

El informe solicitado por parte del Gobierno al GTM pretende conocer con la máxima certidumbre científica cuáles son las condiciones atmosféricas de supervivencia del virus, y su interacción con la calidad del aire, hasta el punto de proponer experimentos que pudieran conducir a una mayor evidencia científica.

El GTM ha realizado un informe que contiene una exhaustiva recopilación de toda la información disponible, en el mismo se proponen nuevas medidas y se sugiere realizar nuevos estudios empíricos.

Informe del GTM¹ sobre “Atmósfera” y Covid-19

Este informe analiza dos cuestiones relacionadas con el clima y la contaminación atmosférica y su relación con la enfermedad COVID -19:

1. ¿Es estacional el virus SARS-Cov-2?
2. ¿Cuál es el impacto de la COVID-19 sobre el clima y la calidad del aire?

Para cada una de las cuestiones, se ha revisado en profundidad la evidencia disponible en la literatura científica (incluyendo literatura gris y pre-prints) y, cuando es posible, se plantean experimentos factibles para una mejor dilucidación de las posibles respuestas.

A continuación, se expone a modo de resumen las principales conclusiones sobre ambas cuestiones y posteriormente el documento describe de forma detallada el análisis llevado a cabo en los dos ámbitos.

Principales conclusiones del informe del GTM

¿Es estacional el virus SARS-Cov-2?

1. Estudios realizados in vitro indican que el SARS-CoV-2 parece ser muy estable a bajas temperaturas (4° C), observándose una reducción notable de la carga viral en función tanto del tiempo transcurrido como del incremento de la temperatura.

¹ El Grupo de Trabajo Multidisciplinar (GTM) asesora y apoya al Ministerio de Ciencia e Innovación en materias científicas relacionadas con el COVID-19 y sus consecuencias futuras. El [GTM](#) está compuesto por: José M. Ordovás (Presidente), Mariano Esteban, Rocío García-Retamero, Beatriz González López-Valcárcel, Alfonso Gordaliza, Marco Inzitari, Pedro Jordano, Itziar de Lecuona, Laura M. Lechuga, Ramón López de Mántaras, José Molero, Agustín Portela, Diego Puga, José Javier Ramasco, Francisco Sánchez-Madrid y Alfonso Valencia. En este informe han colaborado también Lola Ugarte, Jorge Mateu, Ferrán Ballester, Francisco Doblas, Raffaele Bernardello y Carlos Pérez García-Pando. Todos los componentes del GTM colaboran de forma desinteresada con el Ministerio de Ciencia e Innovación.

2. Con los estudios realizados y publicados hasta la fecha, no hay suficiente evidencia científica para predecir si su comportamiento será estacional fuera del entorno del laboratorio.
3. Sin embargo, el virus SARS-CoV-2 podría comportarse de forma similar al virus de la gripe, transmitiéndose menos eficientemente con las altas temperaturas. De hecho, los datos de termo-estabilidad del virus están en línea con los observados para el virus de la gripe, con una máxima estabilidad a 5° C que va disminuyendo al aumentar la temperatura. No obstante, hay una variable inédita en el caso del SARS-CoV-2 con respecto a los virus de la gripe estacionales, y es que la mayoría de la población (excepto los que ya han pasado la enfermedad) es susceptible de ser infectada. El virus podría compensar entonces la menor transmisibilidad en las estaciones más cálidas con el alto número de personas capaces de infectarse y de transmitir la enfermedad.
4. El número de coronavirus presentes en animales hospedadores (por ejemplo, murciélagos) muestran un comportamiento estacional, pero más asociado a su propia actividad orgánica (por ejemplo, hibernación en murciélagos de zonas templadas y virus de la rabia).
5. Aunque las altas temperaturas y los cambios de comportamiento social bajen la infectividad, no está garantizado que la epidemia desaparezca en verano, siendo bastante probable que prosiga a un ritmo más moderado y que incremente la actividad en otoño. Puesto que la hipótesis nula es no efecto (mientras no haya evidencia firme de un fenómeno, conviene mantener prudentemente que dicho fenómeno no existe o es débil), con todas estas incertidumbres **no se debería bajar la guardia en las estaciones cálidas**, ya que el virus SARS-CoV-2 puede seguir circulando de forma importante al haber muchas personas susceptibles.
6. En otoño e invierno las condiciones climáticas y actividades sociales (preferentemente en lugares cerrados) serán propicias para la estabilidad y circulación del virus, que se podrían traducir en un aumento de los contagios y de la enfermedad si las medidas de contención y el distanciamiento físico no se cumplen o se relajan en exceso.
7. El GTM propone realizar un **nuevo estudio empírico** que continúe y profundice en el iniciado por el ISCIII y la AEMET. Para ello se podría contar con especialistas en estadística espacio-temporal.
8. Para hacer un estudio de un caso real, existen varios modelos animales que se pueden infectar con el SARS-CoV-2. Entre ellos, recientemente se ha descrito un modelo basado en hámster sirio que reproduce muchas de las características de la enfermedad en humanos^{1,2}. Un aspecto muy interesante de este modelo es que se ha estudiado la transmisión aérea del coronavirus de un animal infectado a otro no infectado cuando los animales se mantuvieron en jaulas separadas. Este modelo es similar al descrito para el virus de la gripe y ha permitido valorar los efectos que tienen la temperatura y la humedad relativa en la transmisión del virus gripal. El GTM propone **poner a punto el modelo de laboratorio de hámster sirio para estudiar la transmisión del virus en diferentes condiciones ambientales** (temperatura y humedad) y profundizar en el conocimiento de la relación entre transmisibilidad y condiciones ambientales. Hay que indicar, no obstante, que una complejidad de este sistema experimental es que deberá realizarse en un laboratorio de seguridad biológica 3 (BSL-3).

¿Cuál es el impacto de la COVID-19 sobre el clima y la calidad del aire?

9. No hay una evidencia clara sobre la influencia de la contaminación en la transmisión de la COVID-19.
10. Durante el periodo de confinamiento se ha observado una disminución en algunos de los contaminantes principales (especialmente NO_2), relacionado directamente con las emisiones de los vehículos a motor. El descenso también es notorio, pero no tan importante, para el caso de las partículas.
11. La mejora de la calidad de aire durante el confinamiento puede tener beneficios asociados de reducción de la mortalidad y morbilidad por causas asociadas a la contaminación.
12. El GTM propone recomendaciones en cuanto a los estudios a realizar para obtener información más fiable a escala nacional:
 - Medir las reducciones reales de contaminantes en los núcleos urbanos más densamente poblados.
 - Estimar la reducción de la mortalidad y morbilidad por provincia usando las estimaciones de reducción real de la contaminación (como detalla Achebak et al.^{3 4}).
 - Calcular las reducciones de emisiones por sector para emplearlas en modelos de predicción de la calidad del aire de forma que las predicciones usadas en las alertas por contaminación atmosférica sean suficientemente fiables.
 - Relacionar los hallazgos anteriores con la gestión de la movilidad a corto plazo y a su posible repercusión en el (re)diseño de las ciudades o sus actividades.
13. La disminución de la actividad socioeconómica debido a las medidas de contención de la pandemia se está traduciendo en una reducción, posiblemente transitoria, de las emisiones de gases de efecto invernadero (CO_2 , metano). Pero de no haber cambios importantes a corto plazo, una vez que se está retomando la actividad, no se espera ninguna mejora en la perspectiva del cumplimiento del acuerdo de París sobre la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero de origen antrópico.
14. A escala global, se ha estimado en un 8% el descenso, respecto al valor de 2019, de las emisiones de CO_2 hasta el 30 de abril de 2020. Para situar este valor en el contexto de los acuerdos de París sobre el clima de 2015, se estima que el decrecimiento anual de emisiones globales de CO_2 debería ser del 7,6% durante esta década para cumplir con el objetivo de limitar el calentamiento global a 1.5°C por encima del promedio preindustrial. Es decir, el año 2020 estaría en ruta para cumplir con los objetivos de París, pero el mismo decrecimiento de emisiones se debería repetir cada año con respecto al año anterior hasta el año 2030, por lo menos, para cumplir completamente el acuerdo.
15. El tiempo relativamente largo que se necesita para detectar cual es el efecto de una reducción de las emisiones en el CO_2 atmosférico, constituye un desafío importante a la hora de implementar los acuerdos de París sobre el clima. Cada cinco años se realizará un inventario de los esfuerzos realizados y los resultados obtenidos (*global stocktake*). Considerando que el primero de estos inventarios se realizará en 2023, cualquier esfuerzo continuado de reducción en las emisiones de CO_2 inferior al 8%, aún yendo en la dirección correcta, no será detectable para entonces y por lo tanto resultará imposible



valorar en ese momento si los compromisos de los países participantes se han mantenido.

1. ¿Es estacional el virus SARS-Cov-2?

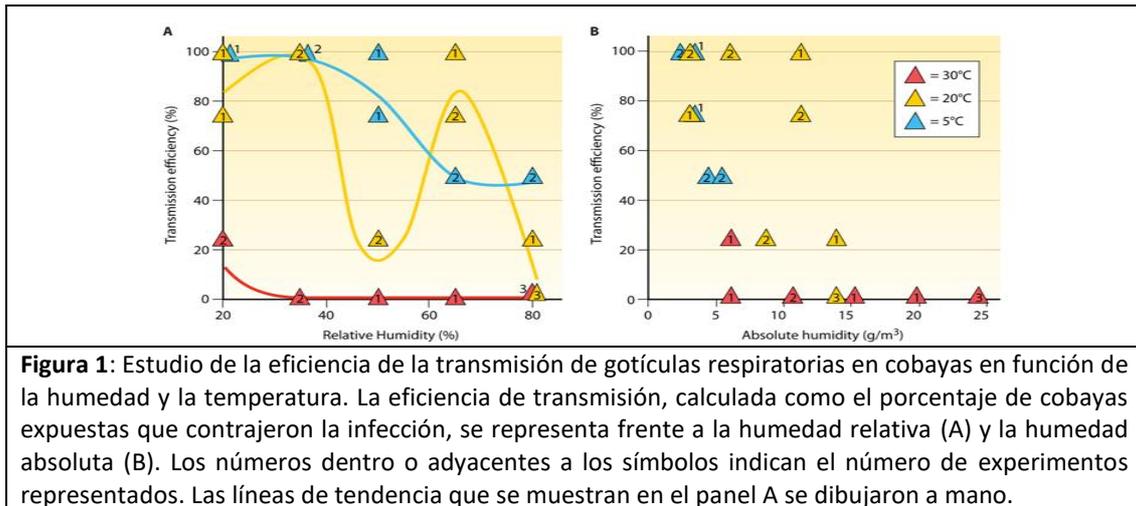
Según el CDC de EEUU⁵ todavía no se conoce con certeza si el clima o la temperatura afectan a la propagación de COVID-19. El *Center for Infectious Disease Research and Policy* (CIDRAP), en su informe del 30 de abril⁶, hace referencia a varios criterios relacionados con la influencia de la estacionalidad en la infección por SARS-CoV-2. Por un lado, parece que el virus puede proliferar en cualquier momento del año. La estacionalidad puede afectar a la extensión de un posible brote, pero no lo anula completamente. En la misma línea, el informe publicado en el marco del Convenio de Colaboración entre el [ISCIH y la AEMET](#), revisa la literatura sobre el SARS-Cov-2 y clima (temperatura, humedad) y concluye prudentemente que *“la capacidad del SARS-CoV-2 para extenderse eficazmente a nivel mundial, incluso en climas cálidos y húmedos, sugiere que, de momento, la estacionalidad no puede considerarse un factor modulador esencial de su transmisibilidad”*.

Estudios in vitro y analogía con otros virus estacionales

En estudios realizados in vitro el SARS-CoV-2 parece ser muy estable a 4° C. Se obtiene una reducción de 1000 veces en la carga viral tras 7 días, 1 día, 10 minutos y 1 minuto a temperaturas de incubación de 22° C, 37° C, 56° C y 70° C, respectivamente⁷.

Tentativamente, se podrían buscar **analogías** con el comportamiento de otros virus. Por ejemplo, la gripe es estacional como también lo son otros betacoronavirus humanos. El SARS y el MERS en principio parecerían no ser estacionales, pero hay que tener en cuenta que su propagación se controló en momentos muy iniciales, con pocos casos fuera del país de origen (según la OMS, el SARS se propagó a una treintena de países pero solo en Canadá, EE.UU., Mongolia, Filipinas, Vietnam, Taiwan y Singapur hubo algunos pocos casos de transmisión local, además de en China-Hong Kong-Macao), por lo que no existe suficiente evidencia para saber si el comportamiento de ambos virus es estacional. Sin embargo, en condiciones de laboratorio, el MERS-Cov ha mostrado que es [más estable a bajas temperaturas](#). Otros experimentos llevados a cabo en laboratorio⁸ sugieren que el SARS-CoV es extremadamente sensible a la temperatura, inactivándose en el ambiente cuando se pasa de 0° C a 20° C, y más aun de 20° C a 40° C, con cualquier nivel de humedad, aunque niveles muy altos de humedad también desactivan al virus.

Existen también **causas puramente físicas** por las que algunos virus se transmiten mejor a bajas temperaturas y con humedad intermedia. Aparte de la capacidad de desactivación del virus a muy altas temperaturas, las temperaturas intermedias-altas contribuyen a evaporar más rápido las gotículas, por lo que no son capaces de difundirse más lejos. En ambientes muy húmedos, las gotículas crecen en lugar de reducirse y caen más rápido, mientras que si el ambiente es muy seco las gotas pueden evaporarse más rápido. En ambientes con humedad y temperaturas intermedias, las gotículas portadoras de virus se van reduciendo de tamaño más lentamente, y permanecen más tiempo en el aire, favoreciendo la transmisión. Se han realizado experimentos *in vivo* sobre la transmisión de gripe por gotículas en hurones y en conejillos de indias. Por ejemplo en el artículo de [Lowen y Steel \(2014\)](#)⁹ se incluye una figura muy representativa de estos efectos (Ver Figura 1).



La complejidad de predecir si el virus SARS-CoV-2 tendrá un patrón estacional similar al de otros virus respiratorios queda puesta de manifiesto en el hecho de que a día de hoy todavía no disponemos de una explicación robusta y perfectamente clara del comportamiento estacional de un virus tan ampliamente estudiado como es el virus de la gripe, que se aisló por primera vez en cultivos de tejido en el año 1933. El virus de la gripe es un virus estacional en el hemisferio norte, donde circula de noviembre a marzo, y en el hemisferio sur, donde la circulación preferentemente ocurre entre mayo y septiembre, en contraste con lo que ocurre en las regiones tropicales, donde el virus circula a lo largo de todo el año. Entre los factores propuestos que contribuyen a este patrón de circulación del virus hay algunos fácilmente medibles como son la estabilidad físico-química del virus en diversas condiciones ambientales de temperatura y humedad, y otros factores más difíciles de cuantificar, como son la posible influencia de las estaciones en el funcionamiento del sistema inmune (por ejemplo, la reducción en los niveles de Vitamina D), los cambios sociales asociados a las estacionales (tales como el cierre de colegios en verano, la congregación de grupos de personas en sitios cerrados en invierno), y también la forma en que la temperatura y la humedad afectan el epitelio nasal humano, donde la infección se manifiesta antes de llegar a las vías respiratorias inferiores¹⁰. Se sabe además que el virus de la gripe se transmite de persona a persona bien a través de contacto directo o indirecto y también a través de gotas o aerosoles por vía respiratoria. Si bien se admite que la vía respiratoria es la más frecuente, la contribución de las diferentes formas es todavía un tema de debate, lo que añade más dificultad para predecir el comportamiento estacional del coronavirus SARS-CoV-2.

El efecto más notable de la estacionalidad en enfermedades como la gripe es la formación de frentes de propagación en el eje norte-sur. En el ecuador no existen variaciones estacionales y en países como Brasil lo que se observa es que la propagación de la gripe viene determinada por el incremento de casos en los países con más lazos en términos de movilidad y que tienen mayor estacionalidad. Existen una serie de artículos mostrando este efecto en la gripe^{11 12}. Dado que aún estamos en la fase de expansión de la pandemia Covid-19 a nivel mundial, todavía no se han observado estos fenómenos en los países del trópico.

En el caso del virus de la gripe hay varios experimentos de transmisión en cobayas que han permitido conocer la influencia de la temperatura y la humedad en la transmisión. En varias publicaciones se ha descrito cómo cobayas infectadas con el virus de la gripe transmiten el virus, bien por contacto con otras cobayas sanas que conviven en la misma jaula o bien por vía aérea cuando las cobayas infectadas y sanas están en jaulas próximas, pero separadas físicamente^{13 14 15}. La transmisión del virus en cobayas mantenidos en jaulas separadas fue más frecuente

cuando la temperatura ambiental fue de 5° C que cuando se mantenían a 20° C, mientras que a una temperatura de 30° C no se detectó transmisión del virus. La humedad relativa (HR) tuvo un efecto cuando los experimentos se realizaron a 20° C, y se observó que no hubo transmisión con una HR de un 80% pero sí a valores menores (ver Figura 1). En general, este patrón de transmisión está de acuerdo con el perfil de termo estabilidad del virus gripal en estas condiciones ambientales. Es particularmente llamativo que cuando se determinó el virus en muestras nasales de los animales infectados se observó que el virus se detectaba durante más días (6 frente 8) en animales que se mantenían a 5° C frente a los mantenidos a 20° C. Todos estos resultados (mayor estabilidad del virus y de su transmisibilidad y mayor período de excreción viral a 5° C comparado con temperaturas más altas) podrían explicar por qué el virus gripal es estacional, con alta circulación en los meses fríos. Una observación adicional de estos estudios es que cuando los animales convivían en la misma jaula sí se observó transmisión del virus a 30° C, un hecho que sugiere que el contacto directo, y no la vía aérea, puede ser la ruta de contagio en los trópicos, y esto podría explicar la no estacionalidad en estas zonas geográficas, ya que la transmisión por vía aérea no sería relevante en situaciones de altas concentraciones de personas en espacios reducidos.

Los coronavirus en animales hospedadores presentan un comportamiento estacional, pero más asociado a la actividad biológica del hospedador. En el caso de los murciélagos la prevalencia de infecciones aumenta notablemente a finales de primavera y principio de verano, debido a que hay una mayor concentración de individuos porque es su época de reproducción y tienen más actividad (período de partos, lactancia, etc.). Aunque es cierto que en invierno también se agrupan bastante para hibernar, como parte de su ciclo vital normal, sin embargo, reducen notablemente su actividad metabólica y su temperatura corporal baja radicalmente (en hipotermia incluso a 9° C), por lo que la replicación del virus en el hospedador es mucho menor.

Estudios empíricos para la pandemia del SARS-COV-2

Hay un número considerable de estudios empíricos utilizando datos de países, zonas geográficas o ciudades en el periodo de enero a mayo de 2020 que intentan predecir el comportamiento del SARS-CoV-2 en distintas condiciones climáticas. Una revisión de los estudios realizados hasta la fecha con datos de distintos países o territorios del mundo, indica que una gran mayoría de dichos estudios concluyen que el clima puede modular la transmisión del virus. A mayor temperatura, menor contagiosidad del SARS-Cov-2. La influencia de las condiciones de humedad sólo es significativa para algunos de estos estudios.

Sin embargo, los modelos estadísticos que comparan la incidencia del COV-19, o la mortalidad, o el R0, en distintos lugares **correlacionando transversalmente** esas medidas de comportamiento de la enfermedad con las condiciones climáticas (temperatura, humedad, latitud) tienen problemas metodológicos^{16 17 18 19 20 21 22 23 24 25}. Los ajustes de esos modelos son generalmente pobres y en algunos casos sólo utilizan datos de las primeras semanas (pre-pandemia¹⁸), o sólo de China^{16,19}. La temperatura media se mide para todo el país, obviando las variaciones intra-país que en algunos casos son incluso más intensas que entre países, por ejemplo en España, Italia o EEUU. Otros estudios más sofisticados tienen el problema de no ajustar suficientemente bien por variables confusoras y por la auto correlación espacial de los datos.

Además, en muchos estudios esas correlaciones no ajustan por otras co-variables asociadas a la temperatura, como el nivel de riqueza o de desarrollo económico (mayor en países fríos y a su vez correlacionada con la su alta capacidad de diagnóstico de la población). Otros factores claramente asociados a la propagación del virus como son la densidad de población, los sistemas de transporte colectivo (ciudades con metro suelen ser ciudades con mayor población, más

densidad y mayor infectividad del virus) y la interconectividad de la población (viajes de trabajo, etc.), también relacionados con el nivel económico, se omiten en la mayor parte de esos modelos (aunque no en todos ellos). Otro problema metodológico presente en varios de los estudios es que los supuestos de los modelos contradicen el conocimiento biológico/epidemiológico de la enfermedad. Ejemplos de prácticas erróneas en algunos de estos estudios es investigar correlaciones contemporáneas entre la temperatura y el número o tasa de nuevos contagios notificados, o con los fallecimientos, lo que implícitamente ignora el conocimiento sobre periodos de incubación y contagio. Con datos de Whuhan en el periodo de confinamiento,²⁶ [Ma et al \(2020\)](#) se concluyó que los mayores gradientes térmicos diarios se pueden asociar a una mayor mortalidad por COVID-19, ajustando por contaminación atmosférica. Pero las muertes se producirían (significación estadística) a los 3 o 5 días del cambio de temperatura, lo que no encaja con el conocimiento epidemiológico del comportamiento del virus. Tampoco el número de fallecidos declarados en Wuhan es fiable, como se ha deducido posteriormente.

Otro trabajo muy reciente es el de ²⁷ [Merow and Urban \(2020\)](#). Estos autores analizan como novedad las tasas de crecimiento de casos en días consecutivos, en lugar de los casos diarios. Para ello, utilizan variables meteorológicas (radiación ultravioleta, temperatura), y variables poblacionales. La novedad es que usan variables climáticas a escala muy próxima (medias de datos horarios en lugar de medias mensuales como en otros estudios). Con este nivel de desagregación pueden detectar cambios súbitos en la temperatura y así analizar cómo afectan estos cambios a la tasa de crecimiento de casos COVID-19. Sin embargo, el modelo explica únicamente 17% de la variabilidad de los datos. El trabajo destaca que la temperatura tiene un efecto débil y negativo sobre la tasa de crecimiento de casos COVID-19, pero al añadir el nivel de la radiación ultravioleta este efecto es positivo, es decir, a mayor temperatura mayor tasa de crecimiento. Este es un claro ejemplo de la dificultad de analizar apropiadamente el efecto de determinadas variables, sin un mayor conocimiento del comportamiento del virus. Finalmente, el estudio indica el alto efecto del movimiento de personas entre regiones, que parece ser más intenso que el propio efecto de las variables climáticas.

Por otra parte, observamos hechos o contraejemplos muy claros. Singapur es uno de los pocos países a la vez ricos y cálidos, y ha tenido un importante brote en abril. Mientras que los modelos que analizan la variabilidad entre países suelen concluir que, a mayor temperatura, menor difusión del virus, los modelos para zonas geográficas dentro de un país no siempre encuentran esas asociaciones. Es el caso de EEUU. Podría ser porque unos estados ricos (más interconectados, más expuestos al contagio) tienen clima frío (p. ej., Massachusetts) mientras que otros tienen clima templado o cálido (ejemplo, California). Y lo mismo ocurre con los estados de renta per cápita más baja. De ahí que, por ejemplo, [Caspi et al. \(2020\)](#)²¹ hayan encontrado asociación entre temperatura y difusión del virus, con la misma metodología, con datos de países, pero no con datos de los estados de EEUU.

Algunos de los estudios revisados encuentran una asociación opuesta (mayor temperatura, mayor contagiosidad) o no encuentran efecto. [Xie y Zhu \(2020\)](#)²⁸ con datos de 122 ciudades chinas, concluyen que la relación es positiva (a mayor temperatura media en las últimas dos semanas, mayor incidencia). Otra excepción es el estudio de [Baker et al \(2020\)](#),²⁹ publicado en Science, que concluyen que, en la fase pandémica de una infección emergente como esta, el clima tiene un papel limitado, si es que tiene alguno. A la misma conclusión llegan [Jüni et al \(2020\)](#)³⁰. Pero este estudio no analiza comportamiento estacional, sino que compara la velocidad de transmisión del virus durante una semana (de 21 de marzo) en 144 zonas con distinta temperatura. La temperatura media de la muestra es 12.8° C y el rango intercuartílico va de 7.3 a 21.2° C.

Para dilucidar completamente la estacionalidad del SARS-Cov-2 sería preferible medir los cambios de temperatura y humedad en un mismo territorio a lo largo del tiempo, y el comportamiento asociado del virus, antes que hacer comparaciones transversales. Es decir, realizar estudios a lo largo del tiempo, adecuadamente replicados en diferentes áreas.

Con todo lo expuesto anteriormente podríamos postular que el virus SARS-CoV-2V-2 se comportaría igual que el virus de la gripe, y que por tanto se transmitiría menos eficientemente en las estaciones más calurosas del año. De hecho, los datos de termo estabilidad del virus están en línea con los observados para el virus gripe con máxima estabilidad a 5° C, que va disminuyendo al aumentar la temperatura. No obstante, hay un variable inédita en el caso del SARS-CoV-2 frente a la situación de los virus de la gripe, y es que toda la población, excepto los pocos que han pasado la enfermedad COVID-19, son, en principio, susceptibles a ser infectados por el virus, y esto puede hacer que el virus compense la menor transmisibilidad en las estaciones más cálidas con el hecho de que cualquier persona sea susceptible de infectarse y por tanto, capaz a su vez de transmitir la enfermedad. En cierto sentido esto es lo que pasó en el 2009, cuando apareció el virus gripal H1N1 2009 para el cual había una menor inmunidad en la población. Este virus apareció en México y en Estados Unidos a finales de abril y se extendió en todo el hemisferio norte durante los meses de verano, y siguió incrementándose durante el mes de septiembre, con un máximo de casos alrededor de mediados de octubre. Esta situación contrasta con la que ocurre normalmente cuando los virus gripales que circulan no son antigénicamente tan diferentes de los del año anterior, ya que en estos casos no hay prácticamente transmisión en verano, y el pico ocurre en diciembre-febrero.

En resumen, la mayor parte de los estudios empíricos concluyen que el SARS-Cov-2 tendrá cierto comportamiento estacional. Sin embargo, hay que tener en cuenta una diferencia fundamental respecto a otros virus estacionales como la gripe: la infectividad del SARS-CoV-2 es mucho más alta. Aunque las altas temperaturas y los cambios de comportamiento bajen la infectividad, no está garantizado que la epidemia desaparezca en verano, siendo bastante probable que siga a un ritmo más moderado y que retome la actividad en otoño. Puesto que la hipótesis nula es no efecto (mientras no haya evidencia firme de un fenómeno), conviene mantener prudentemente que dicho fenómeno no existe o es débil. Por tanto, con todas estas incertidumbres **no se debería bajar la guardia en las estaciones cálidas ya que el virus SARS-CoV-2 puede seguir circulando de forma importante al haber muchas personas susceptibles y habrá que prepararse de manera especial para la temporada de otoño e invierno donde además se sumarán unas condiciones climáticas óptimas para la estabilidad y circulación del virus.**

Propuesta de un nuevo estudio empírico que incorpore métodos de estadística espacio-temporal

Es muy difícil extraer conclusiones sobre el impacto de la temperatura/estacionalidad de cualquier tipo en un periodo de tiempo relativamente corto. Este problema es esencial y de difícil solución por ahora. En los trabajos analizados y que incluyen dependencia espacial, no se puede garantizar que las conclusiones extraídas sean sólidas debido a la ausencia de un análisis exhaustivo acerca de la posible existencia de confusión entre el término espacial y los predictores considerados. En resumen, estamos ante un problema extraordinariamente complejo que debe ser abordado por un equipo multidisciplinar de especialistas de diversos campos (epidemiólogos, expertos en nutrición, virólogos, inmunólogos, matemáticos/estadísticos, clínicos, economistas, biólogos, sociólogos, etc.), y analizado con series de datos necesariamente más largas. Por último, y no menos importante, la metodología de análisis de los datos debería ser revisada con cautela puesto que la posible dependencia espacial y temporal de los datos provoca problemas de confusión con las variables predictoras

que pueden conducir a conclusiones erróneas. Los trabajos epidemiológicos consultados hasta ahora parecen ser ajenos a estos aspectos.

Por las razones anteriores, lo más prudente es continuar y profundizar en el estudio iniciado por el ISCIII y la AEMET en colaboración con el Grupo de Trabajo Multidisciplinar para la COVID-19, incluyendo a un equipo de especialistas en estadística espacio-temporal de forma que se trabaje en todos los aspectos de forma conjunta. La investigación conllevaría las siguientes fases:

- Discusión multidisciplinar del problema y establecimiento de hipótesis.
- Revisión de la literatura (sobre esta parte ya hay mucho trabajo avanzado).
- Selección de las variables ambientales, epidemiológicas, demográficas, socioeconómicas, etc. a utilizar, así como la rejilla espacial más adecuada.
- Puesta a disposición de los datos por parte del ISCIII, la AEMET, el INE, etc.
- Exploración de los datos y depuración de estos.
- Ajuste de modelos, discusión multidisciplinar de los resultados, selección de variables, replanteamiento de modelos, etc.
- Interpretación multidisciplinar de resultados y conclusiones.

Con una programación adecuada y contando con la experiencia del ISCIII y la AEMET este trabajo se podría desarrollar en cuestión de unas pocas semanas para comenzar a tener los primeros resultados, seguramente no lo suficientemente concluyentes, que se irían consolidando en las semanas siguientes, con series de datos cada vez más largas.

Metodología estadística. Entre los modelos a utilizar, se pueden anticipar los siguientes, sin perjuicio de que la propuesta se pueda enriquecer y completar sobre la marcha, en función de los resultados intermedios:

- Regresión de Poisson espacial y espacio-temporal con componente determinista (covariables), efectos aleatorios en espacio, en tiempo e interacción. La variable respuesta es conteo de casos, pero, por posible sobre-dispersión, podemos considerar Neg Binomial en lugar de Poisson. Modelos ZIP o Hurdle también podrían ser considerados.
- Regresión funcional, si consideramos datos completos de ciertas covariables. En este contexto podemos tener: (a) Regresión funcional con respuesta escalar, (b) Regresión funcional congruente con respuesta funcional, (c) regresión funcional con dependencias espaciales (*Functional Geostatistics*).
- Modelización de rebrotes y velocidad de crecimiento mediante procesos puntuales espacio-temporales. Por ejemplo, podemos modelar procesos de Hawkes adaptados a este contexto para modelar los picos.

Los datos necesarios y la estructura de celdas espaciales a utilizar se discutirían de manera multidisciplinar en el primer momento, valorando las disponibilidades existentes. Sobre los datos de AEMET, es importante que se faciliten muy desglosados para poder detectar cambios bruscos localizados.

Propuesta de experimentación

Hay varios modelos animales que se pueden infectar con el virus SARS-CoV-2. Entre ellos, recientemente se ha descrito un modelo basado en hámster sirio que reproduce muchas características de la enfermedad en humanos ^{1,2}. Un aspecto llamativo de este modelo es que se ha descrito la transmisión aérea del coronavirus de un animal infectado a otro no infectado cuando los animales se mantuvieron en jaulas separadas físicamente. Este modelo es similar al descrito para el virus de la gripe y ha permitido valorar los efectos que tienen la temperatura y

la humedad relativa en la transmisión del virus gripal. Se acaba de describir un modelo de ratón transgénico para el receptor ACE2 humano, para el estudio de la patogenicidad del SARS-CoV-2, aunque aún no se conoce en este modelo la transmisibilidad viral³¹. El GTM propone **poner a punto el modelo de laboratorio de hámster sirio para estudiar la transmisión del virus en diferentes condiciones ambientales** (temperatura y humedad) y avanzar en el conocimiento de la relación entre transmisibilidad y condiciones ambientales. Hay que indicar, no obstante, que una complejidad de este sistema experimental es que deberá llevarse a cabo en un laboratorio de seguridad biológica 3 (BSL-3)

2. ¿Cuál es el impacto de la COVID-19 sobre el clima y la calidad del aire?

Reducción de la contaminación atmosférica

La reducción de la contaminación atmosférica debido al descenso de los contaminantes más relacionados con las emisiones de los vehículos a motor y con la actividad industrial, como consecuencia de la reducción de la actividad socioeconómica, ha sido muy visible a corto plazo. Se observa una disminución para algunos de los contaminantes principales, especialmente el NO₂, relacionado directamente con la emisión de los vehículos a motor. El descenso también es notorio, pero no tan importante, para el caso de las partículas contaminantes. Esta situación se [monitoriza](#) de manera regular a escala global y de manera particular a escala urbana.

En términos generales se han llevado a cabo dos tipos de estudios sobre la relación entre la COVID-19 y la calidad del aire. Es importante tener en cuenta que muchos de ellos aún no han sido publicados en revistas (y por tanto no han pasado el proceso de revisión por pares) y que están de momento disponibles como *preprints* sin revisar.

Algunos estudios tratan sobre el posible impacto de la calidad del aire en la transmisión^{32 33}, la incidencia³⁴ y la letalidad^{35 36} de la COVID-19. La conclusión es que no hay una evidencia clara sobre la influencia de la contaminación en la transmisión de la COVID-19. Tanto la transmisión como la incidencia de la COVID-19 dependen en primera instancia de la densidad de población y típicamente una alta densidad de población está relacionada con una peor calidad del aire. Que haya correlaciones espaciales entre contaminación y transmisión e incidencia no implica causalidad. En su conjunto, estos estudios no han controlado muchos otros factores de potencial importancia. El estudio de Wu et al. (2020)³⁶ ha tenido bastante difusión en los medios de comunicación, pero también ha sido cuestionado. El estudio ha incorporado modificaciones después de las críticas recibidas, incluyendo más variables de control y datos más recientes. Las revisiones muestran que un incremento de 1 µg/m³ de PM2.5 está asociado con un incremento del 8% en la tasa de letalidad de la COVID-19 en EEUU (en comparación con el 15 % estimado inicialmente).

Otros estudios han estimado cómo la mejora de la calidad de aire durante el confinamiento puede tener beneficios asociados en cuanto a reducción de la mortalidad y morbilidad relacionada con ésta ^{3,4,37,38}. Estos estudios, en primer lugar, miden la concentración de contaminantes y estiman su posible reducción debida al confinamiento, así como la reducción en mortalidad y morbilidad con relaciones exposición-respuesta.

La ventaja del estudio de Venter et al. (2020)³⁷ es su naturaleza más global y que las reducciones de contaminantes se estiman basadas en técnicas de aprendizaje automático (*machine learning*), importante para estimar las reducciones reales, es decir, las reducciones respecto a los niveles de contaminantes que se hubiesen alcanzado en caso de que no hubiera habido

confinamiento. La debilidad del trabajo de Venter et al. (2020)³⁷ es que utiliza relaciones exposición-respuesta universales, lo cual es una aproximación simplista. Estiman que se evitaron, durante las dos primeras semanas del confinamiento, un total neto de 7400 (IC 95% 340 a 14600) muertes prematuras y 6600 (IC 95% 4900 a 7900) casos de asma pediátrica. Sólo en China e India, la mortalidad prematura evitada relacionada con PM2.5 fue de 1400 (IC 95% 1100 a 1700) y 5300 (IC 95% 1000 a 11700), respectivamente. Suponiendo que las desviaciones inducidas por el confinamiento en las concentraciones de contaminantes se mantuvieran durante 2020, estiman que podrían evitarse en todo el mundo 0,78 (IC 95% 0,09 a 1,5) millones de muertes prematuras y 1,6 (IC 95% 0,8 a 2) millones de casos de asma pediátrica.

Chen et al. (2020)³⁸ estima que la mejora de la calidad del aire en China debida al confinamiento trajo beneficios para la salud en muertes no relacionadas con COVID-19, lo que podría haber superado en número a las muertes confirmadas atribuibles a COVID-19 en China (4633 muertes hasta el 4 de mayo de 2020). Sin embargo, este cálculo no tiene en cuenta en el modelo el aumento de “víctimas colaterales” debido a COVID-19 en otras enfermedades crónicas por las limitaciones en obtener a tiempo un tratamiento médico, intervenciones quirúrgicas, etc. debido a la saturación sanitaria por el COVID y al miedo de los pacientes de acudir a los hospitales. Otra de las debilidades de este estudio es que no tiene en cuenta la variabilidad meteorológica al calcular las reducciones de la contaminación. La variabilidad meteorológica es un aspecto fundamental a tener en cuenta por razones obvias: con las mismas emisiones de, por ejemplo, partículas, no se observan las mismas concentraciones un día lluvioso y un día de tiempo estable y sin viento.

Achebak et al.^{3,4} han estudiado el impacto del confinamiento en la mortalidad y morbilidad cardiovascular en España. Estiman que entre el 15 de marzo y el 23 de abril se redujeron en 1,23 (95% CI: 1,17 to 1,29) las muertes por millón de habitantes y día de confinamiento, atribuibles a la bajada de NO₂, que corresponde a 2206 (IC 95%: 2096 a 2316) muertes en total. Asimismo, se estima que se redujeron los ingresos hospitalarios cardiovasculares en 0,97 (IC 95%: 0,92 a 1,02) casos por millón y día de confinamiento, lo que corresponde a un total de 1742 (1646-1837) hospitalizaciones durante el período de confinamiento analizado. El mismo problema mencionado anteriormente relacionado con la morbimortalidad colateral se encuentra en estos estudios. Las cardiopatías isquémicas representaron el 18% de la reducción total de ingresos hospitalarios cardiovasculares, trastornos de la conducción y arritmias (17%), insuficiencia cardíaca el 16%, enfermedades cerebrovasculares (12%), aterosclerosis (5%), cardiopatía hipertensiva (4%), enfermedades de circulación pulmonar (3%) y otras circulaciones (el 25% restante). Hay que tener cautela con la disminución de los ingresos hospitalarios. Otros estudios han demostrado lo mismo, pero unido a un aumento de la mortalidad. Hay que tener cautela también con el efecto de la temporalidad. Una disminución temporal (semanas) de la contaminación, posiblemente no tenga un impacto real sobre enfermedades crónicas que evolucionan en periodos temporales de años o décadas. Pero sí habría que considerar el descenso de asistencia de pacientes a consultas por miedo a un posible contagio. La fortaleza de este estudio radica en el hecho de que se ajustan las asociaciones de exposición-respuesta basadas en datos históricos reales por provincia española, y luego se usan esas relaciones para calcular las muertes atribuibles durante el período de confinamiento con el mismo tipo de datos y estaciones de medida. Asimismo, las reducciones de NO₂ se estiman basadas en técnicas de aprendizaje automático que tienen en cuenta la variabilidad meteorológica³⁹. La debilidad del estudio es que sólo utiliza NO₂ como *proxy* de contaminación.

Es importante tener en cuenta que la estimación de la reducción de muertes atribuibles por contaminación en estos estudios incluye muertes que podrían ocurrir de todos modos entre las personas más frágiles al cabo de unos pocos días, semanas o meses.

Esto nos lleva a una serie de recomendaciones en cuanto a los estudios a realizar para obtener información más fiable a escala nacional:

- Medir las reducciones reales de contaminantes en núcleos urbanos más densamente poblados, como la que se lleva a cabo para NO₂ con aprendizaje automático³⁹.
- Obtener estimaciones de la reducción de la mortalidad y morbilidad por provincia usando las medidas de reducción real de la contaminación^{3,4}.
- Calcular las reducciones de emisiones por sector para su uso en modelos de predicción de la calidad del aire de manera que las predicciones, usadas en las alertas por contaminación atmosférica, sean suficientemente fiables.
- Estudiar cómo la experiencia afectará a la gestión de la movilidad a corto plazo y sus posibles repercusiones en el nuevo urbanismo y el diseño de las ciudades del futuro y las actividades humanas en ellas.

Reducción en las emisiones de carbono e impacto sobre el clima

La disminución de la actividad socioeconómica se está traduciendo en una reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (CO₂, metano). Probablemente la reducción será [transitoria](#) ya que no existen grandes cambios estructurales que permitan reducir las emisiones sin afectar la actividad. Esto quiere decir que, de no haber cambios importantes a corto plazo, no mejorará la perspectiva respecto al cumplimiento del acuerdo de París de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero de origen antropogénico.

Actualmente, una de las estimaciones más robustas sobre el impacto que la pandemia tendrá en las emisiones de CO₂ a escala global para el año 2020, ha sido publicada por la [Agencia Internacional de la Energía](#) el 30 de Abril de 2020⁴⁰. Ésta apunta a un descenso del 8% (-2,6 GtCO₂/año) respecto al valor de 2019 hasta esa fecha. Estos valores coinciden en términos generales (salvando los periodos considerados) con estimaciones recientes como las de [Le Quéré et al. \(2020\)](#) y [Liu et al. \(2020\)](#)^{41 42}. Para poner esta cifra en el contexto de los acuerdos de París sobre el clima de 2015, se estima que el decrecimiento anual de emisiones globales de CO₂ debería ser del 7,6% durante esta década para cumplir con el objetivo de limitar el calentamiento global a 1.5° C por encima del promedio preindustrial ([UN Environment Programme, Emissions Gap Report 2019](#))⁴³. Es decir, el año 2020 se hallaría en ruta para cumplir con los objetivos de París, pero el mismo decrecimiento de emisiones se debería repetir cada año con respecto al año anterior hasta el año 2030 por lo menos. En resumen, para alcanzar un camino compatible con el objetivo de calentamiento global de 1.5° C con respecto al periodo pre-industrial, en 2030 las emisiones deberían ser un 55% inferiores a las registradas en 2019.

El grupo del *Global Carbon Project* ha publicado los primeros cálculos sobre la bajada de emisiones de CO₂ a nivel global durante el confinamiento⁴¹. Comparados con los niveles medios de 2019, a primeros de abril de 2020 se ha registrado una caída diaria del 17%, donde alrededor de la mitad es atribuible a los cambios en el transporte de superficie. En cuanto a las predicciones de la caída de emisiones para todo el año 2020, están entre el 4% si el confinamiento termina a mediados de junio y el 7% si solo algunas restricciones permanecen vigentes hasta final de año.

No existen efectos apreciables inmediatos de las reducciones de emisiones de CO₂ sobre la concentración de CO₂ atmosférico ni sobre el clima. Esto quiere decir que, a pesar de la marcada reducción de las emisiones, el CO₂ atmosférico seguirá creciendo este año. La concentración de CO₂ atmosférico sólo se estabilizará cuando se haya alcanzado el objetivo de emisiones netas cero, algo de lo que estamos aún muy lejos. Cabe destacar que de las emisiones totales de CO₂, en promedio sólo el 45% permanece en la atmósfera. El resto es absorbido en partes

aproximadamente iguales por el océano y la vegetación terrestre. Esto significa que de las 2,6 GtCO₂ de reducción estimada debido a la pandemia, solo 1,17 GtCO₂ se traducirá en una reducción en el [incremento anual de CO₂ atmosférico esperado](#). Tal reducción está por debajo de la variabilidad debida a variaciones naturales del clima y del ciclo global del carbono.

En la figura 2 (producida por R. Bernardello, BSC-CNS) se muestra el crecimiento anual medido de CO₂ atmosférico entre 1959 y 2019 usando [datos de NOAA](#)⁴⁴ con una transformación entre emisiones y concentraciones de 1 GtCO₂/año= 0,127 ppm CO₂/año). La línea roja continua indica el crecimiento esperado y las líneas rojas discontinuas delimitan la variabilidad esperada debida a procesos no directamente relacionados con las emisiones de origen antropogénico. Cualquier cambio en el crecimiento de CO₂ atmosférico tiene que salir de la ventana delimitada por las líneas rojas discontinuas para ser detectado como una variación debida a un esfuerzo de mitigación de las emisiones. La reducción de un 4 a 8% esperada para 2020 (dependiendo de la evolución del confinamiento) quedaría lejos de ser detectable. Una disminución similar realizada cada año con respecto al año anterior sería detectable sólo a partir del año 2023 en el caso del 8% (línea verde discontinua) mientras que habría que esperar hasta el año 2028 en el caso del 4% (línea azul discontinua). Es importante tener en cuenta que esta ilustración es una simplificación dado que los procesos implicados son no lineales.

Como se ha mencionado anteriormente, **no se espera una reducción apreciable en la concentración de CO₂ atmosférico a finales de 2020 debido a la pandemia** y, consecuentemente, tampoco habrá ningún efecto apreciable sobre el clima físico (temperatura y precipitación). Esto está en línea con las consideraciones de NOAA que se pueden consultar en este [blog](#)⁴⁵. El *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) ha iniciado un intercambio de ideas en la comunidad científica de modelización climática para realizar un experimento coordinado, en el que participará el BSC-CNS, que permita evaluar este aspecto.

El tiempo relativamente largo que se necesita para detectar el efecto de una reducción de las emisiones en el CO₂ atmosférico representa un desafío importante en la implementación de los acuerdos de París sobre el clima. Cada cinco años se realizará un inventario de los esfuerzos realizados y los resultados obtenidos (*global stocktake*). Considerando que el primero de estos inventarios se realizará en 2023, cualquier esfuerzo continuado de reducción en las emisiones de CO₂ inferior al 8% no será detectable para entonces y, por lo tanto, resultará imposible valorar en ese momento si los compromisos de los países participantes se han mantenido. Pero eso también implica que los esfuerzos deben comenzar cuanto antes y ser lo más ambiciosos posible, mucho más allá de lo que se ha experimentado durante el periodo de confinamiento, para poder gestionar las expectativas de la opinión pública.

Una posibilidad de reducir la incertidumbre en la detección de los esfuerzos de reducción de emisiones es la de poder predecir con unos años de antelación la variabilidad natural de la tasa de crecimiento del CO₂ atmosférico en función de las emisiones estimadas. Este tipo de información permitirá saber dónde se espera que dicha tasa de crecimiento caiga dentro de la ventana delimitada por las líneas rojas discontinuas en la figura 2. Este tipo de predicciones representan un campo nuevo en la investigación sobre el cambio climático. Hay un número creciente de estudios que muestran cómo el comportamiento del ciclo global del carbono se puede predecir con hasta dos años de antelación usando modelos climáticos globales con ciclo de carbono acoplado^{46 47 48}.

Reflexión sobre el impacto medioambiental

El cambio climático tiene un cierto paralelismo con las consecuencias de la pandemia. Salvando las distancias en la velocidad a la cual ambas crisis se manifiestan, la experiencia demuestra que si no se actúa con urgencia, los impactos se amplificarán de manera exponencial. Además,

ambas crisis comparten la globalidad del impacto, ya que nadie es inmune a priori. Aunque el impacto se perciba a escala local, el mecanismo funciona a escala global. Como en el caso del COVID-19, hay importantes lecciones que se pueden aprender sobre la forma colaborativa de abordar la crisis climática.

En todo caso, las reducciones de las emisiones, tanto en el ámbito urbano, como en el planetario, son temporales, y será muy relevante seguir la evolución a medida que la pandemia y la actividad socioeconómica van evolucionando. Por ello, puede ser muy oportuno incorporar la constatación de la mejora en los niveles de calidad del aire, a las lecciones aprendidas de esta crisis y enfocar la desescalada incorporando los aspectos beneficiosos para la salud y el medio ambiente.

Así, desde el inicio de la vuelta a la actividad laboral y la ampliación de las actividades permitidas y/o recomendadas se deberían considerar los medios de transporte que reduzcan el impacto medioambiental y favorezcan el fomento de la actividad física. La Autoridad Sanitaria debería revisar el mensaje en el que se fomenta el uso del vehículo privado como opción preferente para evitar el transporte público colectivo, así como considerar la recomendación de favorecer el teletrabajo.

Por último, la crisis actual también nos ha mostrado que la prevención es mejor (y menos costosa) que la gestión del riesgo. Es una lección que podría ser muy útil en el contexto de la mitigación y la adaptación al cambio climático.

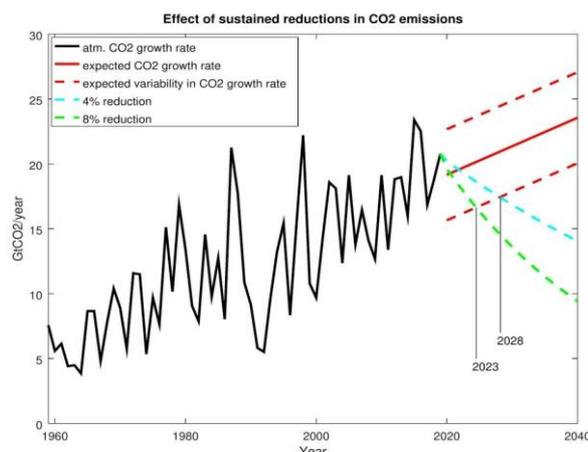


Figura 2. Crecimiento anual del contenido de CO₂ en la atmósfera. La línea negra continua representa los niveles medidos hasta 2019 (fuente de los datos: NOAA). Para facilitar la comparación con los datos sobre emisiones, la tasa de cambio anual en concentración de CO₂ (ppm/año) proporcionada por NOAA, aquí es convertida en tasa de cambio del contenido de CO₂ en la atmósfera (GtCO₂/año, eje vertical), aplicando el factor de conversión: 1 GtCO₂= 0,127 ppm CO₂. La línea roja continua representa el cambio esperado siguiendo la tendencia pasada (usando una regresión polinomial de primer grado), es decir, sin reducciones. Las líneas rojas discontinuas representan la amplitud de la variabilidad esperada basada en la variabilidad pasada (usando ± 1 desviación estándar de los valores observados menos la tendencia). La línea verde (azul) discontinua representa una hipotética trayectoria de decrecimiento continuado del 8% (4%) anual de las emisiones de CO₂. Para tener una posibilidad de detectar los efectos de las reducciones de emisiones en la atmósfera habría que esperar hasta 2028.

Referencias

¹Jasper Fuk-Woo Chan, Anna Jinxia Zhang, Shuofeng Yuan, Vincent Kwok-Man Poon, Chris Chung-Sing Chan, Andrew Chak-Yiu Lee, Wan-Mui Chan, Zhimeng Fan, Hoi-Wah Tsoi, Lei Wen, Ronghui Liang, Jianli Cao, Yanxia Chen, Kaiming Tang, Cuiting Luo, Jian-Piao Cai, Kin-Hang Kok, Hin Chu, Kwok-Hung

Chan, Siddharth Sridhar, Zhiwei Chen, Honglin Chen, Kelvin Kai-Wang To, Kwok-Yung Yuen. Simulation of the clinical and pathological manifestations of Coronavirus Disease 2019 (COVID-19) in golden Syrian hamster model: implications for disease pathogenesis and transmissibility. *Clinical Infectious Diseases*, ciaa325, <https://doi.org/10.1093/cid/ciaa325>

² Sia SF, Yan LM, Chin AWH, Fung K, Choy KT, Wong AYL, Kaewpreedee P, Perera RAPM, Poon LLM, Nicholls JM, Peiris M, Yen HL. Pathogenesis and transmission of SARS-CoV-2 in golden hamsters. *Nature*. 2020 May 14. doi: 10.1038/s41586-020-2342-5. Online ahead of print. PMID: 32408338

³ Achebak, H., Petetin, H., Quijal-Zamorano, M., Bowdalo, D., Pérez, García-Pando, C., Ballester, J. (2020). Quantification of the reduction in air pollution and attributable mortality due to the COVID-19 lockdown in Spain. *Environment International* (*under revision*)

⁴ Achebak, H., Petetin, H., Quijal-Zamorano, M., Bowdalo, D., Pérez, García-Pando, C., Ballester, J. (2020). Prevented Cardiovascular Admissions due to Air Pollution Drop during the COVID-19 Lockdown: A Nationwide Study in Spain (*In submission*)

⁵ <https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/faq.html>

⁶ KA Moore, A. Lipsittch, JM Barry, MT Osterholm. COVID-19: The CIDRAP viewpoint-working group. Part 1: the future of the COVID-19 pandemic: lessons learned from pandemic influenza. Center for Infectious Disease Research and Policy. University of Minnesota, April, 30th. https://www.cidrap.umn.edu/sites/default/files/public/downloads/cidrap-covid19-viewpoint-part1_0.pdf

⁷ AWH Chin, JT Chu, MRA Perera, KPY Hui, HL Yen, MCW Chan, M Peiris, LLM Poon. Stability of SARS-Cov-2 in different environmental conditions. *The Lancet*, 1, May 2020, e10 <https://www.thelancet.com/action/showPdf?pii=S2666-5247%2820%2930003-3>

⁸ Casanova JL, Su HC; COVID Human Genetic Effort. A global effort to define the human genetics of protective immunity to SARS-CoV-2 infection. *Cell*. 2020 May 13. doi: 10.1016/j.cell.2020.05.016. Online ahead of print. PMID: 32405102

⁹ Lowen AC, Steel J. Roles of humidity and temperature in shaping influenza seasonality. *J Virol*. 2014;88(14):7692-7695. doi:10.1128/JVI.03544-13

¹⁰ Lofgren E, Fefferman NH, Naumov YN, Gorski J, Naumova EN. Influenza seasonality: underlying causes and modeling theories. *J Virol*. 2007;81(11):5429-5436. doi:10.1128/JVI.01680-06

¹¹ Viboud C, Alonso WJ, Simonsen L. Influenza in tropical regions. *PLoS Med*. 2006;3(4):e89. doi:10.1371/journal.pmed.0030089

¹² Chowell G, Viboud C, Simonsen L, Miller M, Alonso WJ. The reproduction number of seasonal influenza epidemics in Brazil, 1996-2006. *Proc Biol Sci*. 2010;277(1689):1857-1866. doi:10.1098/rspb.2009.1897

¹³ Lowen AC, Mubareka S, Steel J, Palese P. Influenza virus transmission is dependent on relative humidity and temperature. *PLoS Pathog*. 2007;3(10):1470-1476. doi:10.1371/journal.ppat.0030151

¹⁴ Lowen AC, Mubareka S, Steel J, Palese P. Influenza virus transmission is dependent on relative humidity and temperature. *PLoS Pathog*. 2007;3(10):1470-1476. doi:10.1371/journal.ppat.0030151

¹⁵ Lowen AC, Steel J, Mubareka S, Palese P. High temperature (30 degrees C) blocks aerosol but not contact transmission of influenza virus. *J Virol*. 2008;82(11):5650-5652. doi:10.1128/JVI.00325-08

¹⁶ Wang, Jingyuan and Tang, Ke and Feng, Kai and Lin, Xin and Lv, Weifeng and Chen, Kun and Wang, Fei, High Temperature and High Humidity Reduce the Transmission of COVID-19 (March 9, 2020). Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=3551767> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3551767>

¹⁷ Sajadi, Mohammad M. and Habibzadeh, Parham and Vintzileos, Augustin and Shokouhi, Shervin and Miralles-Wilhelm, Fernando and Amoroso, Anthony, Temperature, Humidity and Latitude Analysis to Predict Potential Spread and Seasonality for COVID-19 (March 5, 2020). Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=3550308> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3550308>

¹⁸ Melanie Bannister-Tyrrell, Anne Meyer, Celine Faverjon, Angus Cameron Preliminary evidence that higher temperatures are associated with lower incidence of COVID-19, for cases reported globally up to 29th February 2020. doi: <https://doi.org/10.1101/2020.03.18.20036731>

¹⁹ Barbara Oliveiros, Liliana Caramelo, Nuno C Ferreira, Francisco Caramelo. Role of temperature and humidity in the modulation of the doubling time of COVID-19 cases doi: <https://doi.org/10.1101/2020.03.05.20031872>

²⁰ Tamma Carleton, View ORCID Profile Kyle C. Meng. Causal empirical estimates suggest COVID-19 transmission rates are highly seasonal doi: <https://doi.org/10.1101/2020.03.26.20044420>

²¹ Gil Caspi, Uri Shalit, Soren Lund Kristensen, Doron Aronson, Lilac Caspi, Oran Rossenberg, Avi Shina, Oren Caspi Climate effect on COVID-19 spread rate: an online surveillance tool

doi: <https://doi.org/10.1101/2020.03.26.20044727>

²² Nazrul Islam, Sharmin Shabnam, A Mesut Erzurumluoglu Temperature, humidity, and wind speed are associated with lower Covid-19 incidence. doi: <https://doi.org/10.1101/2020.03.27.20045658>

²³ shrikant pawar, Aditya Stanam, Mamata Chaudhari, Durga Rayudu. Effects of temperature on COVID-19 transmission. doi: <https://doi.org/10.1101/2020.03.29.20044461>

²⁴ Claudio S. Quilodran, Mathias Currat, Juan I. Montoya-Burgos Climatic factors influence COVID-19 outbreak as revealed by worldwide mortality doi: <https://doi.org/10.1101/2020.04.20.20072934>

²⁵ Alessio Notari. Temperature dependence of COVID-19 transmission
[arXiv:2003.12417](https://arxiv.org/abs/2003.12417)

²⁶ Ma Y, Zhao Y, Liu J, et al. Effects of temperature variation and humidity on the death of COVID-19 in Wuhan, China. *Sci Total Environ.* 2020;724:138226. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.138226

²⁷ Cory Merow, Mark C Urban. Seasonality and uncertainty in COVID-19 growth rates. doi: <https://doi.org/10.1101/2020.04.19.20071951>

²⁸ Xie J, Zhu Y. Association between ambient temperature and COVID-19 infection in 122 cities from China. *Sci Total Environ.* 2020;724:138201. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.138201

²⁹ Baker RE, Yang W, Vecchi GA, Metcalf CJE, Grenfell BT. Susceptible supply limits the role of climate in the early SARS-CoV-2 pandemic [published online ahead of print, 2020 May 18]. *Science.* 2020;eabc2535. doi:10.1126/science.abc2535

³⁰ Jüni P, Rothenbühler M, Bobos P, et al. Impact of climate and public health interventions on the COVID-19 pandemic: A prospective cohort study [published online ahead of print, 2020 May 8]. *CMAJ.* 2020;cmaj.200920. doi:10.1503/cmaj.200920

³¹ Bao L, Deng W, Huang B, et al. The pathogenicity of SARS-CoV-2 in hACE2 transgenic mice [published online ahead of print, 2020 May 7]. *Nature.* 2020;10.1038/s41586-020-2312-y. doi:10.1038/s41586-020-2312-y

³² Mario Coccia. Two mechanisms for accelerated diffusion of COVID-19 outbreaks in regions with high intensity of population and polluting industrialization: the air pollution-to-human and human-to-human transmission dynamics. doi: <https://doi.org/10.1101/2020.04.06.20055657>

³³ Leonardo Setti, Fabrizio Passarini, Gianluigi De Gennaro, Pierluigi Baribieri, Maria Grazia Perrone, Massimo Borelli, Jolanda Palmisani, Alessia Di Gilio, Valentina Torboli, Alberto Pallavicini, Maurizio Ruscio, PRISCO PISCITELLI, Alessandro Miani. SARS-Cov-2 RNA Found on Particulate Matter of Bergamo in Northern Italy: First Preliminary Evidence. doi: <https://doi.org/10.1101/2020.04.15.20065995>

³⁴ Bo Pieter Johannes Andree. Incidence of COVID-19 and Connections with Air Pollution Exposure: Evidence from the Netherlands. doi: <https://doi.org/10.1101/2020.04.27.20081562>

³⁵ Marco Travaglio, Yizhou Yu, Rebeka Popovic, Nuno Santos Leal, L. Miguel Martins. Links between air pollution and COVID-19 in England. doi: <https://doi.org/10.1101/2020.04.16.20067405>

³⁶ Xiao Wu, Rachel C. Nethery, Benjamin M. Sabath, Danielle Braun, Francesca Dominici. Exposure to air pollution and COVID-19 mortality in the United States: A nationwide cross-sectional study. doi: <https://doi.org/10.1101/2020.04.05.20054502>

³⁷ Zander S Venter, Kristin Aunan, Sourangsu Chowdhury, Jos Lelieveld. COVID-19 lockdowns cause global air pollution declines with implications for public health risk
doi: <https://doi.org/10.1101/2020.04.10.20060673>

³⁸ Chen K, Wang M, Huang C, Kinney PL, Anastas PT. Air pollution reduction and mortality benefit during the COVID-19 outbreak in China [published online ahead of print, 2020 May 13]. *Lancet Planet Health.* 2020;10.1016/S2542-5196(20)30107-8. doi:10.1016/S2542-5196(20)30107-8

³⁹ <https://www.bsc.es/es/noticias/noticias-del-bsc/¿cuál-es-el-impacto-real-del-confinamiento-sobre-la-contaminación-atmosférica-en-españa>

⁴⁰ <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2020>

⁴¹ Le Quéré, C., Jackson, R.B., Jones, M.W. et al. Temporary reduction in daily global CO₂ emissions during the COVID-19 forced confinement. *Nat. Clim. Chang.* (2020). <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0797-x>

⁴² Zhu Liu and Zhu Deng and Philippe Ciais and Ruixue Lei and Steven J. Davis and Sha Feng and Bo Zheng and Duo Cui and Xinyu Dou and Pan He and Biqing Zhu and Chenxi Lu and Piyu Ke and Taochun Sun and Yuan Wang and Xu Yue and Yilong Wang and Yadong Lei and Hao Zhou and Zhaonan Cai and Yuhui Wu and Runtao Guo and Tingxuan Han and Jinjun Xue and Olivier Boucher and Frederic Chevallier and Eulalie Boucher and Yimin Wei and Qiang Zhang and Dabo Guan and Peng Gong and Daniel M. Kammen and Kebin He and Hans Joachim Schellnhuber. COVID-19 causes record decline in global CO₂ emissions (2020) arXiv, 2004.13614

⁴³<https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/30797/EGR2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

⁴⁴ https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/gl_gr.html

⁴⁵ <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/covid2.html>

⁴⁶ Li H, Ilyina T, Müller WA, Landschützer P. Predicting the variable ocean carbon sink. *Sci Adv.* 2019;5(4):eaav6471. Published 2019 Apr 17. doi:10.1126/sciadv.aav6471

⁴⁷ Nicole S Lovenduski, Gordon B Bonan, Stephen G Yeager, Keith Lindsay and Danica L Lombardozi
High predictability of terrestrial carbon fluxes from an initialized decadal prediction system
Environmental Research Letters, Volume 14, Number 12. Published 18 December 2019

⁴⁸ Roland Séférian Sarah Berthet Matthieu Chevallier. Assessing the Decadal Predictability of Land and Ocean Carbon Uptake. *Geophysical Research Letters* First published: 28 February 2018
<https://doi.org/10.1002/2017GL076092>