

Mini-agujero de ozono sobre Río Gallegos en marzo de 2025: caracterización e impacto en la radiación UV

Cristian Laino-Baldini ^{*1,2}, Facundo Orte ^{1,3}, Facundo Carmona ^{1,2}, Eduardo Luccini ^{1,4}, Gerardo Carbajal-Benítez ⁵, Elian Wolfram ⁵

¹ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Godoy Cruz 2290 (C1425FQB), CABA, Argentina.

² Instituto de Hidrología de Llanuras Dr. Eduardo Jorge Usunoff (IHLLA), UNCPBA, Pinto 399 (B7000GHG), Tandil, Argentina.

³ Departamento de Investigación en Láseres y Aplicaciones (DEILAP), UNIDEF (CITEDEF-CONICET), Villa Martelli (B1603), Buenos Aires, Argentina.

⁴ Facultad de Química e Ingeniería del Rosario, Pontificia Universidad Católica, Av. Pellegrini 3314 (S2002QEO), Rosario, Argentina.

⁵ Servicio Meteorológico Nacional (SMN), Av. Dorrego 4019 (C1425GBE), CABA, Argentina.

Resultados destacados:

- Se identificó un episodio intenso de reducción de ozono en el sur de Patagonia durante el inicio del otoño austral de 2025.
- La consistencia entre observaciones satelitales y mediciones de superficie confirmó un descenso abrupto en la columna de ozono.
- El evento produjo un aumento de la radiación ultravioleta que fue parcialmente atenuado por la nubosidad presente durante esos días.
- Los mapas satelitales diarios permitieron describir la posición y evolución espacial del núcleo del evento sobre el sur de Sudamérica.
- La metodología integrada aplicada brinda una herramienta replicable para detectar episodios extremos de ozono en regiones con poca instrumentación.

Resumen: La reducción transitoria pero abrupta de la capa de ozono conocida como "mini-agujero de ozono", puede incrementar de forma puntual la radiación ultravioleta en superficie, con efectos potenciales sobre la salud y los ecosistemas. En Sudamérica estos fenómenos han sido escasamente documentados, lo que resalta la necesidad de estudios detallados. En este trabajo se presenta la primera caracterización de un mini-agujero detectado en marzo de 2025 sobre el Observatorio Atmosférico de la Patagonia Austral (OAPA), Río Gallegos, Argentina (51,55° S, 69,23° O) y se evalúa su impacto radiativo en superficie. Se utilizaron observaciones satelitales del Tropospheric Monitoring Instrument (TROPOMI/Sentinel-5 Precursor) y Ozone Monitoring Instrument (OMI/NASA EOS-Aura), mediciones de superficie del espectrofotómetro Système d'Analyse par Observation Zénithale (SAOZ) y del radiómetro UVB-1 YES, y el producto de reanálisis Multi Sensor Reanalysis versión 2 (MSR-2). Se calcularon climatologías de largo plazo en el área de estudio con el fin de identificar eventos anómalos de la columna total de ozono (CTO) y cuantificar la respuesta del índice UV (IUV) y de la dosis eritémica diaria. La detección del evento se basó en un umbral climatológico ($\mu - 2\sigma$) y se complementó con simulaciones radiativas del IUV modeladas con un

To cite this article: Laino-Baldini, C., Orte, F., Carmona, F., Luccini, E., Carbajal-Benítez, G., & Wolfram, E. 2026. Mini-ozone hole over Río Gallegos in March 2025: characterization and impact on UV radiation. *Revista de Teledetección*, 67, e24758. <https://doi.org/10.4995/raet.2026.24758>

* Corresponding author: cristian.laino@ihlla.org.ar

Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

modelo paramétrico. Los resultados muestran una disminución simultánea de la CTO registrada por SAOZ (-16%) y TROPOMI (-19%) respecto del valor climatológico del día 24 de marzo 2025, alcanzando percentiles <1%. Esta reducción se tradujo en un incremento teórico de la dosis eritémica de +30% bajo condiciones despejadas respecto a la climatología para ese día, mientras que las observaciones reales indicaron un aumento más moderado (+9%), atribuible a la atenuación por nubosidad, dado que la tropósfera sobre el sitio tiene típicamente muy escaso contenido de aerosoles. Los mapas satelitales confirmaron la presencia y evolución espacial del mini-agujero sobre el sur de Sudamérica. Este estudio evidencia la utilidad del monitoreo integrado satélite-superficie para la detección de eventos extremos de ozono en latitudes subpolares. La metodología propuesta es transferible a otras regiones y contribuye al entendimiento de los riesgos asociados a episodios agudos de exposición a radiación UV.

Palabras clave: TROPOMI, SAOZ, MSR-2, Índice UV, Dosis eritémica.

Mini-ozone hole over Río Gallegos in March 2025: characterization and impact on UV radiation

Abstract: The transient yet abrupt reduction of the ozone layer known as a “mini-ozone hole” can locally increase surface ultraviolet (UV) radiation, with potential implications for human health and ecosystems. In South America these phenomena have been sparsely documented, underscoring the need for detailed studies. Here we present the first characterization of a mini-ozone hole detected in March 2025 at the Observatorio Atmosférico de la Patagonia Austral (OAPA), Río Gallegos, Argentina (51.55° S, 69.23° W) and assess its surface radiative impact. We employed satellite observations Tropospheric Monitoring Instrument (TROPOMI/Sentinel-5 Precursor) and Ozone Monitoring Instrument (OMI/NASA EOS-Aura), ground-based measurements Système d'Analyse par Observation Zénithale spectrophotometer (SAOZ) and YES UVB-1 solar radiometer and a reanalysis product from Multi Sensor Reanalysis version 2 (MSR-2). Long-term climatologies for the study area were computed to identify anomalous total ozone column (TOC) events and to quantify the response of the UV index (UVI) and the daily erythral dose. Event detection used a climatological threshold ($\mu-2\sigma$) and was complemented by UVI radiative simulations generated with a parametric model. Results show a simultaneous decrease in TOC recorded by SAOZ (-16%) and TROPOMI (-19%) relative to the climatological value on 24 March 2025, reaching percentiles below 1%. This reduction corresponded to a theoretical increase in the erythral dose of +30% under clear-sky conditions compared with the climatology for that day; observed values showed a more moderate rise (+9%), attributable to attenuation by clouds, given that the troposphere above the site has a very low aerosol content. Satellite maps confirmed the presence and spatial evolution of the mini-ozone hole over southern South America. This study demonstrates the value of integrated satellite-ground monitoring for detecting extreme ozone events at subpolar latitudes. The proposed methodology is transferable to other regions and contributes to improved understanding of the risks associated with acute UV exposure episodes.

Keywords: TROPOMI, SAOZ, MSR-2, UV Index, Erithermal dose.

1. Introducción

Desde el descubrimiento de las pérdidas estacionales de ozono estratosférico en la Antártida por Farman et al. (1985) se reconocen los complejos procesos dinámico-químico-radiativos que causan ese deterioro localizado, signado por la liberación en la troposfera de compuestos de origen antrópico que, llegados por progresivo ascenso a la estratosfera, liberan allí elementos como el Cl y el Br que rápidamente destruyen ozono neto en reacciones catalíticas. Este deterioro se acelera durante la primavera antártica por activación catalítica de ClOx y NOx en nubes estratosféricas polares tipo I y II (PSCs) durante

la primavera austral (septiembre-diciembre). Bajo temperaturas extremadamente bajas ($<-78^{\circ}\text{C}$) y la estabilidad del vórtice polar, estos óxidos de cloro y nitrógeno convierten el ozono inerte en oxígeno diatómico mediante ciclos catalíticos, lo que da lugar a la aparición anual del agujero de ozono antártico (AOA) (Solomon, 1999). Aunque el Protocolo de Montreal (1987) ha logrado una disminución significativa de las sustancias agotadoras de ozono (SAO), la recuperación completa de la capa de ozono antártica sigue siendo heterogénea, sujeta a variaciones en la dinámica estratosférica y en las temperaturas polares (Newman et al., 2009; OMM, 2002b). Más allá de los procesos fotoquímicos descritos, la dinámica del vórtice y

el transporte estratosférico controlan la ocurrencia y la distribución espacial de estas reducciones de ozono.

Desde el punto de vista dinámico, la intensidad y la geometría del vórtice polar antártico caracterizan no sólo la severidad del AOA, sino también la formación de filamentos y masas de aire pobres en ozono hacia latitudes medias (Waugh, 1993). Estas intrusiones (asociadas a elongaciones, desplazamientos y rupturas parciales del vórtice) inducen descensos sinópticos y regionales de la columna total de ozono (CTO) que se traducen en aumentos anómalos de la radiación ultravioleta en superficie. Observaciones tempranas documentaron transporte de aire pobre en ozono en el sur de Brasil (Kirchhoff et al., 1996) y, desde entonces, trabajos regionales han diagnosticado episodios de influencia del agujero antártico sobre el sur de Brasil (Pinheiro et al., 2011; Bittencourt et al., 2019; Peres et al., 2016, 2017). Asimismo, estudios basados en instrumentación de superficie en Río Gallegos han descrito variaciones subpolares de corto plazo vinculadas al paso del borde del vórtice (Wolfram et al., 2012; Orte et al., 2019, 2020).

No obstante, reducciones abruptas y transitorias de la columna total de ozono ocurren en las latitudes medias de ambos hemisferios (James, 1998a,b). Newman et al. (1988) acuñaron el término “*ozone mini-holes*” para describir descensos abruptos (1 – 5 días) y sinópticos de la CTO, de escala horizontal menor (1000 – 3000 km) que el agujero antártico, y sin génesis preferencial, aunque intensificados sobre la península Antártica y la capa de hielo de la Antártida Oriental. Estos eventos resultan fundamentalmente de ascenso dinámico de aire pobre en ozono y advección horizontal (Reed, 1950; Salby y Callaghan, 1993; Teitelbaum et al., 2001).

Estudios revelan que tales eventos no solo surgen de dinámicas atmosféricas, sino que también activan reacciones heterogéneas que amplifican localmente la pérdida de ozono (Grew y Dameris, 1997; Stenke y Grewe, 2003). Aunque poco documentados en épocas distintas que la primavera austral, los mini-agujeros en verano y otoño austral pueden generar picos inusuales de radiación UV con implicaciones en salud humana y ecosistemas (Millán y Manney, 2017).

Partiendo de las consideraciones dinámicas anteriores, el presente estudio analiza la disminución de la CTO sobre Río Gallegos, asociada al paso de un mini-agujero de ozono detectado en marzo de 2025 y el consecuente incremento de la radiación solar UV en superficie, proporcionando información empírica esencial para comprender la variabilidad regional del ozono y sus implicaciones sobre la exposición a la radiación solar UV en superficie.

2. Materiales y Metodología

Las mediciones localizadas para el estudio se realizaron en el Observatorio Atmosférico de la Patagonia Austral (OAPA), Río Gallegos, Argentina (51,55° S, 69,23° O), gestionado por el Departamento de Investigación en Láseres y sus Aplicaciones (DEILAP (Instituto de Investigaciones Científicas y Técnicas para la Defensa (CITEDEF)). La estación se ubica en latitudes subpolares, fuertemente influenciadas por la dinámica del vórtice polar antártico.

Para caracterizar la CTO se utilizaron observaciones de superficie y datos satelitales. Del satélite *Sentinel-5 Precursor* (S5P) se emplearon las mediciones del *Tropospheric Monitoring Instrument* (TROPOMI), producto TROPOMI_OFFL_L2_TOCL (GDP v4.1 / GODFIT v1.3) que proporciona columnas totales de ozono con resolución nadir mejorada ($\approx 5,5 \times 3,5$ km desde agosto de 2019) y tiempo de paso cercano a las 13:30 hora solar local (LST) (Veefkind et al., 2012; Levelt et al., 2006). Complementariamente se utilizaron mediciones cenitales del espectrofotómetro de la red *Système d'Analyse par Observation Zénithale* (SAOZ) (número de serie: 26), instalado en el OAPA el 11 de marzo de 2008. Este instrumento pertenece al *Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales/ Centre National de la Recherche Scientifique* (LATMOS/CNRS) y determina la CTO mediante la técnica de Espectroscopía de Absorción Óptica Diferencial (DOAS) en la banda de Chappuis (450–550 nm) al amanecer y al atardecer. Como referencia a largo plazo para el cálculo de la climatología se emplearon datos del *Multi Sensor Reanalysis v2* (TM3DAM v4.4 Overpass, periodo 1960–2024), y para completar la serie hasta la fecha de análisis, se incorporaron también datos

del producto OMDOAO3 L2OVP de OMI/Aura (enero–marzo 2025) (Veefkind *et al.*, 2006).

Para el estudio de la radiación UV en superficie se empleó el producto OMUVB L2 de OMI/Aura; el parámetro utilizado es el CSUVindex (por sus siglas en inglés: *Clear Sky Ultraviolet index*), que estima el índice UV (IUV) a mediodía solar bajo condiciones de cielo despejado. La validación in situ del IUV se realizó con un radiómetro de banda ancha YES UVB-1 (*Yankee Environmental Systems*) instalado en el OAPA, que mide irradiancia en 280–400 nm con frecuencia adquisición de un minuto.

Adicionalmente, se aplicó el modelo paramétrico de Madronich (2007) para estimar el IUV teórico bajo condiciones de cielo despejado y libre de aerosoles. Este modelo fue ajustado localmente mediante regresión no lineal a partir de mediciones calibradas de IUV en el OAPA. A partir de ambas fuentes (modelo y observaciones del radiómetro) se obtuvieron las dosis eritémicas diarias, que representan respectivamente los escenarios teóricos y observados de respuesta radiativa.

Para asegurar la consistencia entre las mediciones satelitales y terrestres de CTO, se realizó un análisis de intercomparación entre los datos de TROPOMI y del SAOZ (amanecer, atardecer y media diaria) entre octubre 2017 y marzo 2025. La correspondencia entre las observaciones satelitales y terrestres se evaluó mediante un análisis de regresión lineal, el coeficiente de determinación (R^2), el error cuadrático medio absoluto (RMSE, del inglés *Root Mean Square Error*) y relativo (rRMSE%, del inglés *relative Root Mean Square Error*), el error absoluto medio (MAE, del inglés *Mean Absolute Error*) y el error del sesgo medio (MBE, del inglés *Mean Bias Error*).

$$\text{RMSE (UD)} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\text{CTO}_{\text{tropomi},i} - \text{CTO}_{\text{saoz},i})^2} \quad (1)$$

$$\text{rRMSE (\%)} = \frac{\text{RMSE}}{\text{CTO}_{\text{saoz}}} \times 100 \quad (2)$$

$$\text{MAE (UD)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\text{CTO}_{\text{tropomi},i} - \text{CTO}_{\text{saoz},i}| \quad (3)$$

$$\text{MBE (UD)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\text{CTO}_{\text{tropomi},i} - \text{CTO}_{\text{saoz},i}) \quad (4)$$

Se construyeron climatologías diarias para CTO y para CSUVindex. Para CTO se utilizó MSR-2 (1960–2024) y OMDOAO3 (enero–marzo 2025) y, para CSUVindex, la serie OMUVB (2004–2025). MSR-2 integra la CTO de las mediciones de los instrumentos de 15 satélites distintos: BUV-Nimbus4, TOMS-Nimbus7, TOMS-EP, SBUV-7, -9, -11, -14, -16, -17, -18, -19, GOME, SCIAMACHY, OMI y GOME-2, y observaciones de superficie de los instrumentos Brewer y Dobson (Van Der A *et al.*, 2015). Las series de CTO y de CSUVindex fueron normalizadas y se trabajó con un año climatológico de 365 días. Para cada día del año se calculó la media μ y la desviación estándar σ ; para suavizar la variabilidad de corto plazo en la climatología se aplicó una media móvil de 15 días. Se definió como un caso de mini-agujero de ozono cuando la CTO diaria observada por ambos instrumentos (TROPOMI y SAOZ) está por debajo del umbral $\mu - 2\sigma$, permitiendo distinguir casos estadísticamente significativos fuera de un rango del 95% de probabilidad de la variabilidad intrínseca. Este criterio es consistente con la definición de evento extremo establecida por el IPCC (2021), que considera extremos aquellos valores que exceden los percentiles $\leq 5\%$ (para mínimos) o $\geq 95\%$ (para máximos) (Seneviratne *et al.*, 2021).

El episodio estudiado corresponde al periodo enero–marzo de 2025. Para cada sensor se determinó el día de CTO mínimo y para los parámetros analizados, CTO y CSUVindex, se calculó el descenso relativo respecto de μ y $\mu - 2\sigma$ y su percentil empírico en una ventana circular de 15 días. La irradiancia eritémica instantánea $E_{\text{er}}(t)$ expresada en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ se obtiene desde la ecuación del IUV (OMS, 2002a):

$$\text{IUV} = 40 \int_{250}^{400} E_{\lambda} \cdot S_{\text{er}}(\lambda) d\lambda \quad (5)$$

donde E_{λ} es la irradiancia solar en superficie y $S_{\text{er}}(\lambda)$ es el espectro de acción eritémico de referencia de la Comisión Internacional de Iluminación (ISO 17166:1999/CIE S 007/E-1998) y la irradiancia eritémica E_{er} se define como:

$$E_{\text{er}} = \int_{250}^{400} E_{\lambda} \cdot S_{\text{er}}(\lambda) d\lambda = \frac{\text{IUV}}{40} \quad (6)$$

Finalmente, la dosis eritémica diaria se calculó integrando $E_{\text{er}}(t)$ en el tiempo. Para el día de CTO

mínimo se generaron curvas de IUV bajo tres escenarios: (i) climatológico despejado, (ii) evento observado en condición despejada, y (iii) condiciones reales observadas; las integrales resultantes se compararon para estimar incrementos en la dosis eritémica asociados al mini-agujero.

La caracterización espacial de la CTO durante el evento de mini-agujero se apoyó en mapas diarios del producto TROPOMI_OFFL_L3_O3 (COPERNICUS/S5P/OFFL/L3_O3) de *Google Earth Engine* para los días 22–25 de marzo de 2025. Para cada día se calculó la media diaria de la banda O3_column_number_density. Dado que la variable original está en mol·m⁻², fue convertida a unidades Dobson (UD).

3. Resultados

3.1. Comparación CTO: TROPOMI - SAOZ

Se contaron 2163 pares de observaciones coincidentes entre SAOZ (amanecer, atardecer y promedio diario) y el producto OFFL_L2_TOCL de TROPOMI (Figura 1).

El análisis estadístico (Tabla 1) muestra el valor de R² en las series comparadas indicando una relación bastante fuerte entre las mediciones de SAOZ y TROPOMI, con valores que varían entre 0,77 y 0,90. En particular, la serie de media diaria muestra el mejor ajuste (R²=0,90), lo que sugiere que la medición promedio diario minimiza la variabilidad inherente de los datos y proporciona la correlación más robusta entre ambas fuentes.

El RMSE y el rRMSE indican que las discrepancias entre SAOZ y TROPOMI son pequeñas en comparación con la magnitud típica de las mediciones. Para el promedio diario, el RMSE de 11,2 DU y el rRMSE de 3,7% se sitúan dentro del rango aceptable en estudios de validación de ozono (Bian et al., 2012; Vaz Peres et al., 2017; Orte et al., 2020). El MAE también muestra que las discrepancias son pequeñas, con un valor mínimo de 8,6 UD para la serie media diaria. No obstante, los MBE positivos en todas las series indican una ligera sobreestimación de SAOZ respecto a TROPOMI; el MBE de la serie diaria es +2,1 UD, una diferencia pequeña pero sistemática.

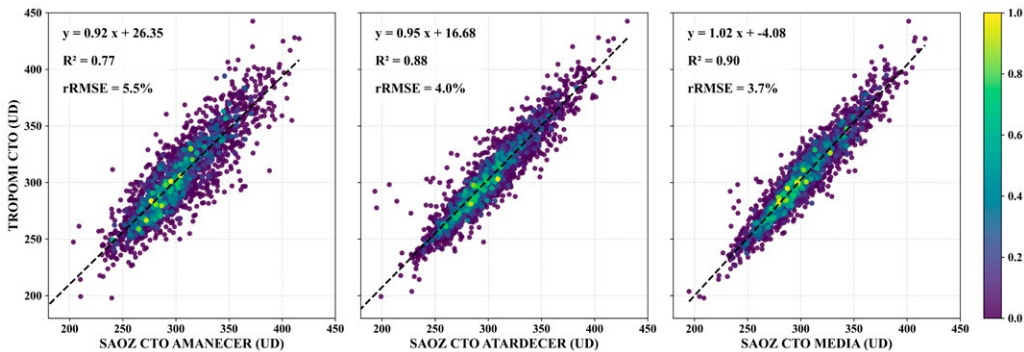


Figura 1. Comparación de la CTO medida por TROPOMI y SAOZ en el OAPA, expresada en UD. Se presentan tres paneles según las medidas de SAOZ: (a) amanecer, (b) atardecer y (c) media diaria. En cada panel los puntos representan pares de observaciones coincidentes; la barra de color indica la densidad de puntos normalizada (escala 0–1).

Tabla 1. Resumen estadístico comparación de la CTO entre TROPOMI y medidas de amanecer, atardecer y media diaria de SAOZ (UD). Se incluye: coeficiente de determinación (R²), error cuadrático medio (RMSE) y relativo (rRMSE %), error absoluto medio (MAE) y sesgo (MBE). Las métricas se calcularon sobre datos filtrados por coincidencia temporal diaria.

	R ²	RMSE (UD)	rRMSE (%)	MAE (UD)	MBE (UD)
Amanecer	0,77	16,8	5,5	13,0	1,6
Atardecer	0,88	12,3	4,0	9,0	2,7
Media	0,90	11,2	3,7	8,6	2,1

En conjunto, la comparación TROPOMI–SAOZ muestra una alta coincidencia en las mediciones de CTO, con el promedio diario ofreciendo el mejor ajuste; estos resultados respaldan la utilidad de TROPOMI para el monitoreo regional/global del ozono, siempre que se consideren los sesgos sistemáticos observados.

3.2. Análisis del caso de estudio

La Figura 2 presenta la evolución temporal de la CTO (panel superior) y del CSUVindex (panel inferior) en el OAPA durante enero–marzo de 2025. La CTO exhibe la típica variabilidad estacional veraniega, con valores medios cercanos a 280–300 UD a comienzos de año y un descenso gradual hacia finales de marzo asociado a la transición estacional. El CSUVindex muestra una tendencia decreciente en el mismo periodo ($\approx 9\text{--}10$ IUUV en enero y $3\text{--}4$ IUUV en marzo), coherente con la reducción de la irradiación solar a medida que avanza el otoño austral.

A partir del 23 de marzo se registra un descenso más pronunciado de la CTO alcanzando su mínimo el 24 de marzo de 2025 (marcado en la figura con

borde negro) tanto en TROPOMI (puntos azules) como en SAOZ (cuadrados naranja); este descenso también se ve reflejado en un incremento de los valores del CSUVindex para ambos días, que se sitúan por encima de su banda climatológica. Este evento de mini-agujero de ozono se mantuvo durante 2–3 días, intervalo en el que la CTO presentó valores consistentemente por debajo de su banda climatológica. Por esta razón fue seleccionado como caso de estudio principal y como referencia para el análisis detallado presentado en las secciones siguientes.

El análisis numérico de las observaciones durante el evento confirma una disminución marcada de la CTO sobre OAPA (Tabla 2). El 24 de marzo de 2025 se registró el mínimo simultáneo en ambos instrumentos: SAOZ reportó una diferencia de $-16,0\%$ y TROPOMI de $-19,4\%$ respecto de la media climatológica diaria. Al contrastar con la banda inferior ($\mu-2\sigma$), las diferencias relativas fueron de $-0,1\%$ y $-4,1\%$, respectivamente. El percentil empírico, calculado sobre los datos históricos alrededor de la fecha en una ventana móvil de 15 días, ubica a la observación de cada instrumento en torno al $0,5\%$, lo que indica que

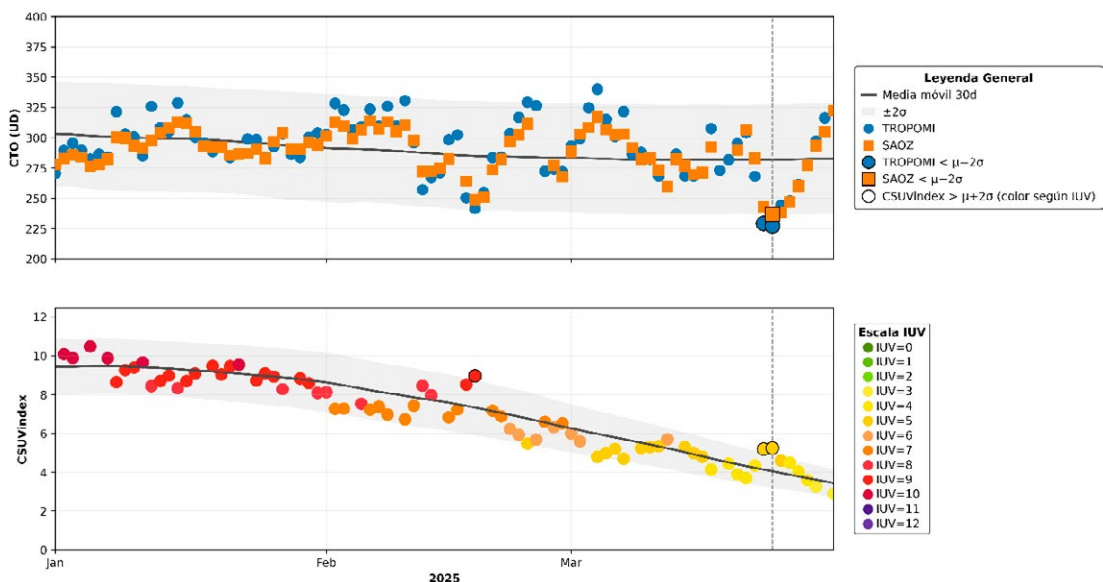


Figura 2. Serie diaria de CTO y CSUVindex en OAPA. Panel superior: CTO diario medido por TROPOMI (puntos azules) y por SAOZ (cuadrados naranjas). Panel inferior: CSUVindex (IUUV para cielo despejado al mediodía) derivado de OMI, coloreado según semáforo UV. Para ambos paneles se muestra la climatología diaria (línea continua negra) y su banda $\pm 2\sigma$ (banda gris). Las observaciones con borde negro de CTO indica valores menores a $\mu-2\sigma$ y para CSUVindex valores mayores a $\mu+2\sigma$. La línea vertical punteada marca el episodio del 24 de marzo de 2025 durante el cual se detectó la disminución anómala de CTO medida por ambos instrumentos que se relaciona con el incremento puntual del CSUVindex.

Tabla 2. CTO — 24 de marzo de 2025. Valores observados por TROPOMI y SAOZ y climatológicos calculados (μ , $\mu+2\sigma$), y sus estadísticos, diferencias porcentuales y percentil empírico.

Fecha	Instrumento	Observación (UD)	M (UD)	$\mu-2\sigma$ (UD)	μ (%)	$\mu-2\sigma$ (%)	Percentil emp. (%)
2025-03-24	SAOZ	236,9	282,0	237,0	-16,0	-0,1	0,6
2025-03-24	TROPOMI	227,3	282,0	237,0	-19,4	-4,1	0,5

el evento se enmarca en un contexto cercano al mínimo histórico registrado para esa ventana.

En términos de radiación, el CSUVindex presentó incrementos porcentuales consistentes con la reducción de ozono (Tabla 3). El valor máximo se observó el 24 de marzo, con un aumento relativo de +29,4% respecto de la climatología, mientras que la comparación con la banda superior ($\mu+2\sigma$) arrojó +7,7%. El percentil empírico alcanzó 88,9%, lo que indica que, si bien el incremento fue notable, no superó el umbral del 95% definido para eventos extremos.

En consecuencia, el episodio puede considerarse extremo en términos de agotamiento de la CTO, pero no en su respuesta radiativa, la cual estuvo modulada por la variabilidad estacional (Figura 2, panel inferior). Estas variaciones reflejan la combinación de la señal asociada al forzante dinámico (descenso de la CTO) con la variabilidad radiativa local.

Estas cifras demuestran que la disminución relativa de CTO (~15–20%) registrada durante el evento se tradujo en incrementos significativos del IUV en condiciones de cielo despejado al mediodía solar local, alcanzando hasta un 30% por encima de los valores climatológicos esperados.

Para cuantificar la respuesta radiativa asociada al evento se compararon tres escenarios de IUV y dosis eritémica diaria:

(i) escenario de referencia, calculado mediante la parametrización de Madronich para una CTO climatológica de 282,0 UD;

(ii) escenario de mini-agujero, obtenido con la misma parametrización, pero fijando CTO = 227,0 UD; y

(iii) observaciones de campo, correspondientes a la serie minutal de irradiancia UV-B medida por el radiómetro YES.

Los escenarios (i) y (ii) representan estimaciones teóricas bajo condiciones de cielo despejado y con los parámetros SZA descritos en la sección 2 (Materiales y Metodología), mientras que el escenario (iii) refleja la respuesta observada en condiciones atmosféricas reales, incluyendo los efectos meteorológicos locales y la incertidumbre instrumental del radiómetro.

La Figura 3 muestra los tres escenarios. Las curvas azul y naranja corresponden a los valores teóricos de Madronich de los escenarios (i) y (ii), respectivamente, mientras que los puntos verdes indican las mediciones del escenario (iii) y la línea roja su suavizado temporal. El cálculo analítico realizado con la parametrización de Madronich arrojó dosis eritémica diarias de 1,7 kJ·m⁻² para el escenario (i) y 2,2 kJ·m⁻² para el escenario (ii), con una diferencia de 0,5 kJ·m⁻² (+30,7%), atribuible exclusivamente a la reducción de ozono. Por otro lado, el escenario (iii) registró 1,8 kJ·m⁻², equivalentes a +0,2 kJ·m⁻² (+8,8%) respecto al valor climatológico y -0,4 kJ·m⁻² (-16,8%) en relación con el escenario teórico de mini-agujero.

Estos resultados evidencian un incremento de la dosis eritémica respecto a la climatología debido a la disminución de la CTO como consecuencia de la formación del mini-agujero de ozono, aunque la nubosidad atenuó parcialmente la irradiación,

Tabla 3. CSUVindex — 24 de marzo de 2025. Valores observados por el OMI y climatológicos calculados (μ , $\mu+2\sigma$), y sus estadísticos, diferencias porcentuales y percentil empírico.

Fecha	Instrumento	Observación	μ	$\mu+2\sigma$	μ (%)	$\mu+2\sigma$ (%)	Percentil emp. (%)
2025-03-24	OMI	5,2	4,1	4,9	+29,4	+7,7	88,9

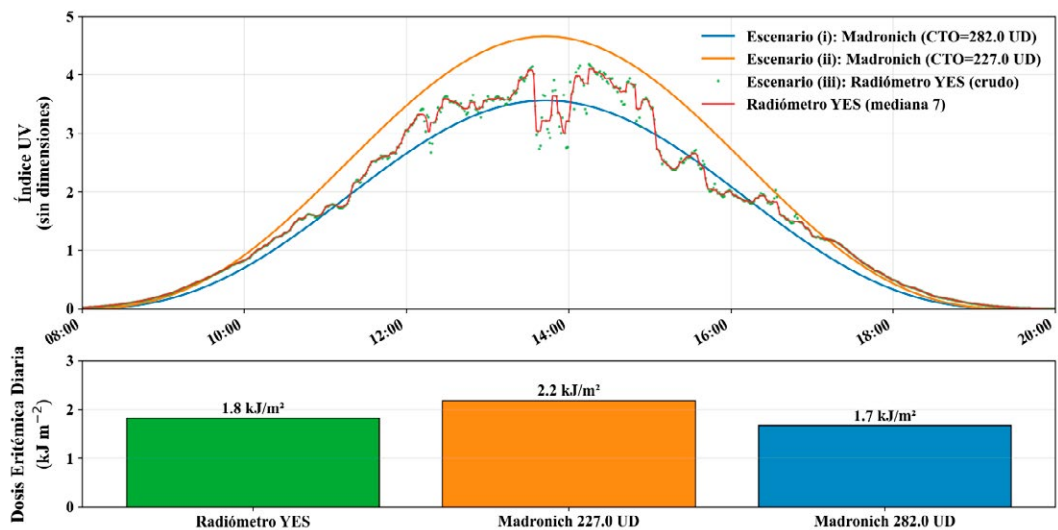


Figura 3. Respuesta radiativa al mini-agujero observado el 24 de marzo de 2025 en OAPA. Panel superior: serie horaria del IUUV calculada con la parametrización de Madronich para dos escenarios de columna total de ozono (climatológica: CTO=282,0 DU, curva azul; mini-agujero: CTO=227,0 DU, curva naranja), puntos verdes: mediciones del radiómetro UVB-1 YES; línea roja: señal del radiómetro suavizada (mediana móvil 7 muestras). Panel inferior: dosis eritémica acumulada durante el día (kJ m^{-2}) para Radiómetro YES, Madronich con CTO = 227,0 DU y Madronich con CTO = 282,0 DU.

limitando el aumento que hubiera ocurrido bajo condiciones de cielo despejado.

Las composiciones espaciales diarias de CTO derivadas de TROPOMI entre el 22 y 25 de marzo de 2025 (Figura 4) muestran con nitidez el desplazamiento, evolución y posterior disipación de una depresión localizada al sur de Argentina, cuyo núcleo se observa bien definido el 23 y 24 de marzo. En los mapas, el área afectada presenta valores de CTO sensiblemente inferiores al entorno (tonalidades azules frente a tonos verdosos/amarillos/rojizos típicos del verano); el punto que marca la estación OAPA (resaltado en rojo) se sitúa muy próximo al núcleo del mini-agujero durante el 23–24 de marzo, lo que corrobora la coincidencia espacial entre la anomalía satelital y las observaciones de superficie.

4. Discusión

Los resultados presentados muestran una coincidencia robusta entre las mediciones de SAOZ y el producto OFFL_L2_TOCL de TROPOMI, con mejor ajuste de la media diaria de SAOZ ($R^2=0,90$; $\text{RMSE}=11,2$ UD; $\text{MAE}=8,6$ UD; $\text{MBE}=2,1$ UD), lo que respalda la fiabilidad del

producto satelital para el seguimiento regional de la CTO en la región de OAPA (Garane et al., 2019). El sesgo positivo observado es coherente con validaciones previas y se encuentra dentro del rango reportado por Garane et al., 2019. Las causas probables incluyen diferencias de geometría de observación (SAOZ: mediciones cenitales en amanecer/atardecer con mayor factor de masa de aire; TROPOMI: observación nadiral al overpass), diferencias espectrales (bandas de Chappuis 450–550 nm para SAOZ vs bandas UV para TROPOMI) y la no simultaneidad temporal de las observaciones. Estas fuentes explican una sobreestimación sistemática pequeña, dentro del rango esperado para intercomparaciones entre instrumentación con geometrías y métodos diferentes.

La climatología construida a partir de MSR-2 y OMI muestra patrones estacionales bien definidos, con máximos de CTO asociados a la intensificación del transporte meridional por la circulación Brewer–Dobson y mínimos durante el periodo estival local, coherentes con la literatura sobre la variabilidad estratosférica de ozono (Butchart, 2014). Esta climatología permitió identificar el mínimo registrado el 24 de marzo de

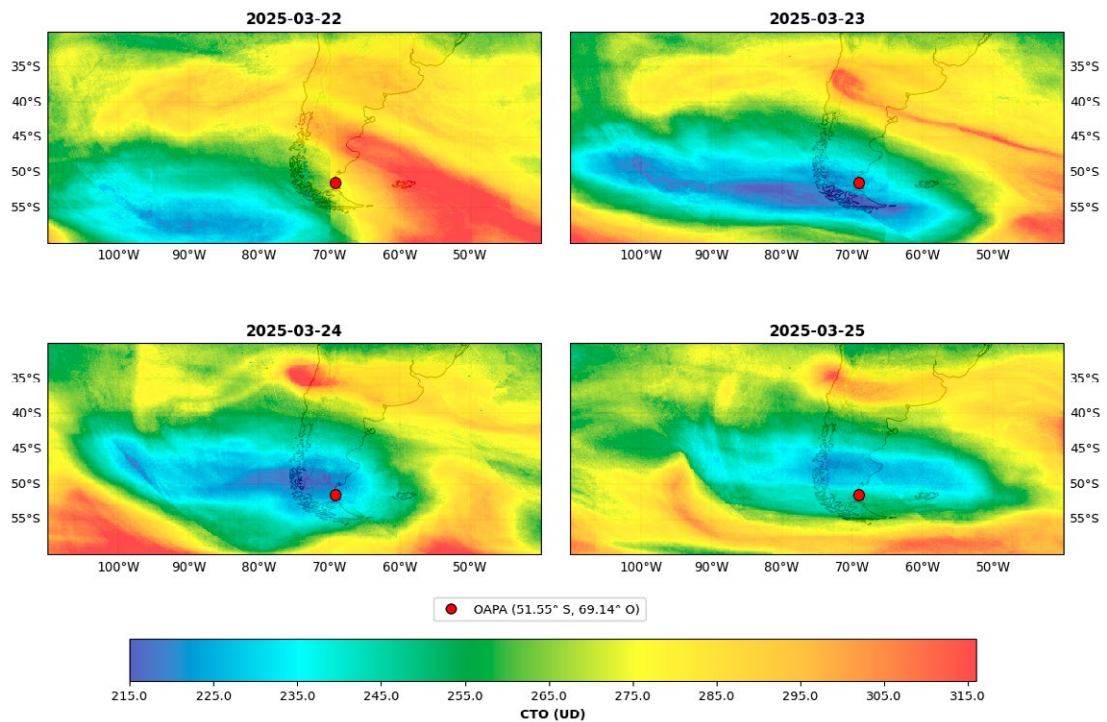


Figura 4. Evolución espacial del mini-agujero de ozono entre el 22 y el 25 de marzo de 2025. Se muestran mapas diarios de la CTO obtenidos del producto TROPOMI sobre la región austral de Argentina. El punto rojo indica la ubicación del OAPA, Río Gallegos. La escala de colores abarca valores entre 215 y 315 UD.

2025 como un evento extremo en la serie local. El evento principal (24 de marzo de 2025) ofrece evidencia convergente (TROPOMI, SAOZ y CSUVindex/OMI) de una anomalía extrema en CTO sobre OAPA: TROPOMI registró 227,3 UD (percentil empírico $\approx 0,5\%$) y SAOZ 236,9 UD ($\approx 0,6\%$). Este descenso en la CTO sobre el OAPA puede clasificarse como evento extremo, de acuerdo a los criterios IPCC (2021), y es comparable con eventos clásicos de agujero de ozono antártico durante la primavera austral (Wolfram et al., 2012, Orte et al., 2019; 2020).

La concordancia de niveles de ozono total y temporal entre satélite y observaciones de superficie (Figura 2), y la co-localización espacial del núcleo del mini-agujero con la estación OAPA (Figura 4), fortalecen la interpretación de un mini-agujero de ozono. Los mapas diarios permiten observar la rápida evolución del mini-agujero de ozono; desplazamiento, intensificación y disipación, comportamiento que aplica a la definición de Newman et al. (1988) para mini-agujeros de ozono.

Las observaciones del radiómetro YES, correspondientes al escenario (iii), registró una dosis eritémica diaria de $1,8 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2}$, valor intermedio entre las estimaciones teóricas obtenidas mediante la parametrización de Madronich: $1,7 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2}$ para el escenario (i) y $2,2 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2}$ para el escenario (ii). En términos relativos, el escenario (iii) mostró un aumento de $+8,8\%$ respecto al valor climatológico y una reducción de $-16,8\%$ frente al escenario de mini-agujero. Estas diferencias son coherentes con la presencia de factores de atenuación reales no contemplados en la parametrización bajo cielo despejado. Estudios previos han documentado reducciones similares en la irradiación, del orden de $\pm(10-40)\%$, asociadas a la cobertura nubosa (Bais et al., 2019; Hunter et al., 2019; Lamy et al., 2019).

Cabe además interpretar estas discrepancias correspondientes a la incertidumbre del modelo paramétrico (orden de magnitud $\approx 10\%$ (Madronich, 2007)) y de las incertidumbres instrumentales del radiómetro YES. Desde el punto de vista de

impacto, los datos muestran que el mini-agujero sí incrementó la dosis eritémica con respecto a la climatología local, pero el efecto biológico efectivo fue moderado por atenuación atmosférica.

5. Conclusiones

La integración de datos satelitales (TROPOMI, OMI), reanálisis multigeneracional (MSR2) e instrumentación de superficie (SAOZ) demuestra ser una estrategia eficaz para caracterizar la variabilidad y detectar eventos extremos de CTO en latitudes subpolares. El uso del promedio diario de SAOZ mejora la validación satélite-superficie al reducir la variabilidad puntual y disminuir error y sesgo respecto de mediciones individuales. Gracias a la climatología construida (μ , $\mu \pm 2\sigma$) se identificó el mini-agujero de marzo de 2025 como un evento extremo en la serie local, con descensos de CTO del orden de $\sim 15\text{--}20\%$ respecto de la climatología y caídas que alcanzaron valores por debajo de la banda $\mu - 2\sigma$. Los mapas diarios de alta resolución confirmaron la existencia y evolución espacial del núcleo del mini-agujero sobre el sur de Sudamérica (23–24 de marzo de 2025), y la co-localización con la estación OAPA respalda la convergencia entre señales satelitales y observaciones de superficie.

Desde la perspectiva radiativa, el análisis comparativo entre modelo (parametrización de Madronich, cielo despejado) y las observaciones de irradiancia UV-B por el radiómetro UVB-1 YES indica que, aunque el mini-agujero habría aumentado la dosis eritémica en condiciones ideales, la dosis efectiva observada fue moderada por atenuación atmosférica, atribuible a la nubosidad, en las condiciones reales del evento. Aún bajo estas atenuaciones, un aumento en la dosis fue observado respecto al escenario de referencia.

Los hallazgos de este trabajo subrayan la relevancia de un monitoreo integrado y continuo para la detección de anomalías de ozono fuera de los polos y aportan una metodología replicable para otras regiones. La buena concordancia observada entre TROPOMI y las mediciones de superficie de SAOZ en OAPA respalda el uso de productos satelitales para identificar y caracterizar el paso de mini-agujeros en áreas carentes de instrumentación in situ, siempre que dicho uso vaya acompañado de procedimientos de control de

calidad, co-localización y corrección de sesgos. En conjunto, estos resultados contribuyen al entendimiento de los procesos dinámicos estratosféricos y al mejoramiento de su detección. Son especialmente relevantes dado que los incrementos a corto plazo de estos procesos pueden provocar aumentos en los niveles de radiación solar UV.

Agradecimientos

Cristian Laino Baldini es estudiante del Doctorado en Ciencias Aplicadas, mención Ambiente y Salud (DCAAS, UNCPBA, Argentina). Los autores agradecen al OAPA (CITEDEF) y a LATMOS/CNRS por la operación y el mantenimiento del instrumento SAOZ. Los datos del instrumento TROPOMI, a bordo del satélite *Sentinel-5 Precursor*, fueron proporcionados por el programa Copernicus y su uso se rige por el *Legal Notice on the use of Copernicus Sentinel Data and Service Information*.

Contribución de los autores

CL: diseño del estudio; conceptualización del estudio; diseño metodológico; procesamiento y análisis de los datos; elaboración de figuras; redacción del manuscrito. FO: diseño del estudio; conceptualización del estudio; diseño metodológico; adquisición y análisis de datos instrumentales; revisión crítica del contenido científico. FC: diseño del estudio; conceptualización del estudio; diseño metodológico. EL: redacción; diseño metodológico; revisión crítica del contenido científico. GCB: conceptualización del estudio; revisión crítica del contenido científico. EW: supervisión general del proyecto; revisión crítica del contenido científico.

Conflictos de interés

Los autores declaran que no tienen conflictos de interés.

Referencias

- Bais, A.F., Bernhard, G., McKenzie, R.L., Aucamp, P.J., Young, P.J., Ilyas, M., Jöckel, P., Deushi, M. 2019. Ozone-climate interactions and effects on solar ultraviolet radiation. *Photochemical and Photobiological Sciences*, 18(3), 602-640. <https://doi.org/10.1039/c8pp90059k>

- Bian, L., Zhong, L., Zhang, D., Zheng, X., Lu, L. 2012. Validation of total ozone data between satellite and ground-based measurements at Zhongshan and Syowa stations in Antarctica. *Polar Science*, 23, 196203. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1085.2012.00196>
- Bittencourt, G.D., Pinheiro, D.K., Bageston, J.V., Bencherif, H., Steffene, L.A., Vaz Peres, L. 2019. Investigation of the behavior of the atmospheric dynamics during occurrences of the ozone hole's secondary effect in southern Brazil. *Annales geophysicae*, 37(6), 1049-1061. <https://doi.org/10.5194/angeo-37-1049-2019>
- Butchart, N. 2014. The Brewer-Dobson circulation. *Reviews of geophysics*, 52(2), 157-184. <https://doi.org/10.1002/2013RG000448>
- CIE. 1999. *Erythema Reference Action Spectrum and Standard Erythema Dose*. CIE S,7, E1998.
- Farman, J., Gardiner, B., Shanklin, J. 1985. Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO_x/NO_x interaction. *Nature*, 315, 207-210. <https://doi.org/10.1038/315207a0>
- Garane, K., Koukoulis, M.E., Verhoelst, T., Lerot, C., Heue, K.P., Fioletov, V., ... Zimmer, W. 2019. TROPOMI/S5P total ozone column data: global ground-based validation and consistency with other satellite missions. *Atmospheric Measurement Techniques*, 12(10), 5263-5287. <https://doi.org/10.5194/amt-12-5263-2019>
- Grewe, V., Dameris, M. 1997. Heterogeneous PSC ozone loss during an ozone mini-hole. *Geophys. Res. Lett.*, 24, 2503-2506. <https://doi.org/10.1029/97GL02641>
- Hunter, N., Rendell, R.J., Higlett, M.P., O'Hagan, J.B., Haylock, R.G. 2019. Relationship between erythema effective UV radiant exposure, total ozone, cloud cover and aerosols in southern England, UK. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(1), 683-699. <https://doi.org/10.5194/acp-19-683-2019>
- James, P.M., 1998a. A climatology of ozone mini-holes over the Northern Hemisphere. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 18(12), 1287-1303. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0088\(1998100\)18:12<1287::AID-JOC315>3.0.CO;2-4](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0088(1998100)18:12<1287::AID-JOC315>3.0.CO;2-4)
- James, P.M. 1998b. An interhemispheric comparison of ozone mini-hole climatologies. *Geophysical research letters*, 25(3), 301-304. <https://doi.org/10.1029/97GL03643>
- Kirchhoff, V.W.J.H., Alves, J.R., Da Silva, F.R., Fishman, J. 1996. Observations of ozone concentrations in the Brazilian cerrado during the TRACE A field expedition. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 101(D19), 24029-24042. <https://doi.org/10.1029/95JD03030>
- Lamy, K., Portafaix, T., Josse, B., Brogniez, C., Godin-Beekmann, S., Bencherif, H., ... Yoshida, K. 2019. Clear-sky ultraviolet radiation modelling using output from the Chemistry Climate Model Initiative. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(15), 10087-10110. <https://doi.org/10.5194/acp-19-10087-2019>
- Levelt, P.F., van den Oord, G.H.J., Dobber, M.R., Malkki, A., Visser, H., de Vries, J., Stammes, P., Lundell, J.O.V., Saari, H. 2006. The Ozone Monitoring Instrument. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(5), 1093-1101. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.872333>
- Madronich, S. (2007). Analytic formula for the clear-sky UV index. *Photochemistry and Photobiology*, 83(6), 1537-1538. <https://doi.org/10.1111/j.1751-1097.2007.00200.x>
- Millán, L.F., Manney, G.L. 2017. An assessment of ozone mini-hole representation in reanalyses over the Northern Hemisphere. *Atmos. Chem. Phys.*, 17, 9277-9289. <https://doi.org/10.5194/acp-17-9277-2017>
- Newman, P.A., Lait, L.R., Schoeberl, M.R. 1988. The morphology and meteorology of Southern Hemisphere spring total ozone mini-holes. *Geophys. Res. Lett.*, 15, 923-926. <https://doi.org/10.1029/GL015i008p00923>
- Newman, P.A., Oman, L.D., Douglass, A.R., Fleming, E.L., Frith, S.M., Hurwitz, M.M., Kawa, S.R., Jackman, C.H., Krotkov, N.A., Nash, E.R., Nielsen, J.E. 2009. What would have happened to the ozone layer if chlorofluorocarbons (CFCs) had not been regulated? *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(6), 2113-2128. <https://doi.org/10.5194/acp-9-2113-2009>
- Organización Mundial de la Salud (OMS). 2002a. *Global Solar UV Index: A Practical Guide*. Organización Mundial de la Salud, Geneva.
- Organización Mundial de la Salud (OMS). 2002b. *The world health report 2002: reducing risks, promoting healthy life*. Organización Mundial de la Salud, Geneva.
- Orsolini, Y.J., Limpasuvan, V. 2001. The North Atlantic Oscillation and the occurrences of ozone mini-holes. *Geophys. Res. Lett.*, 28, 1511-1514. <https://doi.org/10.1029/2000GL012757>

- Orte, P.F., Wolfram, E., Salvador, J., Mizuno, A., Bègue, N., Bencherif, H., ..., Quiroga, J. 2019. Analysis of a southern sub-polar short-term ozone variation event using a millimetre-wave radiometer. *Annales Geophysicae*, 37(4), 613-629 <https://doi.org/10.5194/angeo-37-613-2019>
- Orte, P.F., Luccini, E.A., Wolfram, E.A., Nollas, F.M., Pallotta, J.V., D'elia, R.L., ..., Hlongwana, N. 2020. Comparison of OMI-DOAS total ozone column with ground-based measurements in Argentina. *Revista de Teledetección*, 57, 13-23. <https://doi.org/10.4995/raet.2020.13673>
- Peres, L.V., dos Reis, N.C.S., dos Santos, L.D.O., Bittencourt, G.D., Schuch, A.P., Anabor, V., ..., Leme, N.M.P. 2016. Análise atmosférica dos eventos de efeito secundário do buraco de ozônio antártico sobre o sul do Brasil em 2012. Parte 1: identificação dos eventos e análise da dinâmica da estratosfera. *Ciência e Natura*, 38(1), 290-299. <https://doi.org/10.5902/2179460X12141>
- Peres, L.V., Pinheiro, D.K., Bencherif, H., Begue, N., Bageston, J.V., Bittencourt, G.D., ..., Mendes, D. 2017. Observations, Remote Sensing, and Model Simulation to Analyze Southern Brazil Antarctic Ozone Hole Influence. *Remote Sensing*, 16(11), 2017. <https://doi.org/10.3390/rs16112017>
- Pinheiro, D.K., Peres, L.V., Crespo, N.M., Schuch, N.J., Leme, N.M.P. 2011. Influence of the Antarctic ozone hole over South of Brazil in 2010 and 2011. *Annual Active Report 2011 - National Institute of Science and Technology Antarctic Environmental Research*, 1, 34-38. <https://doi.org/10.4322/apa.2014.058>
- Reed, R.J. 1950. The role of vertical motions in ozone-weather relationships. *J. Meteorol.*, 7, 263-267. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1950\)007<0263:TROVMI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1950)007<0263:TROVMI>2.0.CO;2)
- Salby, M.L., Callaghan, P.F. 1993. Fluctuations of total ozone and their relationship to stratospheric air motions. *J. Geophys. Res.*, 98(2), 2271-2284. <https://doi.org/10.1029/92JD01814>
- Seneviratne, S.I., Zhang, X., Adnan, M., Badi, W., Dereczynski, C., Di Luca, A., Ghosh, S., Iskandar, I., Kossin, J., Lewis, S., Otto, F., Pinto, I., Satoh, M., Vicente-Serrano, S.M., Wehner, M., Zhou, B. 2021. Weather and climate extreme events in a changing climate (Chapter 11). *ICC 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis*, 1513-1766.
- Solomon, S. 1999. Stratospheric ozone depletion: A review of concepts and history. *Rev. Geophys.*, 37(3), 275-316. <https://doi.org/10.1029/1999RG900008>
- Stenke, A., Grewe, V. 2003. Impact of ozone mini-holes on the heterogeneous destruction of stratospheric ozone. *Chemosphere*, 50(2), 177-190. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(02\)00599-4](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(02)00599-4)
- Teitelbaum, H., Moustauoui, M., Fromm, M. 2001. PSC and ozone mini-hole formation: the primary importance of synoptic scale flow perturbations. *J. Geophys. Res.*, 106(D22), 28173-28188. <https://doi.org/10.1029/2000JD000065>
- Van Der A, R.J., Allaart, M.A.F., Eskes, H.J., 2015. Extended and refined multi sensor reanalysis of total ozone for the period 1970-2012. *Atmospheric Measurement Techniques*, 8(7), 3021-3035. <https://doi.org/10.5194/amt-8-3021-2015>
- Vaz Peres, L., Bencherif, H., Mbatha, N., Passaglia Schuch, A., Tohir, A.M., Bègue, N., ..., Schuch, N.J., 2017. Measurements of the total ozone column using a Brewer spectrophotometer and TOMS and OMI satellite instruments over the Southern Space Observatory in Brazil. *Annales Geophysicae*, 35(1), 25-37. <https://doi.org/10.5194/angeo-35-25-2017>
- Veefkind, J.P., de Haan, J.F., Brinksma, E.J., Kroon, M., Levelt, P.F., 2006. Total Ozone from OMI Using the DOAS Technique. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(5), 1239-1244. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.871204>
- Veefkind, J.P., Aben, I., McMullan, K., Förster, H., De Vries, J., Otter, G., ... Levelt, P.F. 2012. TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor: Instrument design and expected performance. *Atmos. Meas. Tech.*, 5, 145-171.
- Waugh, D.W. 1993. Subtropical stratospheric mixing linked to disturbances in the polar vortices. *Nature*, 365, 535-537. <https://doi.org/10.1038/365535a0>
- Wolfram, E.A., Salvador, J., Orte, F., D'Elia, R., Godin-Beekmann, S., Kuttippurath, J., Pazmiño, A., Goutail, F., Casiccia, C., Zamorano, F., Paes Leme, N., Quel, E.J.: 2012. The unusual persistence of an ozone hole over a southern mid-latitude station during the Antarctic spring 2009: a multi-instrument study. *Annales Geophysicae*, 30(10), 1435-1449. <https://doi.org/10.5194/angeo-30-1435-2012>