sensibles y en las zonas donde la circulación del agua es escasa).

3.2 Contaminación del aire y del agua por los cruceros estudiados

Las aguas de lavado de los depuradores contienen compuestos ácidos, eliminados de los gases de escape, así como metales pesados y otros contaminantes. Aunque los parámetros específicos de contaminación en las aguas de lavado siguen siendo inciertos, un análisis de múltiples estudios realizado por el ICCT¹⁹ muestra que el pH promedio de las aguas de lavado de los sistemas de depuración de circuito abierto es de 5.63, lo que significa que estos efluentes son ácidos. Los metales pesados presentes en las aguas de lavado de los depuradores incluyen, además, vanadio, níquel, cobre, cadmio, mercurio y plomo.

Este análisis muestra un claro patrón de embarcaciones que visitaron la Bahía de La Paz durante largos períodos de tiempo durante la pandemia de COVID-19. Durante estas visitas, los cruceros permanecieron anclados, sin operaciones relacionadas a los pasajeros, emitiendo un estimado de 8.06 millones de m³ de aguas de lavado. Como se ha mencionado antes, los efluentes de los depuradores de circuito abierto son ácidos y contienen metales pesados que pueden ser perjudiciales para el medio ambiente marino, un problema ya conocido en la Bahía de La Paz.²⁰

Con base en las estimaciones de este estudio, a través de las aguas de lavado, los cruceros pudieron haber aportado hasta 21.3 kg de HAP, 1.25 kg de mercurio, 93 kg de plomo y 1,667.5 kg de vanadio a las aguas de la Bahía de La Paz.²¹

En total, estos diez cruceros emitieron 2,800 toneladas de NO_x, la mayoría de ellas entre febrero y junio de 2021. Para poner este número en perspectiva, esa cantidad de emisiones equivale al 0.1% de las emisiones totales de NO_x de la flota de vehículos ligeros (sin contar los que utilizan diésel) de Estados Unidos en 2017.²² Del mismo modo, estos cruceros emitieron 330 toneladas de SO₂, lo que equivale al 1.6% de las emisiones totales de SO₂ de los vehículos ligeros (sin contar los que utilizan diésel) de Estados Unidos en ese mismo año.²³ Véase la *Figura 5* a continuación para la sumatoria de las emisiones de los 10 cruceros, por mes.

¹⁹ <https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/Air-water-pollution-scrubbers-dec2020.pdf>

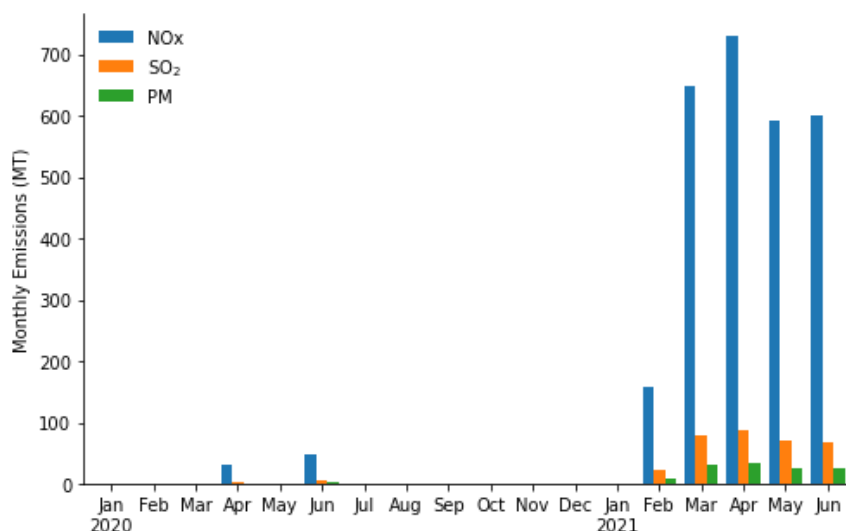
²⁰ Pérez-Tribouillier, H., Shumilin, E. and Rodríguez-Figueroa, G.M., 2015. *Trace elements in the marine sediments of the La Paz Lagoon, Baja California Peninsula, Mexico: pollution status in 2013*. Bulletin of environmental contamination and toxicology, 95(1), pp.61-66.

²¹ Véase el cuadro 9 del informe mencionado en la nota 19.

²² <https://gispub.epa.gov/neireport/2017/>

²³ Ibid.

Figura 5: Suma de las emisiones mensuales de NO_x, SO₂ y PM de los 10 cruceros estudiados, en la Bahía de La Paz, desde el 1 de enero de 2020 hasta el 30 de junio de 2021.



4. Conclusiones

La OMI aprobó la regulación OMI 2020 para hacer frente a las emisiones atmosféricas contaminantes del sector del transporte marítimo, en particular las de azufre, limitando el contenido de azufre admisible en los combustibles de los barcos. Este límite se fija hoy en el 0.5%, y hasta el 0.1% en las zonas de control de emisiones. Hoy en día, México no está cubierto por una ECA, por lo que el límite de contenido de azufre permitido en todo el país es del 0.5%.

Aunque una parte de la industria naviera está haciendo la transición a combustibles más limpios, como el LSFO, incluido el MGO, y el GNL, muchas embarcaciones siguen funcionando con combustible pesado ya que están equipadas con sistemas de limpieza de gases de escape (o depuradores), para cumplir con la OMI 2020. Por ello, es probable que el uso de los depuradores incremente en el sector marítimo en un futuro, y en particular en las flotas de cruceros, ya que siguen siendo una solución más económica para cumplir con dicha normativa. El número total, global de embarcaciones equipadas con depuradores pasó de 243 en 2015 a más de 4,300 en 2020, cuando entró en vigor la OMI 2020. En el sector de los cruceros, un informe²⁴ de la industria de 2021 reveló que a finales de ese año, casi el 70% de la flota mundial de cruceros había sido equipada con SLGE, y el 96% de los barcos de nueva construcción (sin contar los de gas natural licuado) se adaptarán con depuradores.

²⁴ https://cruising.org/-/media/research-updates/research/2021-state-of-the-cruise-industry_optimized.ashx

Los depuradores de circuito abierto utilizan agua de mar para "limpiar" los contaminantes de los gases de escape, pero dado que esta agua de mar (con mayores concentraciones de contaminantes, y más ácida) se vierte de nuevo al océano, esta tecnología está transfiriendo esencialmente la contaminación de lo que habrían sido las emisiones atmosféricas, directamente al ambiente marino.²⁵ Los efluentes del agua de lavado contienen compuestos acidificantes, así como metales pesados, HAP y otras sustancias tóxicas potencialmente dañinas para la vida marina, y que pueden contribuir a la acidificación del océano y al cambio climático inducido por el hombre.

Por ello, algunas jurisdicciones alrededor del mundo han tomado medidas para mitigar la contaminación de estos efluentes mediante reglamentos propios. En el hemisferio occidental, ocho lugares actualmente prohíben de alguna forma los vertidos de SLGE en sus aguas; diez si se cuentan Argentina y Brasil, cuyas prohibiciones no están activas actualmente. Algunos otros lugares de las Américas tienen criterios especiales para los efluentes de los depuradores que incluyen límites de HAP, pH, turbidez y metales (más allá de los establecidos por las directrices de la OMI de 2015), con el objetivo de garantizar que los efluentes reciban el mejor tratamiento posible antes de ser descargados al mar.

Hasta que no se haga una mayor investigación y surjan pruebas más contundentes sobre las consecuencias a largo plazo de los efluentes de los sistemas de limpieza de gases de escape en el medio ambiente marino (e indirectamente, en los seres humanos), y mientras la OMI no decida actuar a nivel internacional, seguirá cayendo en manos de las jurisdicciones individuales la protección de sus ecosistemas marinos mediante la aplicación de regulaciones locales, regionales o incluso nacionales. La Paz, y México en general, no ha promulgado ninguna norma especial que aborde la contaminación atmosférica o marina provocada por el transporte marítimo; los vertidos de los SLGE están permitidos.

En un esfuerzo por comprender las posibles consecuencias climáticas y ambientales del anclaje de cruceros en la Bahía de La Paz, en el Golfo de California, durante la pandemia de COVID-19, este estudio analizó los movimientos y cuantificó las emisiones atmosféricas y los efluentes marinos de 10 cruceros desde el 1 de enero de 2020 hasta el 30 de junio de 2021 (mostrados en la *Tabla 1* del reporte). Esto, ya que se sabe que todas estas embarcaciones estuvieron ancladas por largos periodos de tiempo en la Bahía de La Paz en algún momento durante esos meses, sin actividades relacionadas con pasajeros.

Durante el período de estudio, las 10 embarcaciones de este análisis consumieron un total estimado de 436,300 toneladas métricas (Tm) de combustible a nivel mundial, lo que equivale a alrededor del 4.6% de la flota mundial de cruceros. Las emisiones totales y los efluentes de aguas de lavado de estos cruceros, específicamente en la Bahía de La Paz, se muestran en la *Tabla 2* de este reporte. En total, los diez cruceros que atracaron en la Bahía durante la pandemia emitieron un total estimado de 108,760 Tm de CO₂, 330 Tm de SO₂ y 2,800 Tm de NO_x.

²⁵ Georgeff, E. (2020). *A killer whale's tale: Protect critical habitats by addressing scrubber washwater from ships*. Disponible en <https://theicct.org/blog/staff/killer-whale-tale-scrubbers-062020>

Esa cantidad de emisiones de NO_x equivale al 0.1% de las emisiones totales de la flota de vehículos ligeros no diésel de Estados Unidos en 2017.²⁶ Del mismo modo, los 10 barcos emitieron 330 toneladas de SO₂, lo que equivale al 1.6% de las emisiones totales de SO₂ de los vehículos ligeros no diésel de Estados Unidos en ese mismo año.

Con base en datos públicos, se sabe que los 10 cruceros de este estudio han sido equipados con depuradores de circuito abierto. En total, estas embarcaciones descargaron 8.06 millones de m³ de aguas de lavado, lo que equivale a unas 3,224 albercas olímpicas. El agua de lavado de circuito abierto es ácida y contiene metales pesados que pueden ser perjudiciales para el medio ambiente marino—un problema conocido en la Bahía de La Paz.²⁷ Con base en los efluentes totales estimados a través de este estudio, estas 10 embarcaciones pudieron haber aportado hasta 21.3 kg de HAP, 1.25 kg de mercurio, 93 kg de plomo y 1,667.5 kg de vanadio a las aguas de la Bahía de La Paz.²⁸

Tras una revisión de los datos, es evidente que las visitas a la Bahía de La Paz por parte de estos cruceros no implicaron ninguna actividad relacionada con pasajeros o en tierra, ya que los barcos no estaban programados para visitar la región (ver *Tabla 1* de este reporte - escalas programadas); no hicieron escala en las terminales de cruceros; y, todos ellos permanecieron anclados en la Bahía (*Figura 3* de este reporte). Además, en muchos casos, las visitas a la Bahía de La Paz duraron varias semanas seguidas (*Figura 4*).

Estos cruceros visitaron la Bahía de La Paz un total de 45 veces durante el periodo de estudio, para estancias sin pasajeros. En conjunto, pasaron casi 600 días en esta bahía. Durante este tiempo, esos 10 cruceros operaron en modo de reposo en caliente, con los sistemas de a bordo activos para mantener los controles de temperatura y humedad, con el propósito de que la embarcación pudiera ser activada rápidamente cuando se levantaran las restricciones de viaje y turismo relacionadas con la pandemia. Sin embargo, esto significó que el impacto ambiental de los cruceros también fue mayor, a través de una mayor carga de los motores, las emisiones y las aguas de lavado de los depuradores instalados.

Este análisis muestra claramente que estos 10 cruceros viajaron a la Bahía de La Paz mientras esperaban a que se levantaran las restricciones relacionadas con la pandemia y permanecieron allí durante varias semanas consecutivas. Además, estos cruceros produjeron emisiones proporcionalmente más altas que la media de la flota, ya que tienen un mayor tonelaje que el promedio de los cruceros. En conjunto, mientras permanecieron anclados durante mucho tiempo en la Bahía de La Paz, en México, emitieron niveles significativos de contaminantes atmosféricos (incluidos aquéllos que son perjudiciales para la salud humana y que contribuyen al cambio climático), así como efluentes de aguas de lavado contaminantes que podrían tener múltiples efectos negativos en el ecosistema marino.

²⁶ <https://gispub.epa.gov/neireport/2017/>

²⁷ Pérez-Tribouillier, H., Shumilin, E. and Rodríguez-Figueroa, G.M., 2015. *Trace elements in the marine sediments of the La Paz Lagoon, Baja California Peninsula, Mexico: pollution status in 2013*. Bulletin of environmental contamination and toxicology, 95(1), pp.61-66.

²⁸ Ver la Tabla 9 del reporte que se menciona en la nota al pie número 19 de este reporte.

Apéndice

Insumos y Metodología del Estudio

1.1 Datos de Las embarcaciones

EERA recopiló datos sobre las características para el conjunto de 10 cruceros que se muestran en la *Tabla 3* a continuación. Estos datos se recopilaron de fuentes disponibles públicamente, incluidos los materiales promocionales de las líneas de cruceros, los sitios web de los fabricantes y los datos de Tráfico Marítimo. Estos 10 cruceros navegaron por todo el mundo a lo largo de 2020 y 2021, con rutas que cambian estacionalmente y en respuesta a la pandemia de COVID-19.

Tabla 3: Características de los cruceros incluidos en este estudio.

Embarcación	IMO	Tonelaje bruto	ME Power (kW)	Compañía	Puerto Base	Año de Construcción	Velocidad Max. (nudos)
Koningsdam	9692557	99,863	50,400	Holland America	Rotterdam, NL	2014	22
Nieuw Amsterdam	9378450	86,700	64,000	Holland America	Rotterdam, NL	2008	23.9
Noordam	9230115	82,318	51,840	Holland America	Rotterdam, NL	2005	23
Westerdam	9226891	82,348	51,840	Holland America	Rotterdam, NL	2004	24
Zuiderdam	9221279	82,305	51,840	Holland America	Rotterdam, NL	2002	24
Emerald Princess	9333151	113,561	67,000	Princess Cruises	Hamilton, BM	2005	21.5
Grand Princess	9104005	107,517	69,120	Princess Cruises	Hamilton, BM	1998	23
Majestic Princess	9614141	143,700	62,400	Princess Cruises	Vancouver, CA	2017	23
Royal Princess	9584712	142,714	62,400	Princess Cruises	Hamilton, BM	2010	22.9
Ruby Princess	9378462	113,561	67,200	Princess Cruises	Hamilton, BM	2008	23

1.2 Datos de actividad AIS

Se recopilaron los datos posicionales del AIS para los 10 cruceros del estudio desde el 1 de enero de 2020 hasta el 30 de junio de 2021, a partir del Catastro Marítimo y el Tráfico Marítimo.²⁹ Los datos se muestrearon con un intervalo medio de 4 horas entre posiciones consecutivas, lo que permitió una frecuencia temporal suficiente para el análisis de sus operaciones.

La distribución de las posiciones de los cruceros en este análisis se muestra en la *Figura 6* (panel superior). Este mapa muestra la distribución global de los viajes hechos por estos 10 cruceros durante el período comprendido entre el 1 de enero de 2020 y el 30 de junio de 2021, con recuadros adicionales que muestran la densidad de posiciones en los viajes desde el sur de California a lo largo de la costa de Baja California, y hacia Oceanía y Asia.

²⁹ <https://marinecadastre.gov/ais/>

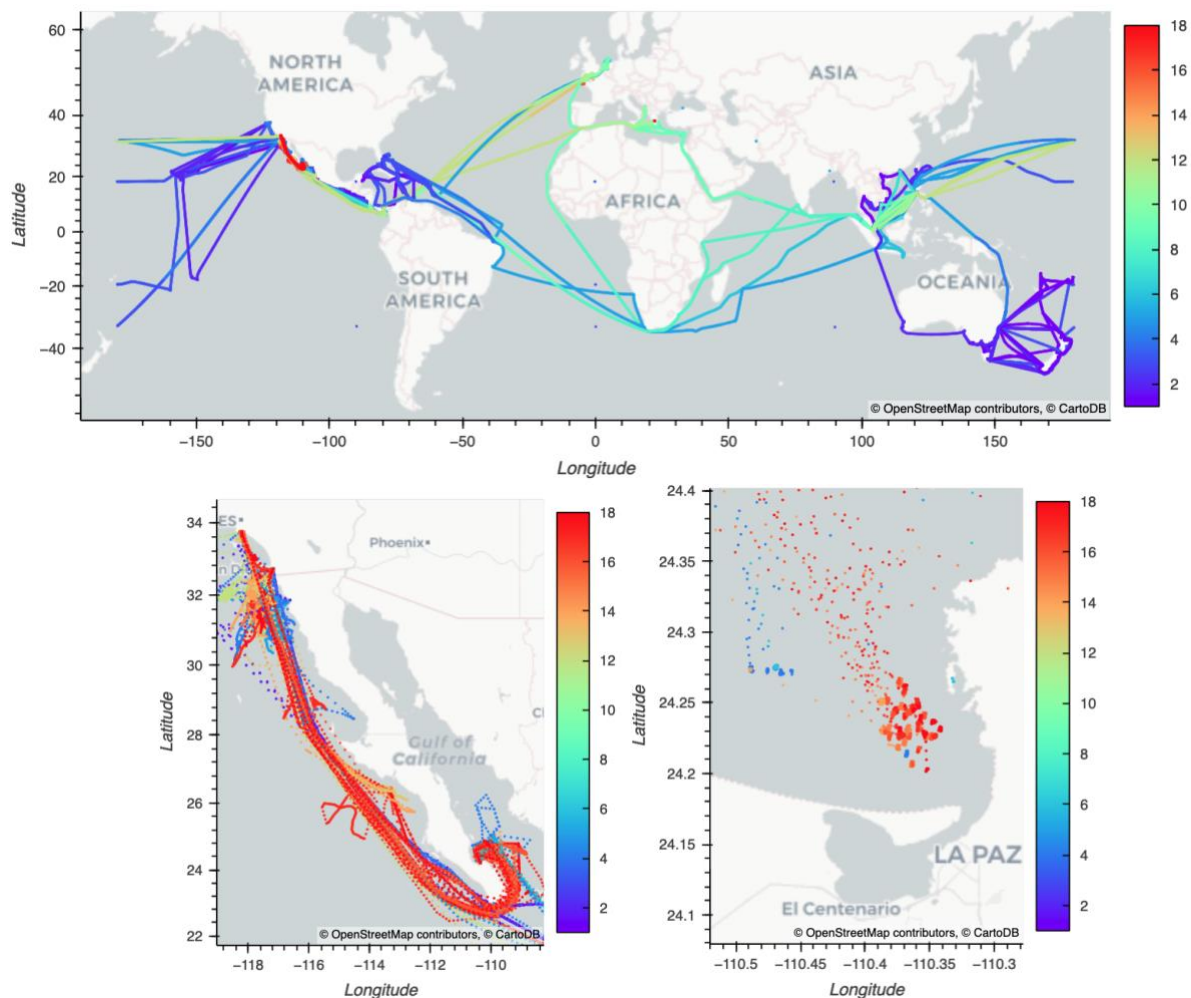


Figura 6: Posiciones de las embarcaciones a nivel global (panel superior), alrededor de Baja California (abajo a la izquierda), y en la Bahía de La Paz (abajo a la derecha), coloreadas por mes. El mes 1, en violeta, corresponde a enero 2021 y el mes 18, en rojo, a junio 2021.

EERA realizó un análisis de la distribución temporal de las posiciones. Como se muestra en la Figura 6, cuando se observa la distribución de las posiciones de los cruceros de manera temporal, se observa una concentración en las posiciones de los barcos a partir de las operaciones globales al principio del periodo de observación (panel superior), mostradas por los colores en el extremo azul de la escala del arcoíris, hasta las operaciones alrededor de Baja California (abajo a la izquierda) más tarde en el periodo de observación, mostradas por los colores en el extremo rojo de la escala del arcoíris, incluyendo el anclaje en la Bahía de La Paz (abajo a la derecha).

1.3 Modelación de las emisiones

A partir de las posiciones AIS observadas, EERA estimó la carga del motor, el consumo de combustible y las emisiones asociadas a las operaciones de las embarcaciones. Las posiciones se extrajeron con un intervalo medio de 4 horas, aunque debido a las lagunas en la cobertura del AIS algunos intervalos entre las posiciones llegaron a ser de 91.6 horas. Se trata de posiciones atípicas identificadas durante el control de calidad. Hubo 125 posiciones en las que se observaron diferencias de tiempo superiores a 6 horas, en cuyo caso se asumió que el intervalo de tiempo era de 4 horas. Tras realizar la limpieza de los datos, las posiciones de 4 horas se interpolaron a intervalos de 1 hora. Este enfoque permitió mantener una resolución temporal suficiente para un análisis detallado.

La potencia del motor principal del barco se extrajo de una búsqueda de datos disponibles públicamente, y las emisiones se estimaron siguiendo las directrices de la EPA³⁰ en función de la velocidad del barco, según la fórmula modificada de la Teoría de la Hélice/fórmula de Admiralty que se muestra a continuación:

$$Power_i = P_{ref} \cdot \left(\frac{V_{obs}}{V_{ref}} \right)^3 \cdot SM$$

Donde V_{obs} es la velocidad observada de la embarcación, y V_{ref} es la velocidad máxima de la embarcación. P_{ref} es la potencia del motor principal y SM es el margen del mar, un factor de escala de 1.1 toma en cuenta las corrientes marinas, olaje y condiciones meteorológicas. El calado de las embarcaciones no estaba disponible en los datos proporcionados por *Marine Traffic*, por lo que no se aplicó la versión completa de la fórmula, y estas estimaciones pueden considerarse un límite superior, ya que las embarcaciones pueden ajustar el calado y el asiento para maximizar la eficiencia mientras están en marcha.³¹

Las emisiones (E) del contaminante j, para la actividad temporal delta entre posiciones (t) pueden entonces estimarse de la siguiente manera:

$$E_{i,j,t} = Power_i \cdot EF_j \cdot Activity_t$$

Cuando la potencia se describe de esta manera, los factores de emisión de contaminantes (FE) en g/kWh se derivan de las disposiciones de la EPA, y la actividad se mide en horas entre las posiciones del crucero. Las cargas de los motores auxiliares y de las calderas no suelen variar con

³⁰ <https://www.epa.gov/state-and-local-transportation/port-emissions-inventory-guidance>

³¹ En la fórmula Admiralty totalmente especificada, el calado sirve para escalar la ecuación, con un factor de escala menor o igual a 1, derivado de la relación entre el calado observado y el calado de diseño, a la potencia 2/3. Así, una reducción del 10% en el calado respecto al calado de diseño, conduce a una reducción del 6.8% en las necesidades de potencia.

la velocidad en la medida en que varían las cargas de los motores principales, por lo que EERA aplicó las cargas de los motores auxiliares y de las calderas basándose en las disposiciones de la EPA. Las emisiones totales se calcularon entonces como la suma de las emisiones de los motores principales, los auxiliares y las calderas.

Todos los cruceros estudiados tienen instalados sistemas de limpieza de gases de escape (SLGE o depuradores) de circuito abierto o de agua de mar. En consecuencia, EERA modeló las emisiones asumiendo un 0.5% de azufre en el combustible en todas las áreas, de acuerdo con la normativa OMI 2020, con los SLGE activados cuando el crucero está dentro de un área de control de emisiones. Los SLGE requieren energía para operar el sistema, lo que se supone que impone una carga parásita del 3% en el consumo de combustible mientras los SLGE están en operación. Se entiende que las tasas de descarga de agua de lavado se escalan linealmente con la potencia. Los sistemas abiertos tienen una tasa de agua de lavado de unos 45 m³ de agua por MWh de funcionamiento, mientras que los sistemas cerrados descargan entre 0.1 y 0.3 m³ por MWh de funcionamiento.³²

EERA aplicó factores de emisión a baja carga (*Tabla 4* abajo) basados en la *Tabla 3.10* del documento de orientación de la EPA para tener en cuenta la no linealidad en las emisiones de diferentes contaminantes a cargas de motor inferiores al 20%. La contabilización del ajuste a baja carga es importante en este estudio, ya que el 87% de las posiciones observadas tenían cargas de motor inferiores al 20% (*Figura 7*).

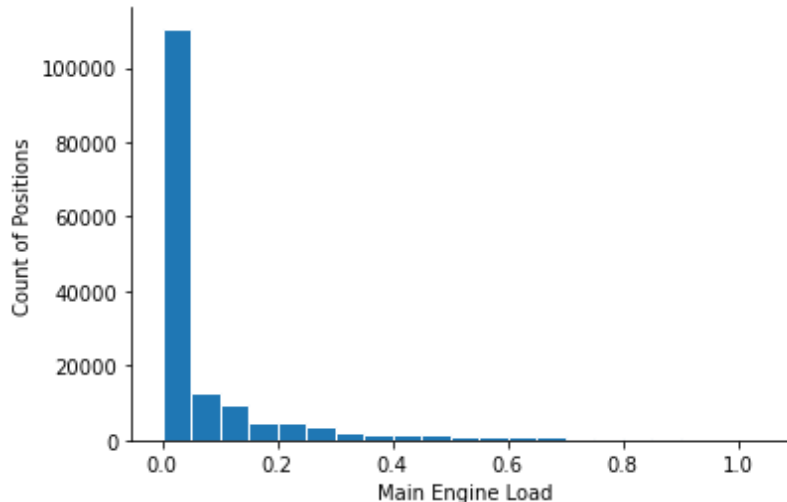


Figura 7: Distribución de las cargas de los motores principales en el conjunto de datos observados.

³² https://www3.epa.gov/npdes/pubs/vgp_exhaust_gas_scrubber.pdf

Tabla 4: Factores de ajuste por baja carga, aplicados según la Tabla 3.10 del documento guía de la EPA.

	nox_II	hc_II	co_II	pm_II	co2_II	so2_II
Carga	af	af	af	af	af	af
1%	4.63	21.18	9.68	7.29	3.28	9.54
2%	4.63	21.18	9.68	7.29	3.28	9.54
3%	2.92	11.68	6.46	4.33	2.44	6.38
4%	2.21	7.71	4.86	3.09	2.01	4.79
5%	1.83	5.61	3.89	2.44	1.76	3.85
6%	1.6	4.35	3.25	2.04	1.59	3.21
7%	1.45	3.52	2.79	1.79	1.47	2.76
8%	1.35	2.95	2.45	1.61	1.38	2.42
9%	1.27	2.52	2.18	1.48	1.31	2.16
10%	1.22	2.2	1.96	1.38	1.25	1.95
11%	1.17	1.96	1.79	1.3	1.21	1.78
12%	1.14	1.76	1.64	1.24	1.17	1.63
13%	1.11	1.6	1.52	1.19	1.14	1.51
14%	1.08	1.47	1.41	1.15	1.11	1.41
15%	1.06	1.36	1.32	1.11	1.08	1.32
16%	1.05	1.26	1.24	1.08	1.06	1.24
17%	1.03	1.18	1.17	1.06	1.04	1.17
18%	1.02	1.11	1.11	1.04	1.03	1.11
19%	1.01	1.05	1.05	1.02	1.01	1.05
20%	1	1	1	1	1	1

El consumo de combustible por hora, en función de la velocidad, sigue una curva no lineal, como se muestra en la *Figura 8*. Esta forma se ajusta a la forma funcional de la fórmula Admiralty subyacente, y estas curvas concuerdan bien con los resultados de otros trabajos realizados por EERA, y los resultados del Cuarto Estudio de la OMI sobre GEI³³, que muestran un consumo medio de combustible por hora del motor principal de 4.1 Tm a una velocidad media de 16.4 kts.³⁴

³³ <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Fourth-IMO-Greenhouse-Gas-Study-2020.aspx>

³⁴ Véase el cuadro 35 del Cuarto Informe de la OMI sobre los gases de efecto invernadero. En el caso de los cruceros de más de 150,000 GT, la media de días en el mar fue de 236, con una velocidad sobre el terreno de 16.4 kts y un consumo medio anual del motor principal de 23.2 kT. $23,200 / (236 * 24 \text{ horas}) = 4.1$ toneladas métricas de combustible por hora.

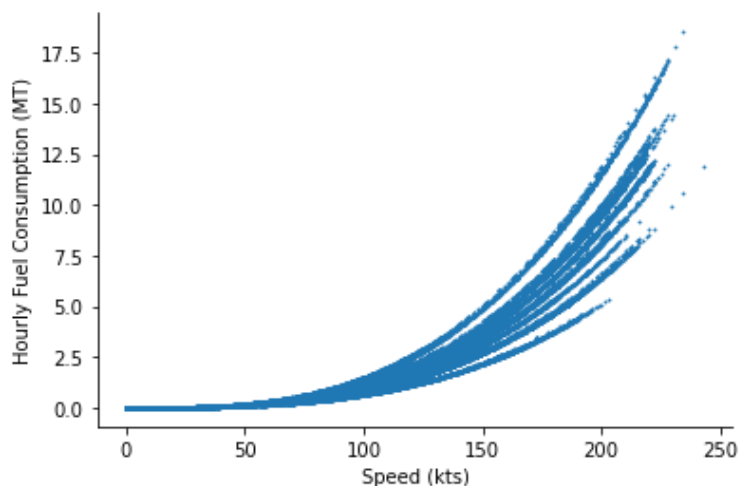


Figura 8: Consumo de combustible por hora, en función de la velocidad observada. (Los datos AIS proporcionan la velocidad sobre el terreno multiplicada por 10, para evitar almacenar los valores como datos flotantes en la base de datos).

1.4 Cargas y emisiones de motores auxiliares y calderas

Las cargas de los motores auxiliares y de las calderas no estaban disponibles para los cruceros estudiados. En consecuencia, EERA siguió el enfoque descrito por la EPA en su documento guía sobre inventarios portuarios,³⁵ que está en concordancia con la práctica recomendada y llevada a cabo en el Cuarto Estudio de GEI de la OMI (véase la Tabla 17 en GHG4). EERA aplicó las estimaciones de las cargas auxiliares y de caldera por tipo y tamaño de embarcación, así como el modo operativo derivado de GHG4. El modo operativo se determinó en función de la velocidad del barco y de los parámetros geográficos, como se muestra en la *Tabla 5* a continuación. Todos los cruceros estudiados se ajustan a los parámetros indicados en el GHG4 para embarcaciones con un tonelaje bruto superior a 60,000 GT.

Tabla 5: Parámetros del modo de funcionamiento y cargas de los motores auxiliares y de la caldera.

Modo	Geografía	Velocidad	Carga	Carga Aux + Caldera (kW)
Tránsito	Fuera del rompeolas	> 3kts	> 20%	11,500
Maniobra	≤ 10 MN del Puerto	> 1 kt	≤ 20%	15,480
Alojamiento	En el muelle (< 1 MN del Puerto)	≤ 1kt	NA	12,450
Anclaje	Anclado (1 – 10 MN del Puerto)	≤ 3kt	NA	12,600

³⁵ <https://www.epa.gov/state-and-local-transportation/port-emissions-inventory-guidance>

1.5 Efluentes de los SLGE

Los SLGE de circuito abierto extraen agua de mar del medio ambiente y ésta se rocía sobre los gases de escape para capturar el SO_x que, de otro modo, se hubiese emitido a la atmósfera. El agua de lavado se vuelve a verter al medio marino. Se ha confirmado que todos los sistemas SLGE de este estudio son sistemas de agua de mar de circuito abierto.³⁶ Según la documentación de la EPA,³⁷ y en consonancia con estudios recientes,³⁸ EERA asumió un caudal de agua de lavado del depurador de $45 \text{ m}^3/\text{MWh}$ de funcionamiento. Se utilizó la combinación del motor principal más el motor auxiliar y las cargas de la caldera para estimar la potencia total del barco para cada registro posicional, con los caudales de agua de lavado del SLGE ($[[WW]]_{\text{SLGE}}$) estimados mediante la siguiente ecuación:

$$WW_{EGCS} = Power_i \times 45 \text{ m}^3/\text{MWh}$$

Tabla 6: Porcentaje de emisiones globales, por embarcación, desde el 1 de enero de 2020 hasta el 30 de junio de 2021.

Compañía	Embarcación	Combustible (Tm)	CO ₂ (Tm)	NO _x (Tm)	SO ₂ (Tm)	MP (Tm)	Agua de Lavado (m ³)
Holland America	Koningsdam	8.16	8.16	7.85	8.59	8.53	8.17
	Nieuw Amsterdam	8.72	8.75	9.34	9.03	8.94	8.73
	Noordam	7.99	7.99	8.56	8.58	8.54	8.01
	Westerdam	7.75	7.83	8.34	7.69	7.6	7.74
	Zuiderdam	8.45	8.43	9.03	8.85	8.83	8.47
Princess Cruises	Emerald Princess	9.94	9.9	10.44	8.21	8.41	9.89
	Grand Princess	8.68	8.79	9.94	8.42	8.27	8.66
	Majestic Princess	8.07	8.06	1.73	8.39	8.42	8.08
	Royal Princess	8.73	8.7	9.32	8.85	8.92	8.74
	Ruby Princess		8.76	9.38	9.38	9.28	8.76

³⁶ Comunicación personal, Bryan Comer.

³⁷ https://www3.epa.gov/npdes/pubs/vgp_exhaust_gas_scrubber.pdf

³⁸ <https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/Air-water-pollution-scrubbers-dec2020.pdf>

Tabla 7: Consumo de combustible, emisiones y efluentes de aguas de lavado, por mes, en la Bahía de La Paz.

Mes inicial	Combustible (Tm)	CO₂ (Tm)	NOx (Tm)	SO₂ (Tm)	MP (Tm)	Aguas de Lavado (m³)
1/31/20						
2/29/20						
3/31/20						
4/30/20	360	1,130	30	-	-	83,480
5/31/20	20	60	-	-	-	4,480
6/30/20	630	1,970	50	10	-	146,260
7/31/20						
8/31/20						
9/30/20						
10/31/20						
11/30/20						
12/31/20						
1/31/21						
2/28/21	2,480	7,720	160	20	10	571,580
3/31/21	8,160	25,430	650	80	30	1,883,500
4/30/21	9,070	28,250	730	90	30	2,092,960
5/31/21	7,250	22,590	590	70	30	1,673,000
6/30/21	6,940	21,600	600	70	30	1,600,850