



Universidad de Valladolid
FACULTAD DE CIENCIAS

TRABAJO DE FIN DE GRADO

Grado en Física

ESTUDIO DE LA VARIABILIDAD DE LA COLUMNA DE OZONO
POR MEDIO DE ANÁLISIS ARMÓNICO

Autor:

Hugo de Lama Sánchez

Tutor/es:

Abel Calle, Pablo Salvador

Índice

| | |
|---|-----------|
| 1. Introducción | 7 |
| 1.1. Antecedentes | 7 |
| 1.2. Ozono en la atmósfera | 8 |
| 1.2.1. Troposfera | 8 |
| 1.2.2. Estratosfera | 10 |
| 1.2.3. El vórtice polar | 12 |
| 1.2.4. Nubes polares estratosféricas | 13 |
| 1.2.5. El efecto invernadero | 14 |
| 1.2.6. Riesgos para la salud | 14 |
| 1.3. Normativa | 15 |
| 2. Objetivos | 17 |
| 3. Datos y metodología | 18 |
| 3.1. Obtención de datos: el satélite AURA | 19 |
| 3.1.1. Espectrómetro OMI (Ozone Monitoring Instrument) | 19 |
| 3.1.2. Formato de las series de datos | 20 |
| 3.1.3. Unidad Dobson | 21 |
| 3.2. Análisis de los datos | 22 |
| 3.2.1. Regiones de interés | 22 |
| 3.2.2. Análisis temporal de las concentraciones de ozono | 22 |
| 3.2.3. Análisis latitudinal de las concentraciones de ozono | 26 |
| 3.3. Análisis de las periodicidades del ozono | 27 |
| 3.3.1. La transformada de Fourier | 27 |
| 3.3.2. Energía espectral | 28 |
| 3.3.3. El ciclo solar | 28 |

| | |
|--|-----------|
| 3.4. Software complementario: | 30 |
| 4. Resultados | 31 |
| 4.1. Análisis temporal de la columna de ozono | 31 |
| 4.2. Análisis latitudinal de la columna de ozono | 33 |
| 4.3. Análisis de las periodicidades de la columna de ozono | 38 |
| 5. Conclusiones | 47 |
| 6. Bibliografía | 48 |
| 6.1. Páginas de interés: | 48 |
| 6.2. Referencias | 48 |

*A mi familia y seres queridos, gracias por tener tanta paciencia conmigo.
A mis tutores por guiarme en este trabajo.*

Resumen

En este trabajo hemos realizado un estudio de la variabilidad de la columna de ozono estratosférica para el periodo de tiempo de 2005-2020. Los datos que se han utilizado fueron tomados por el espectrómetro *OMI* y son de libre acceso en la página "*NASA Ozone Watch: Images, data, and information for atmospheric ozone*".

Con estos datos que hemos procesado mediante algoritmos de programación y la utilización de diversos programas como *MATLAB*, *Mathematica* o Excel, hemos hecho un análisis temporal, por latitudes mediante el uso de armónicos (más concretamente de las periodicidades) para estudiar la evolución del ozono.

En ellos hemos visto cómo varían las concentraciones de ozono en función del tiempo y de la latitud, y hemos representado sus gráficas en las que se pueden ver las periodicidades. Gracias a su comportamiento periódico, hemos podido realizar un filtro mediante el uso de la Transformada de Fourier para representar de manera más clara la evolución del ozono estratosférico.

Por último hemos hecho una comparativa del periodo ciclo solar con el del ozono estratosférico para comprobar que, en las regiones en donde los procesos de creación del ozono son mayores, la evolución del ozono estratosférico coincide con la variación del ciclo solar.

Abstract

In this project we made a complete study about how does the stratospheric ozone column evolves during the period 2005-2020. The data that we used in this work has been taken by the spectrometer *OMI* and is available in the web page: "*NASA Ozone Watch: Images, data, and information for atmospheric ozone*".

With all this data, we processed it by coding and using some programs like *MATLAB*, *Mathematica* or Excel, and finally we made a temporal, latitudinal and armonic analysis, in order to study the ozone evolution.

In all this process we found how does the ozone concentrations evolve with time and latitude, and we also represented its graphics in which we can see the periods. Thanks to its periodic behaviour, we could make a filter by using the Fourier Transform to represent the signal of the ozone evolution with less noise.

At last, we compared the solar cycle with the stratospheric ozone in order to prove that, in the regions where the creation of ozone is higher, the evolution of the stratospheric ozone matches with the solar cycle.

1. Introducción

1.1. Antecedentes

El ozono (O_3) es una sustancia comúnmente gaseosa en la naturaleza conocida desde hace mucho tiempo, y presente en la atmósfera. Antes de tener conocimiento de la existencia del ozono, se identificaba un olor raro tras la caída de un rayo durante una tormenta eléctrica. La palabra "ozono" viene por tanto de la expresión griega "ozein" que significa "gas que huele".

Es difícil determinar cuándo se descubrió exactamente el ozono. En el siglo XVIII el físico holandés Martinus Van Marum (1750-1837) percibió un olor extraño en uno de sus experimentos con una máquina electrostática, sin darse cuenta de que había creado el ozono. Unos años más tarde, ya en el siglo XIX, Cristian Friedrich Schonbein (1799-1868) tras oler el mismo olor que Van Marum, logró sintetizarlo (Añel, 2016).

Este descubrimiento desencadenó una cadena de experimentos que fueron desvelando al ser humano algunas de sus propiedades junto al desarrollo de posibles aplicaciones, siendo relevantes su papel en la desinfección y desodoración del ambiente o para purificación y tratamiento del agua, o sus aplicaciones médicas que derivarían en la posterior *ozonoterapia* (Sunnen, 1988). A todos estos avances se les sumó un importante debate acerca de si este compuesto era beneficioso o perjudicial para la salud, de hecho hasta el siglo XX se creía que el ozono era beneficioso para la salud.

En general estas aplicaciones abarcan 4 importantes funciones que son (Gottschalk, 2009):

- La desinfección (control de patógenos).
- La oxidación de compuestos inorgánicos (lo que se denomina *ozonización*).
- La oxidación de componentes orgánicos, incluyendo la eliminación el sabor, olor y color.
- Y por último la eliminación de partículas.

Asimismo, los riesgos reales del ozono hay que matizarlos correctamente, y es que no deja de ser un compuesto necesario para la vida en la Tierra ya que es un gas componente atmosférico, al igual que no hace la misma función ni tiene los mismos peligros el ozono de la troposfera que el de la estratosfera, por lo que esto se explicará mejor en los siguientes apartados.

Hablando ahora de un tema que compete más a este trabajo (que es el análisis de las concentraciones de ozono en la atmósfera), fue a partir de la década de los 50 cuando empezaron a tomarse las primeras medidas estratosféricas de la concentración del ozono a través de un espectrómetro en la Antártida (concretamente, en 1957 en el observatorio: *Halley Bay Observatory* del British Antarctic Survey). Los resultados que obtuvieron más adelante les darían la clave de lo que estaba pasando en la capa de ozono.

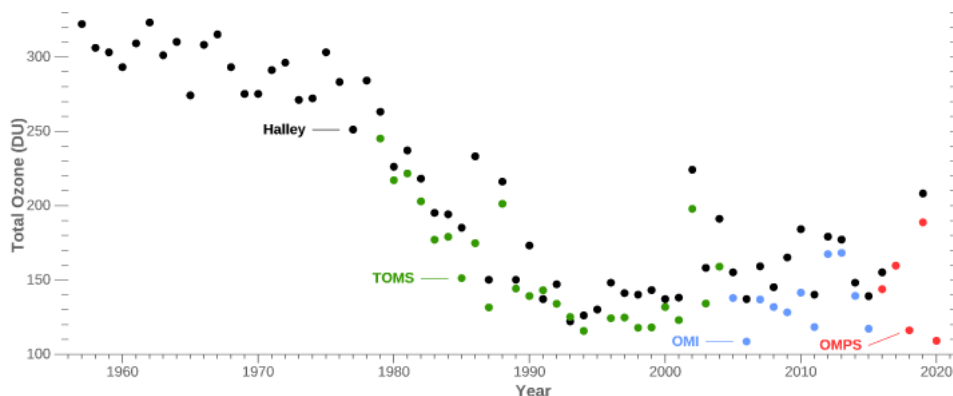


Figura 1: Instrumentos en tierra firme (en Halley) y sobre la Antártida (Total Ozone Mapping Spectrometer [TOMS], Ozone Monitoring Instrument [OMI], y Ozone Mapping and Profiler Suite [OMPS]), midieron una fuerte caída en el ozono total atmosférico durante el mes de octubre a principios y mediados de los años 80. Fuente: NASA Ozone Watch, *Images, data, and information for atmospheric ozone: History of the Ozone Hole*

Si observamos la figura 1 se ve claramente una caída de los valores de concentración de ozono en el mes de octubre (coincidiendo con la primavera en el hemisferio sur), especialmente a principios y mediados de la década de los 80. Y es que no fue hasta entonces que la medición de la concentración del ozono en la estratosfera tomó verdadera importancia, ya que se descubrió (Farman, 1985) que existía una relación entre los Cloro Fluoro Carbonos (CFCs) que producíamos en la troposfera con la disminución del ozono en la Antártida. Posteriormente en 1986, los científicos de la NASA descubrieron que el conocido fenómeno **agujero de ozono** era un fenómeno regional (sucedió únicamente en la región polar Antártica) mediante los datos del Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) y el Solar Backscatter Ultraviolet (SBUV) (instrumentos similares a los que nos han proporcionado los datos para este trabajo).

1.2. Ozono en la atmósfera

El ozono (O_3) es una molécula compuesta por tres átomos de oxígeno. Se forma cuando las moléculas de oxígeno son excitadas lo suficiente para descomponerse en oxígeno atómico, de dos niveles energéticos diferentes, y las colisiones entre los diferentes átomos son los que generan la formación del ozono.

Es una forma **alotrópica** del oxígeno, es decir, es el resultado de la reordenación de los átomos de oxígeno cuando las moléculas son sometidas a una descarga eléctrica. Por tanto, es la forma más activa del oxígeno.

Como se explica al principio, el ozono se encuentra en estado gaseoso de manera natural (a presión y temperatura ambiente), tiene un olor fuerte y generalmente es incoloro, sin embargo en altas concentraciones adquiere un tono azulado. Se licua a -111.9°C , y se solidifica a -193°C .

Una de sus propiedades más interesantes es que es altamente oxidante, por lo que se encarga de desinfectar, purificar y eliminar microorganismos patógenos (virus, bacterias, hongos, moho, esporas...). Esta propiedad es la que lo hace un buen desinfectante, como se mencionó previamente.

También puede eliminar los malos olores atacando directamente sobre la causa que los provoca sin añadir ningún otro olor para intentar encubrirlo, como hacen los ambientadores. Y es que a diferencia de otros desinfectantes, el ozono no deja residuos químicos puesto que es un gas inestable y se descompone rápidamente en oxígeno con el efecto de la luz, el calor, los choques electrostáticos, etc. Esta inestabilidad será importante para entender algunos fenómenos que ocurren en la atmósfera que estudiaremos más adelante.

El ozono atmosférico se encuentra en estado puro en diferentes concentraciones entre los 10 y los 40 km sobre el nivel del mar, siendo su concentración más alta alrededor de los 25 km (ozonósfera), es decir, en la estratosfera. Su importancia reside en la famosa *capa de ozono*, ya que esta actúa como depurador del aire y sobre todo como filtro de los rayos ultravioletas procedentes del Sol, siendo fundamental para la vida en la Tierra (Dessler, 2000).

A continuación y como anunciamos anteriormente, vamos a separar el ozono de la troposfera y el de la estratosfera con el fin de explicar las diferentes funciones y riesgos que existen en ambas capas. Coloquialmente y en determinadas ocasiones, se usan expresiones como "ozono bueno" (estratosférico) y "el ozono malo" (troposférico) para diferenciarlas más fácilmente.

1.2.1. Troposfera

En la capa más cercana a la Tierra (hasta unos 10 km por encima del nivel del mar), el ozono supone un 10% de su concentración total en la atmósfera. Se denomina ozono troposférico u ozono ambiental y es un **gas traza**¹.

La intrusión de ozono de la estratosfera a la troposfera no está claro. Algunos científicos defienden que una fuente puede ser el descenso de corrientes de aire seco de ciclones de latitudes medias, sin embargo lo que sí sabemos es que existen procesos que lo forman en esta misma capa, tanto naturales como antropogénicos. Y

¹**gas traza** es cualquier gas presente en la atmósfera en baja concentración (menos de 1% por unidad de volumen de la atmósfera). Gases traza son todos los gases a excepción del nitrógeno (78,1%) y oxígeno (20,9%), como por ejemplo el argón o el vapor de agua (aunque su concentración es variable)

es que el ozono troposférico puede encontrarse en concentraciones superiores a las habituales en la atmósfera y, en este caso, es considerado un **contaminante atmosférico**. De hecho es un contaminante secundario, es decir, que no es emitido directamente a la atmósfera por una fuente, sino que se forma a partir de reacciones fotoquímicas (activadas por la luz solar) entre contaminantes primarios.

Concretamente, se forma ozono cuando coexisten los óxidos de nitrógeno (NO_x), los compuestos orgánicos volátiles (COVs, provenientes de la quema de combustibles) y una radiación solar intensa a lo largo de un periodo de tiempo lo bastante largo (un mínimo de diversas horas).

Luego la formación de O_3 en la troposfera a través del NO_2 sigue las fórmulas:



En concreto ν es la frecuencia correspondiente a la radiación solar (que debe ser menor a $0,430\mu m$) y M es un radical que equilibra la reacción absorbiendo el exceso de energía y permitiendo así la conservación de la *Energía* y la *Cantidad de Movimiento* (Wallace and Hobbs, 2006). Sin embargo, la mayoría del O_3 producido por estas reacciones es inestable, y se transforma de nuevo en O_3 por otra reacción que le sigue:

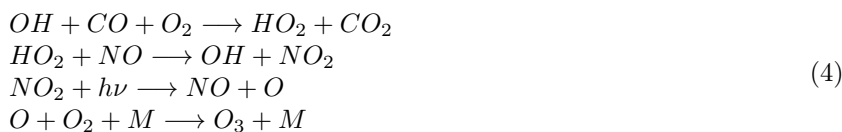


Tras darse la reacción (2) comienza de nuevo el ciclo de formación. Por lo tanto para calcular las concentración final de ozono en la troposfera podemos usar la expresión:

$$O_3 = \frac{k_{NO_2} \cdot [NO_2]}{k_{NO} \cdot [NO]} \quad (3)$$

siendo k_{NO_2} y k_{NO} las constantes de las reacciones de destrucción del NO_2 y el O_3 respectivamente.

Por ir un poco más lejos, los NO_x se pueden generar también a partir de otros compuestos como el HO_2 , provenientes de la oxidación de los COVs mencionados anteriormente (el OH en aire limpio se convierte en HO_2). Mezclándose el NO con este compuesto, obtenemos NO_2 , lo que posteriormente producirá la reacción (1). Luego una reacción más detallada de creación sería:



Lo que demuestra la importancia de la fotodisociación y el NO_x en la determinación de la concentración del O_3 en la troposfera, así como la complejidad de la química del ozono. A este proceso de formación de ozono a nivel del suelo se le denomina también como **smog fotoquímico** (Sillman, 2003), cuya expresión se usa normalmente para referirse al color oscuro que envuelve la atmósfera por encima de algunas ciudades debido a la contaminación.

El ciclo del ozono troposférico a lo largo del día es variable, presentando los máximos durante el día (al haber radiación solar) y mínimos durante la noche. Fundamentalmente para su formación deben darse 4 condiciones:

- 1.- Muchas horas de luz solar y fuerte radiación incidente.
- 2.- Situación anticiclónica (altas presiones).
- 3.- Altas temperaturas.
- 4.- Existencia de contaminantes primarios (en concentraciones no muy elevadas).

Los NO_x se producen por altas temperaturas que son producidas de manera antropogénica por empresas que generan calor, como las termoeléctricas, las metalmecánicas, las industrias de cerámica..., y por los motores de explosión interna de los automóviles.

Todos los procesos de (4) sumados al rápido crecimiento del uso de los combustibles fósiles desde la revolución industrial demuestran el aumento del ozono troposférico a nivel global. Si bien es cierto que existen fuentes de O_3 provenientes de emisores naturales de COVs, NO_x y CO como las plantas y suelos, incendios forestales y tormentas eléctricas, no es posible atribuir los niveles altos de concentración en exclusiva a estas fuentes, sino fundamentalmente a las antropogénicas.

Como primera consecuencia clave de esto tenemos el calentamiento de la superficie terrestre ya que es un importante absorbente de la radiación infrarroja lo que repercute directamente en el calentamiento global (Calle, 1997). Por ello es también considerado un **gas de efecto invernadero**, por lo que es vital regular las actividades que conlleven un aumento del mismo.

1.2.2. Estratosfera

La estratosfera está situada a partir de la tropopausa hasta los 50km por encima del nivel del mar y su principal característica es su alta concentración de ozono que supone el 90 % de la concentración del mismo en la Tierra, ya que entre los 20 - 30km de altitud se encuentra la ozonoesfera (máximo de la concentración del ozono a los 25km). Este ozono es considerado "el bueno" por 3 importantes funciones que hacen que sea posible la vida en la Tierra:

- Forma un escudo protector que reduce la intensidad de la radiación ultravioleta (UV), evitando que alcance la superficie terrestre.
- Gracias a la absorción de la radiación UV, se determina el perfil vertical de temperaturas de la estratosfera (esto es debido también a la dependencia de la concentración del ozono con la latitud terrestre que se estudiará y analizará más adelante en el trabajo).
- Está involucrado en muchas de las reacciones químicas que se dan en la estratosfera (Wallace and Hobbs, 2006).

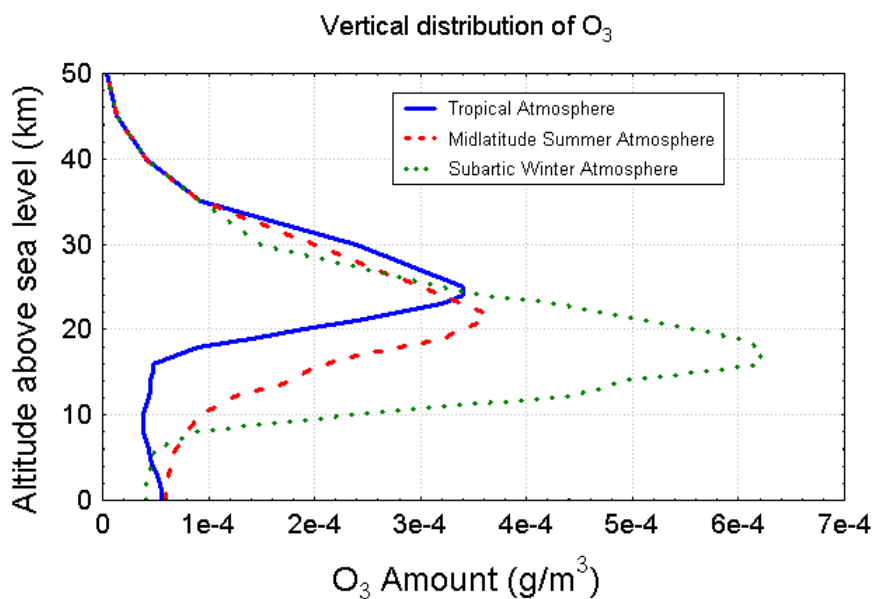


Figura 2: Variación de la distribución vertical del ozono por diferentes regiones: Tropical, Latitud media, Antártica. Fuente: <https://tropic.ssec.wisc.edu/>

En la figura 2 podemos apreciar cómo es la variación de concentración de O_3 con la altitud, justificando así la diferencia con la troposfera y, tanto el máximo en la ozonoesfera como su localización.

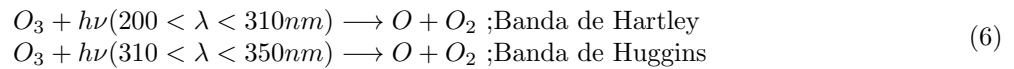
La formación del ozono estratosférico tiene lugar cuando a altitudes próximas a los 25 km, las moléculas de oxígeno son fotodisociadas por efecto de la radiación solar UV, de longitudes de onda en este caso inferiores a $242nm$. Así los enlaces de la molécula de oxígeno son destruidos por la radiación. Los átomos de oxígeno libres (O) se combinan con oxígeno molecular (O_2) produciendo así moléculas de ozono (O_3) de acuerdo a las ecuaciones:



De nuevo, para que se de la formación del ozono se necesita un tercer radical (M) que intervenga en el choque y se cumpla la conservación de la *Energía* y la *Cantidad de Movimiento*. Estas reacciones son las que expone el **ciclo de Chapman** de la *teoría de Chapman, 1930*.

Una vez formada la molécula de ozono, absorbe la radiación ultravioleta en dos bandas de absorción en el rango de longitudes de onda de 200-350nm y finalmente se disocia formando O_2 molecular y O_2 atómico, debido a que la molécula de O_3 es muy inestable bajo estas condiciones.

Luego el proceso de destrucción que sigue es:



siendo la **banda de Hartley** la que abarca el rango de entre los 200-310nm (máximo en 250-260nm) y la **banda de Huggins** la del rango de 300-350nm. Con este rango de absorción lo que consigue la ozonósfera es impedir que parte de la radiación UV de longitudes de onda superiores a 400nm alcance la superficie de la Tierra, lo que evita que llegue una radiación sumamente nociva a los seres vivos.

El oxígeno de la reacción (6) correspondiente a la banda de Hartley es muy inestable y reacciona inmediatamente de 2 formas:

- Formación de ozono mediante recombinación del oxígeno atómico con oxígeno molecular a través de un choque con una molécula neutra.
- Destrucción del ozono cuando el oxígeno atómico (O) reacciona con una molécula de O_3 inestable, formándose como consecuencia, dos moléculas de oxígeno (O_2) mediante la reacción:



aunque hay razones para creer que aunque la concentración de ozono es máxima en alturas de 25-30km, su formación es más eficiente y más probable en niveles mucho más altos de la estratosfera. El equilibrio es regulado por la intensidad de la radiación solar que llega a la estratosfera, que propociona un ascenso de la temperatura que puede llegar a $0^{\circ}C$ en la estratopausa (Saha, 2008).

En cuanto a su destrucción, el proceso que se da es la fotólisis (disociación por colisión con ondas de luz). En dicho proceso, la onda de luz a frecuencia ν interacciona con una molécula de ozono y produce una molécula de oxígeno y un átomo de oxígeno excitado:



Sin embargo, en la ozonósfera, la colisión del ozono con un átomo de oxígeno debido a la radiación ultravioleta a frecuencias de la banda de Hartley es un mecanismo de destrucción de O_3 mucho más común:



Hasta aquí tendríamos definidos los procesos naturales de creación y destrucción descritos por el ciclo de Chapman. Sin embargo tenemos otra serie de procesos de destrucción que involucran hasta 200 tipos diferentes de reacciones, debido a la introducción de diversos tipos de vertidos industriales. Evidentemente no todos son debidos a la acción humana pero sin duda son los que más merece la pena controlar. De todos estos compuestos podemos diferenciar 3 grandes grupos de radicales (Cisneros, 1989):

- Radicales de Hidrógeno (O , OH y HO_2) que generan el radical OH . Su proceso de destrucción no es tan importante ya que a niveles estratosféricos no hay prácticamente agua natural y estos se crean de la disociación del vapor de agua.
- Óxidos de nitrógeno (NO y NO_2) generan el radical NO y provienen de la oxidación del óxido nitroso (N_2O). Este proceso es posiblemente el más importante ya que a estas alturas de manera natural el N_2O es muy abundante.
- Compuestos de cloro forman los radicales de Cl , generados por la disociación química de los CFCs. Los más importantes son: $CFC - 12$, $CFC - 11$, $CFC - 113$ y CCl_4 . Proviene de sprays y gases sintéticos de la industria.
- Compuestos de bromo, en forma de radicales de Br que juegan el mismo papel que los de Cl .

Las reacciones tienen la forma genérica de:



siendo X cualquier molécula que actúe de catalizador de la reacción de los posibles radicales: H , OH , NO , Cl ó Br .

Hay numerosos factores que afectan a la concentración del ozono. Factores meteorológicos como la temperatura o la duración de la luz solar favorecen la concentración del ozono, mientras que la humedad o las precipitaciones la desfavorecen. Así mismo, se ha visto que el ciclo solar de once años es también un factor importante en su formación (esto lo estudiaremos en profundidad más adelante). Se ha visto también que la reducción de visibilidad por contaminantes tiene impacto en la concentración de O_3 (Chen, 2020b; Goral 2020).

Por último hay que destacar algunos fenómenos estratosféricos que afectan directamente en la variabilidad del ozono estratosférico. Estos son principalmente el vórtice polar, las nubes polares estratosféricas y, el conocido efecto invernadero.

1.2.3. El vórtice polar

El **vórtice polar** es un fenómeno que se forma en la estratosfera a latitudes polares a partir del equinoccio de otoño, que es cuando en dichas regiones deja de llegar la radiación solar ultravioleta. La emisión de la radiación térmica rápidamente enfría la estratosfera a temperaturas mucho más bajas que en las latitudes medias, y por ello se da un gradiente latitudinal de presión entre estas 2 regiones.

Este efecto combinado con la rotación de la Tierra (fuerza de Coriolis) genera una circulación de vientos que se vuelven un remolino gigantesco de aire, el cual alcanza velocidades cercanas a los 100m/s. (Schoeberl, 1991).

Durante la época del verano polar la radiación ultravioleta es absorbida por la capa de ozono estratosférico (tal y como indicamos previamente en los procesos de creación) y provocando la entrada de vientos del este. Pero con la llegada del invierno, la ausencia de radiación solar enfría el aire provocando la caída de grandes masas de aire hacia niveles inferiores y se abre una entrada de vientos estratosféricos que fluyen desde el hemisferio que está en verano, a el de invierno. Cuando a todas estas condiciones se le suma la aceleración de Coriolis, se producen vientos de gran intensidad que alcanzarán su velocidad máxima llegada la primavera. El remolino final es el vórtice, y aísla por completo a las masas de aire de los polos, que se quedarán en el interior del mismo impidiendo su mezcla de aire con el de latitudes medias.

Pese a que este fenómeno natural se da con mayor intensidad en el polo sur (se cree que debido a ser una región terrestre rodeada de agua y a causas astronómicas como que el invierno en el hemisferio sur se da en el perihelio de la elipse de la órbita terrestre alrededor del Sol, por lo que es más frío), el vórtice polar no deja de afectar a la concentración de ozono debido a que el aislamiento del aire estratosférico provoca que la destrucción de las moléculas de ozono por las reacciones con los CFCs actúen en un aire que no se regenera, generando así un descenso local del ozono.

Una conclusión clave al entender este fenómeno es señalar al vórtice polar como el causante del agujero de ozono natural, que si bien es un fenómeno que se da cada año es la presencia de los CFCs (en especial la del cloro) la que vuelve el agujero de ozono un problema.

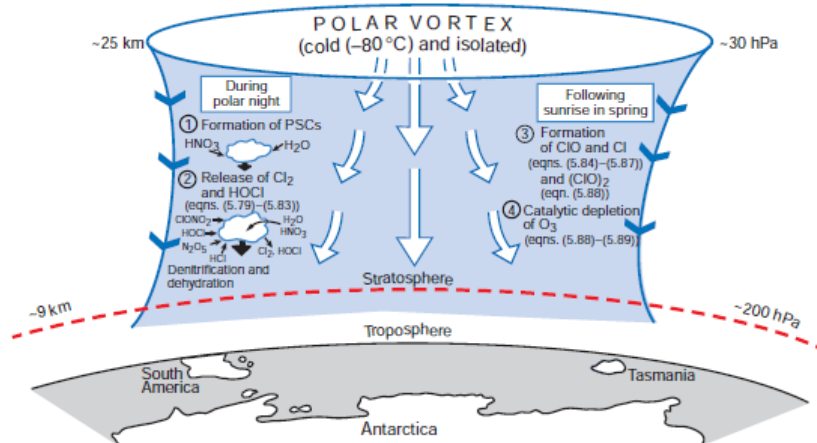


Figura 3: Esquema del vórtice polar (azul) que se genera en la Antártida. Las flechas indican el aire frío descendiente. Se indican también los procesos que tienen lugar en las formaciones de las nubes estratosféricas de las que hablaremos a continuación. Fuente: **Wallace and Hobbs, 2006**

1.2.4. Nubes polares estratosféricas

Las nubes polares estratosféricas (comúnmente llamadas PSCs) son nubes de vapor de agua congelado y ácido nítrico hidratado ($HNO_3 - H_2O$) que se forman en niveles bajos de la estratosfera (entre los 10 y los 25km de altura) a temperaturas de 190K o menores. Esta temperatura limita la existencia de las PSCs a latitudes altas durante el invierno polar, especialmente en la Antártida (Sloan, 1998).

Las PSCs calientan la troposfera y la superficie de la Tierra evitando que la radiación de grandes longitudes de onda, sea emitida. Por ello, el efecto neto de las PSC está sesgado estacionalmente hacia el calentamiento invernal.

Su relación con el ozono está ligada a los procesos de destrucción del ozono, y es que en la superficie de estas PSCs las reacciones químicas transforman a los químicos inactivos para el O_3 en elementos activos a la espera de la llegada de radiación solar en primavera para iniciar los procesos de destrucción (Calle, 1997).

Podemos distinguir dos tipos de nubes polares estratosféricas:

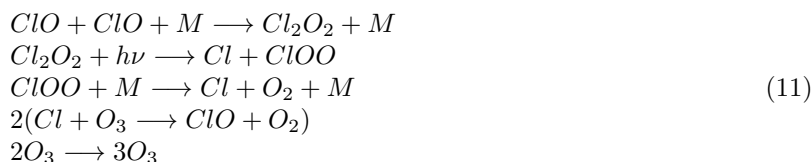
- Tipo I: Las que se componen de ácido nítrico hidratado ($HNO_3 - H_2O$) con partículas muy pequeñas del orden de $1\mu m$, que se forman a los $-170^\circ C$.
- Tipo II: Las que se forman principalmente por cristales de hielo del orden de $10\mu m$. Estas realmente contienen hielo (H_2O y ácido nítrico (HNO_3)). El tamaño de las partículas en este tipo, hace que caigan por acción de la gravedad a lo largo del día.

La formación se debe a situaciones en las que un fuerte chorro de viento troposférico sopla del mar hacia el continente helado. Este viento es muy fuerte (alcanzando velocidades de 110km/h) y frecuente en la Antártida.

El **efecto orográfico**² facilita los movimientos de ascensión del aire y en épocas del año a partir del mes de septiembre, la baja estratosfera reúne las condiciones para que se den pequeños enfriamientos adiabáticos (a 190K), saturando el vapor de agua y consiguiendo la formación de dichas nubes.

Los mínimos de ozono (alrededor de los meses de otoño casi invierno) siempre han estado relacionados con la presencia de las PSCs, y en concreto con la formación del agujero de ozono antártico. La destrucción del ozono en las PSCs se resume en los siguientes pasos (Cariolle, 1990):

- 1.- Las PSCs de tipo I que se generan durante la noche polar tienden a reducir el contenido de NO_x de la atmósfera circundante, reduciendo con ello la formación de compuestos de cloro inerte (que capturan el cloro formando compuestos relativamente estables y reduciendo los átomos de cloro libre que podrían actuar gravemente sobre el O_3 . Sobre las partículas de hielo se dan reacciones que eliminan el cloro inerte, sin embargo liberan Cl_2 , que es una fuente de radicales de cloro activo (y ya hemos visto como estos radicales afectaban en los procesos de destrucción del ozono).
- 2.- Tras la formación de las PSCs y la aparición de los radicales de cloro activo, el siguiente proceso se da con la llegada de la luz solar, ya que esta desencadena una serie de reacciones catalíticas que destruyen a las moléculas del ozono:



Combinado con el efecto del propio vórtice polar, las nubes polares estratosféricas generan un gran impacto en la concentración del ozono de la estratosfera. Además, el efecto de destrucción del ozono por las PSCs se retroalimenta, ya que la reducción del mismo O_3 implica menor calentamiento estratosférico debido a una menor absorción de radiación, lo que provoca que a menor temperatura, mayor formación de PSCs y mayor efecto de destrucción de ozono.

1.2.5. El efecto invernadero

Como es lógico, el efecto invernadero está también relacionado con la disminución del ozono de la atmósfera, y aunque no es la idea de este trabajo entrar en profundidad en este tema es conveniente mencionarlo.

Básicamente el efecto invernadero se produce por el contenido de gases de efecto invernadero en la atmósfera (GEI: CO_2 , CH_4 , CFCs, etc). Anteriormente explicamos que el ozono era un GEI en la troposfera ya que intervenía en el calentamiento terrestre al absorber la radiación infrarroja. Además el problema de la disminución de ozono en la estratosfera tiene una relación directa con el efecto invernadero ya que ambos están provocados por la presencia de CFCs en la atmósfera.

Podemos resumir que la disminución del O_3 y el efecto invernadero mantienen una relación en la que se agravan de manera proporcional: Cuanto más descienda el ozono estratosférico, mayor es el flujo de radiación UV que llega a la troposfera y más ozono se generará, lo que a su vez aumenta la absorción de radiación infrarroja, que retendrá más calor en la troposfera.

1.2.6. Riesgos para la salud

Como veníamos diciendo anteriormente, el ozono supone un riesgo para la salud del ser humano en ciertas concentraciones. En la troposfera por ejemplo, altos niveles de ozono pueden tener impacto en la salud, tanto a corto como a largo plazo (Díaz, 2018). A corto plazo, puede producir alteraciones en el funcionamiento de

²**Efecto orográfico** es el efecto que producen las formas del relieve terrestre

los aparatos respiratorio y cardiovascular, e incluso elevar la tasa de mortalidad (en humanos nos afecta si la concentración sobrepasa los 240pg por m^3). A largo plazo, puede producir inflamación pulmonar, incentivar el desarrollo de asma y reducir la esperanza de vida. En España, se han encontrado evidencias de mortalidad por causas respiratorias y cardiovasculares por exposiciones a concentraciones altas de ozono. También supone un problema para la vegetación ya que provoca fuertes disminuciones en la productividad (Calle, 1997).

Por otro lado, en la estratosfera, al igual que el ozono nos protege de los efectos dañinos de la radiación ultravioleta, cualquier reducción de la concentración del ozono (por medio de su destrucción con procesos como el de las ecuaciones expuestas en (10) con cualquier otro compuesto de los antropogénicos) supone un peligro no solo para los humanos, sino también para otras formas de vida de la Tierra.

El límite de seguridad de concentración del ozono para los humanos se estableció en 220 unidades **Dobson**, por lo que una reducción por debajo de este nivel es lo que conocemos como *agujero de ozono*. Es mundialmente conocido que el aumento de la concentración de compuestos que degeneran en Cl , NO , NO_2 ,... (Stull, 2017) en la atmósfera debido a la actividad humana, ha afectado lo suficiente al ozono estratosférico como para generar un agujero en la capa de ozono de la región Antártica (realmente el problema es el hecho de que la presencia de estos compuestos no permitía la regeneración del agujero de manera natural, como explicamos en el apartado del vórtice).

1.3. Normativa

Alrededor de 1980 se descubrió que gran parte del ozono del polo sur de la Tierra, en la Antártida, había desaparecido, comúnmente conocido como el agujero en la capa de ozono. Anteriormente se creía que los valores que caían por debajo de lo normal en el polo sur de la Tierra se debían a fallos en el aparato de medición y que sus concentraciones reales no eran esas. Sin embargo cuando se verificó que el comportamiento era real, la comunidad científica comenzó a preguntarse el motivo de la caída.

Al investigar sobre este suceso se vinculó a la presencia de los *clorofluorocarbonos* (CFCs) especialmente los $\text{CFC} - 11$ y $\text{CFC} - 12$, también denominados como *freón 11* y *freón 12*. Esto no dejó más que otra clara evidencia de la repercusión de la actividad humana en la atmósfera.

A raíz de esto se empezaron a desarrollar e implantar políticas de regulación y control de los CFCs para detener el aumento del agujero en la capa de ozono, de los que destaca el **Protocolo de Montreal** (1987) aprobado en el *Convenio de Viena* (1985), en el que se toman medidas para la recuperación de la capa de ozono y además siendo uno de los tratados más exitosos de todos los tiempos, siendo firmado por 198 países. Las medidas más importantes fueron:

- 1.- El bloqueo en 1990 del consumo y producción de los clorofluorocarbonos 11, 12, 113, 114 y 115, a los niveles alcanzados en 1986.
- 2.- A partir de los niveles de 1986, se impone la reducción de un 20 %, de dichos CFCs, para el 1 de enero de 1994.
- 3.- Reducción adicional de un 30 %, hasta una reducción total del 50 % para el 31 de diciembre de 1999.

Los resultados de este protocolo han sido positivos en lo referente a los CFCs ya que se consiguió frenar su aumento de concentración en la atmósfera (ver Fig.4). Esto contribuyó de manera significativa a la lucha contra el cambio climático, ya que dentro de la familia de los CFCs hay muchas sustancias causantes del calentamiento atmosférico.

Posteriormente en 1992 se firmó el **Acuerdo de Copenhague** en el que se aprobaron las medidas necesarias para la eliminación total de la producción de los CFCs, mientras que en 1997 con la llegada del **Protocolo de Kioto** se pondrían las metas para que estas y otras medidas contra el cambio climático se llevaran a cabo.

La puesta en práctica del *Protocolo de Montreal* marcó un antes y un después en la evolución de la variación del ozono en la atmósfera, ya que ayudó a frenar la creación del agujero de la capa de ozono y a devolver los niveles de variación natural al ozono estratosférico. Sin la llegada de este protocolo, estaríamos ante la presencia de números quizás irreversibles en cuanto a concentración de CFCs en la atmósfera (ver Fig.5).

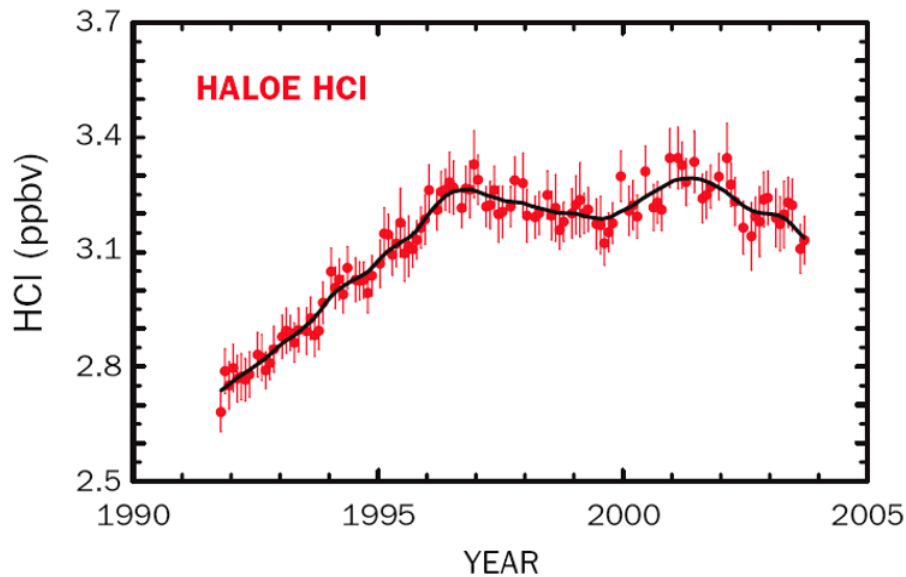


Figura 4: HALOE: medidas de los radicales de cloro en la estratosfera, a 55km. Fuente: James R. Russel (Hampton University)

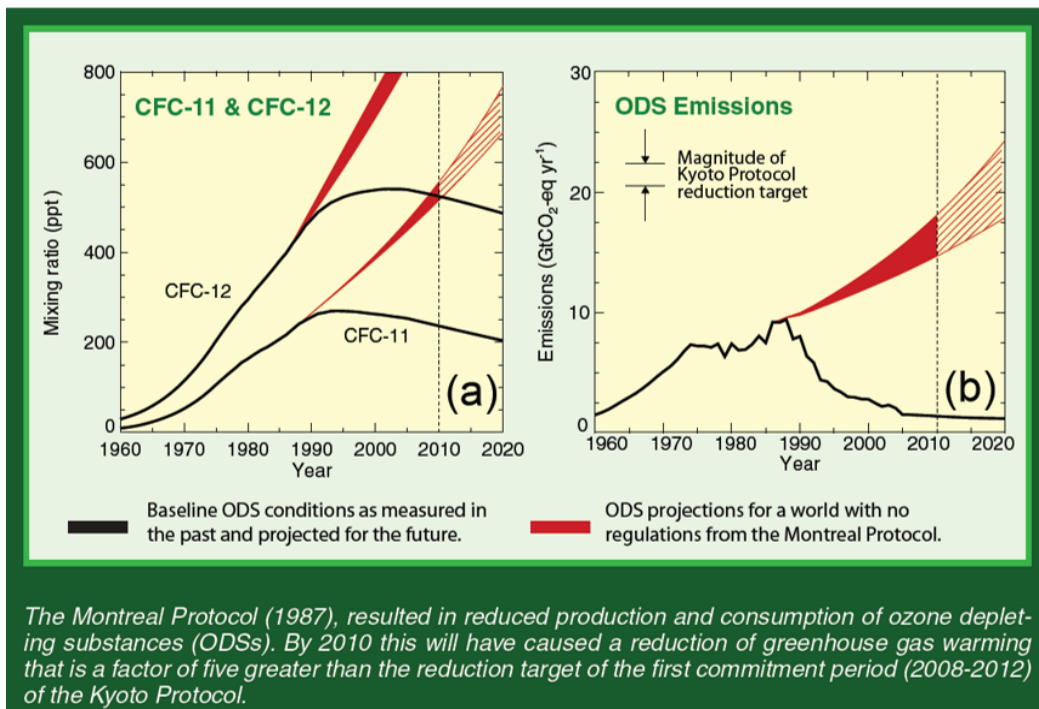


Figura 5: Fuente: WMO, November 2008, Greenhouse Gas Bulletin

Finalmente el acuerdo más reciente a nivel internacional es el *Acuerdo de Kigali* (2016) firmado en Ruanda por alrededor de 200 países incluyendo potencias como Estados Unidos, China y Europa. Este acuerdo, vinculado con el tratado de París de 2015, se centró en frenar el impacto de los *hidrofluorocarbonos* (HFCs), ya que se probó que estos sustitutos de los CFCs eran gases de efecto invernadero y contribuían al cambio climático. Por ello repercute directamente a la protección de la capa de ozono.

2. Objetivos

Esta introducción pretende dejar clara la importancia del ozono, así como establecer una buena base teórica de los puntos más importantes antes de profundizar en el estudio. En concreto el objetivo de este trabajo se centra en el análisis y estudio de la variabilidad de la columna de ozono, para así poder obtener resultados sobre su variación, evolución y consecuencias en la atmósfera, que se han dado a lo largo de un periodo de tiempo concreto.

Para ello en este trabajo utilizaremos los datos medidos por la NASA, que se encuentran disponibles para su uso en una de sus plataformas, concretamente en la web: "*NASA Ozone Watch: Images, data, and information for atmospheric ozone*" (<https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/SH.html>), es decir que este trabajo no tiene carga experimental de medición y toma de datos, se centra directamente en el análisis e interpretación de dichos datos.

En cuanto a la metodología que seguiremos para este análisis la podemos dividir en 3 puntos:

- Análisis temporal de la concentración del ozono durante un periodo de 16 años (concretamente, desde 2005 hasta 2020 incluidos).
- Análisis latitudinal de cada año de la concentración del ozono. Detallaremos cómo es la evolución del ozono en función de las diferentes regiones que especificaremos.
- Análisis de las periodicidades de las concentraciones del ozono de cada región escogida. Concretamente utilizaremos el análisis armónico para filtrar el ruido de las gráficas de las evoluciones temporales y encontrar representaciones más claras y consistentes. Finalmente se comparará el armónico del periodo de 11 años de nuestras series de datos con el ciclo solar para comprobar si existe relación entre ambos fenómenos.

Las regiones escogidas (que se especificarán más adelante) pertenecen al hemisferio norte de la Tierra.

Una vez obtenidos los resultados se procederá a su interpretación y comparación con otros fenómenos relevantes que puedan tener relación con el comportamiento obtenido, como los procesos de creación, destrucción o transporte de ozono estratosférico, al igual que ciertos resultados se extrapolarán al hemisferio sur si es posible.

3. Datos y metodología

A pesar de que este trabajo no tiene carga puramente experimental de toma de medidas, conviene dedicar una pequeña explicación al satélite y espectrómetro que toma los datos. De igual forma, hay que detallar las herramientas y la metodología que vamos a utilizar al igual que algunos fundamentos teóricos importantes en los que nos basamos para lograr entender el por qué del procedimiento que se sigue en cada punto.

Conviene remarcar que los instrumentos que se van a explicar no son los pioneros en este sistema de toma de medidas de gases traza, y es que tras el primer espectrómetro de tierra firme (el de Halley del cual hablamos en la introducción), se han utilizado varios espectrómetros de mapeo de ozono total (conocidos por el nombre de **TOMS** (*Total Ozone Mapping Spectrometer*)) por vía satélite, que son (por orden cronológico):

- **Nimbus-7**: desde octubre de 1978 hasta agosto de 1994. Primer satélite con TOMS.
- **Meteor-3**: desde agosto de 1991 hasta diciembre de 1994.
- **ADEOS TOMS**: desde julio de 1996 hasta junio de 1997.
- **Earth Probe TOMS**: desde julio de 1996 hasta ahora (continúa hoy en día junto con el **OMI**).

En 1995 no tenemos ninguna medida ya que hubo un parón de 18 meses (de 1994 a 1996) en el que no hubo satélites que midiesen el ozono.

En esta siguiente gráfica (ver Fig.6) podemos hacernos una idea de la evolución de las medidas con el cambio de estos satélites:

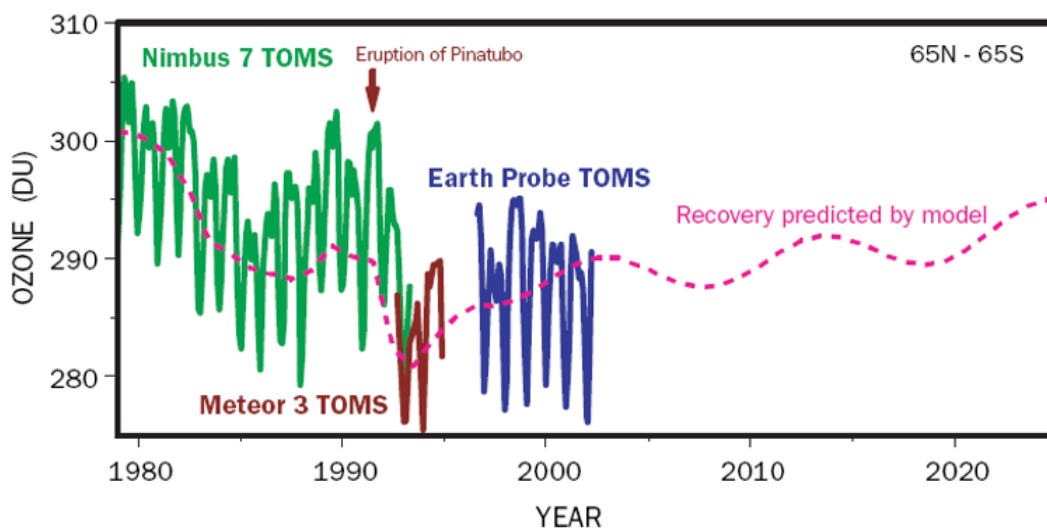


Figura 6: Evolución de la concentración del ozono medido por TOMS y sus previsiones (65°N-65°S). Fuente: **NASA GSFC**

Los TOMS obtienen mapas diarios de ozono total a través de la medida de la irradiancia solar directa y la media de la radiancia dispersada por la atmósfera de la Tierra en 6 bandas de longitud de onda seleccionadas del espectro ultravioleta (desde 312.5 nm a 380.0 nm). El ozono es calculado a partir de la correlación entre las radiancias medidas por el sensor y las radiancias calculadas de manera teórica a través de un modelo para las mismas condiciones. La precisión del instrumento tiene un índice de discrepancia del 2%.

Un relevo de estos espectrómetros tipo *TOMS* lo tenemos en el **OMI**, que es el responsable de los datos que hemos analizado en este trabajo.

3.1. Obtención de datos: el satélite AURA

Todas las series de datos que analizaremos se encuentran en la página citada anteriormente de *NASA Ozone Watch*, y las que se han seleccionado específicamente para este trabajo fueron tomadas por el satélite **Aura** (del latín, "brisa"). Este satélite sirve para obtener medidas de las concentraciones de ozono, aerosoles y gases de efecto invernadero y gases traza en general dispersos por la atmósfera.

El satélite se puso en órbita el 15 de Julio de 2004 (el análisis empieza a partir de 2005), y desde entonces orbita a 705 km sobre la Tierra siguiendo un ciclo de 16 días y 223 revoluciones por ciclo. Otro dato de interés es que en prácticamente cada archivo de datos figura una hora similar a 1:45 P.M., y esto se debe a que a dicha hora se da el **nodo ascendente**³ de su órbita (Ω).

Con la llegada del protocolo de Montreal el seguimiento de la respuesta del ozono a la eliminación de los químicos como los CFCs tomó una mayor importancia y con ello también la medición de la concentración de ozono. Desde entonces se pusieron en órbita satélites como el Aura para que no quedasen datos sin tomar de ningún día. De ahí que haya variedad de espectrómetros con sus correspondientes series de datos.

3.1.1. Espectrómetro OMI (Ozone Monitoring Instrument)

El satélite Aura cuenta con diversas herramientas cuyo objetivo es medir las concentraciones en la atmósfera por medio del análisis espectral de cada gas traza. Esta sofisticada instrumentación la forman el *Microwave Limb Sounder (MLS)*, el *High Resolution Dynamics Limb Sounder (HIRDLs)*, el *Tropospheric Emission Spectrometer (TES)* y el **Ozone Monitoring Instrument (OMI)**. Este último es el responsable de tomar las medidas de las serie de datos que utilizaremos.

El *OMI* es un espectrómetro de retrodispersión solar ultravioleta/visible (UV/VIS), que proporciona una cobertura casi global en un día con un espacio resolución de 13 km a 24 km. Se utiliza para medir gases traza como el O_3 , NO_2 , SO_2 , $HCHO$, BrO y $OCIO$. Es decir que entre otras funciones, monitorea la capa de ozono, tal y como hacía el espectrómetro *TOMS*.

Más concretamente en lo referente a la medición del ozono, la idea es el escaneo de imágenes de la absorción de la radiación dispersada en la atmósfera para cartografiarla. Es decir, que se pretende medir el espectro completo de absorción en el rango de longitud de onda ultravioleta visible cercano infrarrojo (UV/VIS/NIR) (ver tabla 1).

TABLE 1
SPECTRAL PERFORMANCE RANGE, SPECTRAL RESOLUTION, SAMPLING DISTANCES, AND DATA PRODUCTS

| Channel | Total range | Full performance range | Average Spectral resolution (FWHM) | Average Spectral sampling distance | Data products |
|---------|--------------|------------------------|------------------------------------|------------------------------------|--|
| UV-1 | 270 – 314 nm | 270 – 310 nm | 0.42 nm | 0.32 nm/pixel | O_3 profile, O_3 column (TOMS), Surface UV-B |
| UV-2 | 306 – 380 nm | 310 – 365 nm | 0.45 nm | 0.15 nm/pixel | O_3 profile, O_3 column (TOMS & DOAS), BrO, OCIO, SO_2 , HCHO, Aerosol, Surface UV-B, Surface Reflectance, cloud top pressure, cloud cover |
| VIS | 350 – 500 nm | 365 – 500 nm | 0.63 nm | 0.21 nm/pixel | NO_2 , Aerosol, OCIO, Surface UV-B, Surface Reflectance, cloud top pressure, cloud cover |

Tabla 1: Rango de resolución espectral de los gases traza. (Levelt, 2006)

Los espectrómetros UV/VIS detectan la irradiancia solar dispersa y absorbida por los componentes de la atmósfera terrestre, por tanto, para encontrar el rango de los gases traza es necesario medir el espectro de irradiancia de la Tierra y el Sol. Normalizando este último espectro solar, el espectro es obtenido con una reflectancia definida por:

³Los nodos de una órbita son los dos puntos pertenecientes a dicha órbita inclinada respecto a un plano de referencia, y que se hallan donde dicha órbita cruza al mencionado plano de referencia, al cual debe pertenecer el astro primario de la órbita a la que pertenecen los nodos. En concreto el **nodo ascendente** es el punto donde el objeto cruza el plano de referencia moviéndose desde el hemisferio sur al hemisferio norte celeste.

$$R = \frac{\pi I}{\mu_0 E}$$

de donde I es la radiancia de la Tierra, E la del Sol, y μ_0 el coseno del ángulo solar zenital.

Para la calibración del instrumento, hay una fuente de luz blanca LED y un difusor de calibración solar de múltiples superficies. Esta calibración es importante por la continua variación de la atmósfera y el satélite en cuanto a temperatura, órbita, etc. Luego un despolarizador elimina la polarización de la radiación dispersada. Finalmente para detectar la radiancia e irradiancia el *OMI* utiliza un **detector CCD**⁴ de 2-D con 2 canales: Uno para detectar la información espectral y otro para obtener la información espacial. Y así es como, muy resumidamente, se toman las medidas diariamente (de Graaf, 2016). Si bien es cierto que en la página de *NASA Ozone Watch* se encuentran datos tomados por otros sensores, tales como el *Nimbus-7*, el *Meteor-3* o el *Suomi NPP OMPS* entre otros, el motivo por el que solo se han usado los datos del *OMI* es porque es el satélite con mayor número de años contiguos medidos (de 2005 a 2020 incluidos, y en adelante) y a su vez el que menos archivos ha perdido (hay tan solo 3 años de los 16 que hemos considerado en los que falta algún archivo de ozono diario, y los que se echa en falta no superan el total de los 13 días como máximo).

En esta página también hay más información acerca del ozono, por ejemplo podemos encontrar el mapeado del ozono en la Tierra a lo largo de varios años (ver Fig.7), así como algunas gráficas de la progresión de los datos mensual y anual. A todo esto se le suma un apartado (*Ozone Maps*) en el que explica los conceptos más importantes para entender estos datos y los archivos multimedia de las evoluciones de los datos en la Tierra, que son accesibles para todo el mundo.

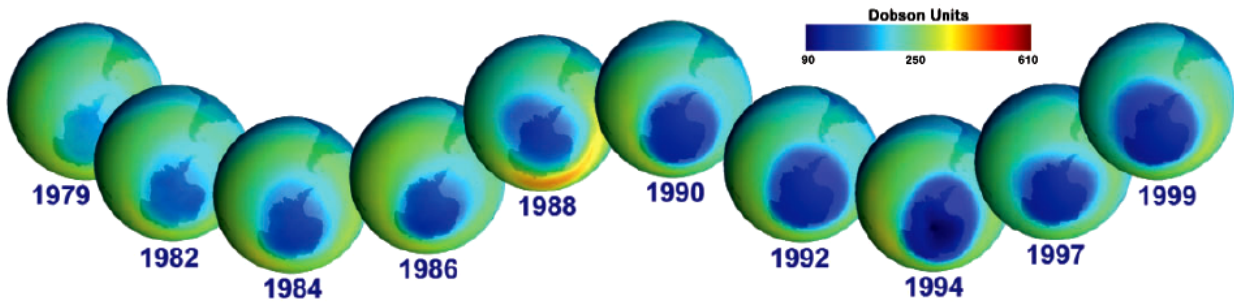


Figura 7: Mapeado de la concentración de ozono de los años 1979-1999 de la región Antártica. Fuente: **Barbara Summery (SSAI)**

3.1.2. Formato de las series de datos

Las series de datos medidas por el *OMI* se almacenan en carpetas divididas por años. En cada carpeta encontraremos los datos del ozono diarios recogidos en archivos ".txt". La figura 8 muestra un ejemplo de uno de estos ficheros cuya estructura se muestra a continuación.

Estos archivos se leen de la siguiente manera: Las 3 primeras líneas de cada archivo contienen la fecha de adquisición de los datos, el satélite que lo mide, qué gas traza mide y la hora a la que se da el nodo ascendente en el hemisferio norte (anteriormente detallado). También nos indica la resolución espacial a la que se tomaron los datos, que es la distancia que puede cubrir el pixel medio de la imagen. Después nos explica que las longitudes empiezan desde la 179.5° W (Oeste) y hacen un barrido de 360° de grado en grado hasta el 179.5° E (Este). Por último especifica que la latitud se mide desde el 89.5° S (Polo Sur) de grado en grado recorriendo 180° hasta el 89.5° N (Polo Norte).

En las siguientes líneas se encuentran los valores del ozono expresados en Dobsons, en los que, para cada latitud (empezando por la -89.5°, que es la 89.5° S) hay 360 valores del ozono correspondientes a cada longitud empezando desde la 179.5° W, como especificamos antes. Para saber qué valor corresponde a qué longitud hay

⁴Un **detector CCD** (Charge Coupled Device/Dispositivo de Carga Acoplada) es un fotodetector con un gran número de diminutas células fotoeléctricas (sensibles a la luz) y expresadas en píxeles que sirven para registrar y procesar imágenes

3.2. Análisis de los datos

A continuación vamos a explicar la metodología que seguiremos para el análisis de los datos, empezando por determinar la región de la Tierra escogida, seguida de cómo obtener las gráficas de evolución espacial y temporal hasta explicar los fundamentos del análisis armónico o de Fourier que usaremos en la última parte.

3.2.1. Regiones de interés

Previamente en los objetivos se dijo que las regiones de interés pertenecían al hemisferio norte. Esto supone que abarquemos 90° de latitud (desde el Ecuador al Polo Norte). Para cada latitud tenemos que medir el ozono en cada uno de los 360° de longitud. Es decir que en total vamos a medir 32400 puntos, por 16 años, en total serán unos 518400 aproximadamente.

Para organizar esto mejor y no representar tantos datos (tendríamos demasiadas gráficas), hemos dividido los datos por franjas de 10° de latitud. En total tendremos 9 franjas:

- 1-Franja Ecuatorial ($0.5^\circ - 9.5^\circ\text{N}$)
- 2-Franja Centroamericana ($10.5^\circ - 19.5^\circ\text{N}$)
- 3-Franja Argelina ($20.5^\circ - 29.5^\circ\text{N}$)
- 4-Franja Norteafricana ($30.5^\circ - 39.5^\circ\text{N}$)
- 5-Franja Española-Francesa ($40.5^\circ - 49.5^\circ\text{N}$)
- 6-Franja Germana-Noruega ($50.5^\circ - 59.5^\circ\text{N}$)
- 7-Franja Islandesa ($60.5^\circ - 69.5^\circ\text{N}$)
- 8-Franja Groenlandesa ($70.5^\circ - 79.5^\circ\text{N}$)
- 9-Franja Polar Ártica ($80.5^\circ - 89.5^\circ\text{N}$)

El procedimiento es que tengamos una serie de valores de ozono en función del tiempo (cada valor corresponderá a una fecha empezando desde el 01/01/2005). Para obtener una serie de valores primero haremos el promedio de los 360 valores de ozono para cada latitud, y después, en cada franja, obtendremos el valor medio de los 10 valores de cada latitud. Esto nos dará 9 series de valores en función del tiempo que serán las que representaremos y estudiaremos.

Una vez hecho esto correctamente, nos dan 9 columnas correspondientes a las 9 franjas con 5819 valores cada una. Concretamente las fechas que abarcan son: del 01/01/2005 hasta el 06/12/2020. La razón es que en algunos archivos no tenemos algunas de las fechas de algunos meses (faltan algunos datos de algunos días en los archivos de los años 2006, 2008, 2016 y 2017). Esto ocurre porque en la página donde tenemos los datos directamente no aparecen, ya sea porque el *OMI* no tomó bien los datos de esos días o no se almacenaron correctamente, o quizás por labores de mantenimiento del sensor. En total unos 25 días de datos que, para haber abarcado desde 2005 hasta 2020, lo consideramos un error es bastante aceptable en cuanto a pérdida de datos (y de hecho como ya explicamos, es una de las razones por las que escogimos los datos del *OMI*, en el resto de años faltaban más datos por archivo anual).

Las herramientas que usaremos para hacer esto se encuentran en el apartado de **Software complementario**.

3.2.2. Análisis temporal de las concentraciones de ozono

Siguiendo la metodología explicada en los objetivos, lo primero que vamos a hacer es el análisis temporal de las concentraciones de ozono. Para ello representaremos las gráficas de la evolución de los promedios de las $[O_3]$

de cada franja y finalmente una gráfica con las evoluciones de todas las franjas para apreciar bien la diferencia de concentración y de variación de cada una mirando los picos.

A partir de aquí podemos ver los picos máximos y mínimos del ozono por franjas, observar las diferencias en las concentraciones de ozono respectivas al Ecuador y al Polo Norte e interpretar algunos resultados ayudándonos de la teoría.

Y es que los resultados que podemos esperar a priori en este apartado son:

- Aumento de la variación entre máximos y mínimos a medida que aumenta la latitud hacia el norte, siendo entonces los valores de la franja Ecuatorial los que presentan una menor variabilidad y los valores de la franja Polar Ártica los que presentan una mayor variabilidad, también alcanzando los máximos de concentración más altos (ver Fig.9).
- Los máximos de $[O_3]$ en el hemisferio norte en latitudes bajas se esperan para finales de la primavera, ya que los procesos de producción de O_3 por medio de reacciones fotoquímicas en la estratosfera aumentan su productividad al máximo cuando llega el solsticio de verano a los trópicos (zona ecuatorial). Siguiendo estas pautas, los mínimos se esperan para invierno.
- Por otro lado, los picos de concentración tanto en latitudes medias (en centroeuropa por ejemplo) como en latitudes polares dependen de cómo sea el transporte meridional y descendente (o ascendente hacia los polos, según se quiera ver) del O_3 desde el ecuador por corrientes de chorro, al igual que dependerá también del equilibrio entre la producción y la pérdida de ozono, y su divergencia de flujo. Todos estos factores determinarán su pico de concentración máxima en cualquier punto de la atmósfera. Aunque por lo que podemos ver en la figura 9, la variación de la concentración del ozono depende en gran medida de la latitud en la que estemos midiendo.
- En latitudes medias y altas, los máximos se esperan con la llegada de la primavera, y los mínimos se esperan para principios de otoño.

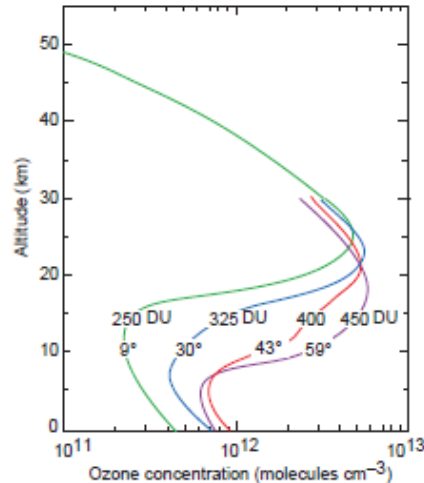


Figura 9: Distribuciones verticales de las concentraciones de ozono medidas en diferentes latitudes (en grados). Nótese el incremento de la columna de ozono total (en UD) con la latitud. Fuente: **Wallace and Hobbs (2006)**

En general esperamos un comportamiento más o menos sinusoidal con cierta periodicidad anual. Recordemos que estamos midiendo un periodo de 16 años en 9 franjas de latitudes diferentes por lo que podemos esperar un comportamiento más o menos periódico.

Para trabajar más rápidamente utilizaremos hojas de cálculo de Excel. Cada valor de las columnas corresponde al promedio de los 10 valores de cada grado de la franja, que a su vez cada valor de estos es el promedio de sus 360 valores longitudinales correspondientes a cada latitud. Así tenemos valores diarios de cada franja de latitudes desde el enero de 2005 hasta diciembre de 2020. En total 5819 valores por columna. Con los datos ya importados y promediados separados en series por franjas (como indicamos en el apartado anterior), obtendremos un archivo de la siguiente manera (ver la Tabla 2):

| TIEMPO(DÍAS) | 1º (0.5º) | 2º (10.5º) | 3º (20.5º) | 4º (30.5º) | 5º (40.5º) | 6º (50.5º) | 7º (60.5º) | 8º (70.5º) | 9º (80.5) |
|--------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 01-ene-05 | 244.791975 | 251.883056 | 267.699167 | 295.106389 | 321.220556 | 347.291389 | 355.65032 | 331.858333 | |
| 02-ene-05 | 244.527469 | 251.2175 | 267.308611 | 295.092222 | 319.238333 | 340.330608 | 369.128646 | 328.291667 | |
| 03-ene-05 | 244.314043 | 250.59 | 266.642222 | 296.071111 | 321.295278 | 349.14708 | 370.867885 | 326.841667 | |
| 04-ene-05 | 243.480401 | 249.465833 | 265.3775 | 299.4175 | 321.14 | 356.381786 | 371.072675 | 330.091667 | |
| 05-ene-05 | 243.233879 | 249.266111 | 263.651944 | 302.5325 | 320.133611 | 349.660023 | 376.115486 | 326.352778 | |
| 06-ene-05 | 242.377315 | 249.120556 | 262.823333 | 302.879722 | 323.9125 | 350.38374 | 374.429984 | 331.877778 | |
| 07-ene-05 | 242.600617 | 249.155278 | 263.016667 | 302.463611 | 332.684167 | 360.894722 | 373.607945 | 338.313889 | |
| 08-ene-05 | 242.195875 | 248.716667 | 264.993889 | 301.8725 | 333.990556 | 354.8675 | 365.571932 | 339.247222 | |
| 09-ene-05 | 241.702024 | 249.098056 | 266.091944 | 300.759167 | 334.380278 | 354.635866 | 371.650498 | 344.658333 | |
| 10-ene-05 | 241.767747 | 249.273257 | 265.492222 | 301.715833 | 338.732778 | 348.203317 | 369.886034 | 347.019444 | |
| 11-ene-05 | 241.714198 | 248.968889 | 263.588333 | 304.333333 | 343.680833 | 347.658888 | 364.71599 | 348.961111 | |
| 12-ene-05 | 241.974537 | 248.699722 | 263.708333 | 305.878333 | 346.575556 | 351.647778 | 366.12492 | 350.825 | |
| 13-ene-05 | 242.629938 | 249.162222 | 263.838889 | 306.474167 | 348.398611 | 352.716389 | 361.272063 | 355.813889 | |
| 14-ene-05 | 242.296142 | 249.440278 | 265.374444 | 311.964722 | 352.256111 | 358.467778 | 349.469615 | 357.138889 | |
| 15-ene-05 | 241.640432 | 248.345 | 267.274167 | 317.402778 | 353.9275 | 356.207778 | 362.709512 | 357.622222 | |
| 16-ene-05 | 241.719907 | 248.007778 | 269.484167 | 316.874722 | 353.303889 | 360.105833 | 372.213114 | 354.936111 | |
| 17-ene-05 | 241.558642 | 249.796389 | 267.805 | 313.943889 | 352.009722 | 371.063333 | 374.424923 | 358.141667 | |
| 18-ene-05 | 242.061883 | 251.174722 | 266.591111 | 312.314167 | 351.599444 | 373.849167 | 369.014009 | 366.225 | |
| 19-ene-05 | 242.005547 | 251.146944 | 267.12 | 313.324167 | 349.212778 | 376.493611 | 366.413268 | 356.944444 | |
| 20-ene-05 | 242.80933 | 248.555484 | 268.736601 | 318.304564 | 347.057458 | | 373.011856 | 357.638095 | |
| 21-ene-05 | 244.537771 | 253.691821 | 271.74083 | 312.625795 | 339.328415 | 362.316543 | 363.127814 | 346.337838 | |
| 22-ene-05 | 244.565741 | 251.576389 | 268.887778 | 310.703611 | 356.469722 | 363.234444 | 361.452754 | 359.205556 | |
| 23-ene-05 | 244.447377 | 251.476111 | 268.481944 | 312.228056 | 362.214444 | 360.672778 | 363.795735 | 363.461111 | |
| 24-ene-05 | 244.53642 | 252.367778 | 269.146389 | 313.406667 | 362.039722 | 370.246667 | 356.054408 | 366.911111 | |
| 25-ene-05 | 244.33071 | 252.120833 | 270.197222 | 317.281111 | 365.620556 | 372.874167 | 349.546338 | 376.344444 | |
| 26-ene-05 | 244.428549 | 253.331944 | 271.4375 | 316.291389 | 367.478056 | 369.193056 | 348.744477 | 372.294444 | |
| 27-ene-05 | 243.884414 | 252.898056 | 271.214167 | 314.893889 | 363.664444 | 368.145278 | 358.988257 | 370.413889 | |
| 28-ene-05 | 244.417284 | 254.092222 | 270.322222 | 318.055833 | 361.881667 | 353.030556 | 359.148575 | 363.888889 | |
| 29-ene-05 | 244.093364 | 253.8 | 268.923056 | 318.376111 | 364.378611 | 355.094722 | 360.675274 | 364.044444 | |
| 30-ene-05 | 243.943056 | 254.186389 | 268.051111 | 319.986603 | 365.009167 | 355.841389 | 361.839372 | 365.052778 | |
| 31-ene-05 | 243.649846 | 253.372778 | 268.983056 | 320.285556 | 365.396667 | 356.220278 | 366.989011 | 365.647222 | |
| 01-feb-05 | 243.783025 | 253.614722 | 268.309722 | 320.654167 | 364.178333 | 360.8975 | 363.77031 | 368.894444 | |
| 02-feb-05 | 243.609259 | 252.364167 | 267.210278 | 318.146667 | 362.813333 | 361.431667 | 366.772975 | 368.805556 | |
| 03-feb-05 | 243.745525 | 251.8525 | 266.534444 | 316.540833 | 360.273889 | 364.635833 | 375.563267 | 368.269444 | |
| 04-feb-05 | 243.53071 | 251.281111 | 266.562778 | 316.851944 | 357.198056 | 367.948056 | 373.450696 | 367.766667 | |
| 05-feb-05 | 243.74784 | 252.512222 | 266.872778 | 319.697778 | 359.416667 | 360.865 | 374.164553 | 370.186111 | |
| 06-feb-05 | 244.277315 | 253.0175 | 268.402222 | 316.4625 | 359.443333 | 358.898889 | 377.171429 | 367.627778 | |
| 07-feb-05 | 245.25843 | 253.220556 | 268.003056 | 314.705 | 359.601111 | 367.340278 | 385.2629 | 367.555556 | |
| 08-feb-05 | 245.155707 | 252.941758 | 263.61286 | 314.213104 | 364.744785 | 374.208487 | 394.683107 | 374.929878 | |
| 09-feb-05 | 245.667956 | 254.808889 | 268.481944 | 317.405556 | 361.923889 | 369.631389 | 386.403282 | 376.975 | |
| 10-feb-05 | 245.965432 | 255.930278 | 268.806667 | 319.997222 | 361.567222 | 365.138056 | 382.798072 | 385.588027 | |
| 11-feb-05 | 246.800463 | 255.536111 | 269.496389 | 322.379444 | 358.053333 | 364.687778 | 379.966726 | 365.021759 | |
| 12-feb-05 | 246.385031 | 255.512778 | 271.590833 | 321.751111 | 357.877778 | 361.9025 | 374.364774 | 367.111008 | |
| 13-feb-05 | 246.352469 | 255.980942 | 271.854444 | 317.232778 | 360.5975 | 375.821944 | 371.635278 | 381.436667 | |
| 14-feb-05 | 246.265278 | 256.432222 | 270.8575 | 318.02 | 360.493889 | 372.5825 | 372.886389 | 366.997649 | |
| 15-feb-05 | 246.868982 | 256.308056 | 271.301111 | 319.745278 | 363.0675 | 369.130833 | 370.794444 | 367.737377 | |
| 16-feb-05 | 246.819144 | 256.198611 | 272.273333 | 321.089167 | 366.437222 | 378.299167 | 370.216667 | 367.982248 | |
| 17-feb-05 | 246.418827 | 256.468889 | 272.691389 | 318.591111 | 369.121111 | 377.319444 | 378.048056 | 373.360706 | |
| 18-feb-05 | 245.991049 | 256.461111 | 273.376944 | 315.95 | 369.141944 | 379.158889 | 372.117778 | 369.873611 | |
| 19-feb-05 | 245.573457 | 257.090278 | 273.465833 | 317.3825 | 370.926944 | 380.910833 | 365.536111 | 357.860469 | |
| 20-feb-05 | 245.893478 | 257.190556 | 273.14 | 319.028056 | 372.544722 | 378.693889 | 357.216389 | 355.305913 | |
| 21-feb-05 | 247.452047 | 254.528508 | 264.344733 | 317.404134 | 384.006942 | | 343.260009 | 348.770348 | |
| 22-feb-05 | 243.335789 | 261.396229 | 281.437014 | 323.227317 | 351.703295 | 349.515945 | 347.162394 | 369.959832 | |
| 23-feb-05 | 246.814222 | 256.7925 | 273.115 | 317.905833 | 375.034722 | 376.861667 | 348.702222 | 371.287963 | |
| 24-feb-05 | 245.758488 | 255.875278 | 273.398333 | 318.67 | 374.636389 | 377.545278 | 357.3175 | 382.911029 | |
| 25-feb-05 | 245.486728 | 254.934444 | 273.261389 | 318.511667 | 368.915 | 374.694167 | 370.545833 | 377.722944 | |
| 26-feb-05 | 245.426389 | 254.418611 | 272.923056 | 318.233333 | 365.839167 | 368.208611 | 381.307778 | 392.548496 | |
| 27-feb-05 | 246.355247 | 254.474167 | 271.808611 | 319.833889 | 367.658889 | 366.881389 | 378.8975 | 412.089508 | |
| 28-feb-05 | 245.961111 | 254.775 | 269.941667 | 323.345833 | 369.445556 | 372.307778 | 381.044444 | 395.910638 | |
| 01-mar-05 | 246.373611 | 255.878333 | 270.320833 | 324.206667 | 371.62 | 378.091667 | 378.119444 | 388.869097 | |
| 02-mar-05 | 246.640741 | 256.271944 | 270.184722 | 325.513889 | 376.591111 | 378.4475 | 376.127778 | 387.617976 | |
| 03-mar-05 | 246.707407 | 256.205556 | 271.235833 | 330.006111 | 385.071667 | 375.783056 | 367.105833 | 385.34604 | |
| 04-mar-05 | 246.543982 | 256.249722 | 272.039444 | 333.547778 | 387.81 | 380.561111 | 364.425556 | 384.065833 | |
| 05-mar-05 | 246.257562 | 256.4925 | 273.074167 | 329.4625 | 381.859444 | 392.299722 | 369.491111 | 364.621809 | |
| 06-mar-05 | 245.77963 | 257.258056 | 273.108333 | 325.578611 | 383.879444 | 398.596389 | 369.848889 | 359.102778 | |
| 07-mar-05 | 246.746914 | 257.148333 | 273.447222 | 324.368056 | 386.049444 | 401.035833 | 367.660278 | 358.539444 | |
| 08-mar-05 | 247.446142 | 258.517222 | 274.128056 | 324.788056 | 385.095556 | 395.531667 | 369.409722 | 360.123056 | |
| 09-mar-05 | 247.300309 | 258.716667 | 274.994722 | 324.605833 | 382.801389 | 381.788333 | 373.546944 | 363.321111 | 434.476191 |
| 10-mar-05 | 248.24213 | 259.121944 | 276.516944 | 323.135556 | 384.024722 | 379.673611 | 372.320833 | 374.083889 | 366.70607 |
| 11-mar-05 | 248.351235 | 259.429444 | 278.101389 | 324.610556 | 377.515833 | 381.183333 | 374.138333 | 384.736944 | 388.175 |
| 12-mar-05 | 248.170062 | 259.903889 | 279.391667 | 322.815 | 369.484444 | 382.821389 | 387.107222 | 398.985 | 410.174133 |
| 13-mar-05 | 247.532716 | 259.823056 | 278.579444 | 320.724167 | 361.5075 | 379.126389 | 400.005833 | 417.142778 | 433.961111 |
| 14-mar-05 | 247.165895 | 259.55 | 279.613333 | 319.130833 | 358.141944 | 377.486944 | 406.933889 | 426.786667 | 471.513889 |
| 15-mar-05 | 247.723457 | 260.130833 | 279.623889 | 316.081389 | 362.004444 | 384.856111 | 412.118333 | 426.451111 | 474.858765 |

Tabla 2: Promedios del ozono separados por franjas.

Lógicamente esta tabla muestra únicamente los datos de los 3 primeros meses de 2005, pero se prolonga hasta diciembre de 2020.

También conviene recordar, como explicamos en el anterior apartado, que faltan aproximadamente 25 filas de valores correspondientes a 25 días que de los cuales no se tenían datos en la página . Como era un trabajo sumamente tedioso el de localizar los archivos de los días que faltaban en 16 años, se ha optado por acortar la tabla, eliminando los últimos días de diciembre de 2020. Lo que explica porqué nuestra tabla de valores empieza el 01/01/2020 y termina el 06/12/2020.

A continuación fijémonos en la última franja (Polar Ártica (80.5° - 89.5° N)), que se ve claramente como hay espacios en blanco hasta marzo. Concretamente que haya un espacio en lugar de un valor significa que previamente el espectrómetro midió un "0", pero por comodidad para hacer los promedios de los datos y para el correcto funcionamiento de nuestros programas, todos los ceros se han sustituido por espacios.

El motivo real por el que no hay datos en dicha columna es porque el espectrómetro OMI no midió el ozono esos días, pero no por error ni por fallo en esos meses, sino que ese comportamiento se repite cada año durante los meses de invierno (cuando se da el invierno polar, el cual ya mencionamos previamente cuando hablamos de la formación del vórtice polar y las nubes polares estratosféricas).

Esto se debe a que durante esos meses, a esas latitudes se da el fenómeno de la **noche polar** y es que en invierno las noches a latitudes muy cercanas a los polos, se prolongan más de 24 horas.

Si recordamos, el OMI es un espectrómetro que utiliza la irradiancia solar dispersa en la atmósfera, pero como en esta época a esas latitudes no llega el Sol, pues es imposible que se tomen datos durante todos estos meses de noche polar.

Veremos como este fenómeno acompaña también a la siguiente tabla de datos (ver tabla 3) y a nuestras representaciones gráficas, aunque como hemos visto en este caso este fenómeno es completamente natural y tiene explicación física.

Por otro lado en la franja 6 (Germana-Noruega (50.5° - 59.5° N)) faltan también valores en algunos días, sin embargo en este caso sí que lo hemos relacionado a un posible fallo en el espectrómetro a la hora de toma de medidas del ozono correspondientes a dichas latitudes, ya que si vemos las series de datos una franja por encima o una por debajo, ambas están completas.

Pese a esto, al tener un número de datos tan grande consideramos que no perjudicaba gravemente en la representación de los resultados como para que resulte alarmante, ya que falta un valor cada varias decenas.

3.2.3. Análisis latitudinal de las concentraciones de ozono

En el siguiente paso vamos a representar gráficamente los resultados en función de las latitudes. Las gráficas que buscamos pretendemos que sigan el comportamiento que dicta la Figura 9, es decir que a medida que aumenta la latitud, aumenten las concentraciones de ozono (de manera general, luego veremos que no es exactamente así).

A priori el resultado que podemos esperar es que los valores máximos de las gráficas se den en torno a primavera y los mínimos en otoño, como explicamos anteriormente.

Más concretamente, lo que vamos a representar aquí es una serie de promedios de los valores mensuales del ozono de cada franja por años, es decir que de los 365 valores (aproximadamente) que hay en cada año, obtendremos el valor medio de los valores de cada franja por mes: en enero promediamos sus 31 valores, en febrero sus 28, en marzo sus 31, etc.

Este procedimiento lo seguiremos con cada año, desde el 2005 hasta el 2020 incluidos. En nuestro caso hemos utilizado el programa Excel para calcular los promedios y ordenar los datos de la siguiente manera:

| LATITUD | ENERO | FEBRERO | MARZO | ABRIL | MAYO | JUNIO | JULIO | AGOSTO | SEPTIEMBRE | OCTUBRE | NOVIEMBRE | DICIEMBRE |
|---------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 0.5 | 249.895161 | 256.928621 | 259.003871 | 256.367333 | 259.704516 | 266.684 | 269.908387 | 269.573226 | 268.928667 | 261.741935 | 252.123667 | 249.783226 |
| 10.5 | 259.488387 | 267.556897 | 274.234516 | 274.494 | 274.657742 | 275.449333 | 273.117419 | 269.785806 | 267.076667 | 260.832581 | 252.567 | 244.096774 |
| 20.5 | 277.945806 | 287.74069 | 296.2 | 295.427333 | 287.15129 | 280.570333 | 276.835161 | 271.480968 | 265.976 | 264.662258 | 261.059333 | 251.713226 |
| 30.5 | 312.384839 | 323.827586 | 332.04129 | 318.556 | 304.468387 | 293.046333 | 286.963548 | 280.125806 | 271.193667 | 272.493548 | 286.482333 | 289.33 |
| 40.5 | 363.336129 | 364.313793 | 367.231613 | 348.31 | 333.673548 | 315.347667 | 304.174516 | 291.289677 | 286.562667 | 290.297419 | 315.334 | 338.475484 |
| 50.5 | 398.236774 | 389.264828 | 377.989032 | 366.466667 | 350.333548 | 328.777333 | 315.026452 | 305.662581 | 304.835 | 311.276452 | 332.417 | 357.952581 |
| 60.5 | 381.453871 | 365.834828 | 363.096774 | 365.846 | 343.244839 | 320.010333 | 303.592903 | 298.802258 | 303.784 | 315.478387 | 350.930667 | 378.210968 |
| 70.5 | 366.069677 | 323.897241 | 331.204194 | 362.162 | 338.73129 | 309.227333 | 291.125161 | 285.491613 | 292.398333 | 302.359032 | 323.569 | 351.256129 |
| 80.5 | | 254.126 | 281.92871 | 352.259667 | 336.570968 | 290.100333 | 268.534194 | 269.654194 | 271.275 | | | |

Tabla 3: Ejemplo de tabla de Excel para la representación de los datos del ozono en función de sus latitudes correspondiente al año 2020.

Evidentemente las franjas se indican únicamente con el 1º valor de latitud correspondiente a la franja, y lo que representaremos son las curvas de los 12 meses de cada año en función de las latitudes de las franjas.

Por otro lado (y como dijimos en el caso anterior), volvemos a tener espacios en blanco en algunos meses correspondientes a meses de otoño-invierno para algunos valores de la última franja (la Polar Ártica a 80-5º-89.5º). El motivo vuelve a ser la *noche polar* del Ártico, aunque la razón por la que se da este fenómeno también en los meses de otoño lo podremos ver cuando expongamos las gráficas en los resultados.

Posteriormente se hará también una representación tridimensional de todos los resultados juntos para tener otro punto de vista de los resultados y tener una buena representación del transporte del ozono estratosférico.

3.3. Análisis de las periodicidades del ozono

En los pasos anteriores comprobaremos que existe una periodicidad en la evolución de las concentraciones del ozono. Al tener los valores diarios de 16 años, un análisis muy importante de los mismos debe ser el de los periodos, haciendo uso para ello de la Transformada de Fourier.

Sin ir más lejos, el análisis armónico está incluido en el nombre de este trabajo y es que dar cuenta de las periodicidades nos permitirá encontrar características periódicas relevantes, comparar los periodos entre franjas, o contrastarlos con otros periodos típicos de otros fenómenos como el **ciclo solar**. Las conclusiones que se pueden sacar a partir de este análisis ayudan a entender el comportamiento del ozono en la atmósfera e incluso pueden ayudar a predecir su comportamiento futuro.

3.3.1. La transformada de Fourier

La hipótesis de la que se parte siempre a la hora de hablar de Fourier es que cualquier función se puede descomponer en una suma finita de senos y cosenos en la que además se puede determinar, mediante la energía del espectro, las frecuencias fundamentales de la serie. En el caso de que esa función sea periódica podremos descomponerla en suma de senos y cosenos, lo que se conoce como **series de Fourier**:

$$f(x) \sim \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos(kx) + b_k \sen(kx)) \quad (12)$$

indicando con el símbolo " \sim " que a cada función $f(x)$ le asociamos los números a_0, a_k, b_k con $k \in \mathbb{N}$, ya que la serie puede o no converger a $f(x)$.

La Transformada de Fourier no es más que una generalización de esta idea para cualquier tipo de función, periódica o no, ya que permite que una función tome valores en toda la recta real. En este caso el sumatorio se cambia por una integral. Entonces para todo $x \in \mathbb{R}$ se define:

$$F\{f(x)\} \equiv F\{f\} \equiv F(k) := \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-ikx} dx \quad (13)$$

y la transformada inversa se define como:

$$F^{-1}\{F(k)\} \equiv F^{-1}\{F\} \equiv f(x) := \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(k) e^{ikx} dk \quad (14)$$

Si bien las variables x y k son reales, la presencia de las exponenciales imaginarias hace que en general, aún cuando la función $f(x)$ sea real, su transformada de Fourier tenga una parte real y una parte imaginaria (Gadella-Nieto, 2000).

Lo que crea la Transformada de Fourier es, en pocas palabras, una representación de la serie temporal de los datos en el dominio espectral o de las frecuencias (12). De hecho, si queremos volver al dominio del tiempo, usaremos la transformada inversa (13).

Pero realmente, en muchos casos de la vida real como es el de este trabajo, no vamos a aplicar la transformada de Fourier a una función, sino a nuestras series de datos. Es decir que realmente estaremos usando variables discretas. Si se dispone de una variable discreta A que toman N valores equiespaciados en el tiempo los cuales conforman una serie temporal, dicha variable variable puede ser representada mediante (Stull, 1988):

$$A(k) = \sum_{n=0}^{N-1} F_A(n) \cdot e^{\frac{i2\pi nk}{N}} \quad (15)$$

donde se ha utilizado la expresión de Euler: $e^{ix} = \cos(x) + i \cdot \sen(x)$. El factor $F_A(n)$ es la Transformada de Fourier para la frecuencia n , y existen N frecuencias correspondientes a los armónicos de la serie. $F_A(n)$ es un número complejo en el cual su parte real representa la amplitud de la onda cosenoidal y la parte imaginaria, la sinusoidal. La dependencia de $F_A(n)$ con la frecuencia es porque las ondas que componen la serie original completa deben ser multiplicadas por diferentes factores para reconstruirla.

Realmente para nuestra serie de datos podemos expresar:

$$F_A(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} A(k) \cdot \cos\left(\frac{2\pi nk}{N}\right) - \frac{i}{N} \sum_{k=0}^{N-1} A(k) \cdot \sin\left(\frac{2\pi nk}{N}\right) \quad (16)$$

Si nos fijamos en la expresión (15), para $n = 0$ (frecuencia nula), la T.F. toma el valor medio de la serie temporal de datos. Para $n = 1$ tendremos a la onda que representa la frecuencia fundamental, que es la que corresponderá con la forma "más general" de la onda. Las frecuencias más altas corresponden a los armónicos de la frecuencia principal.

En el caso de nuestros datos, que son datos reales tomados por un espectrómetro real, encontraremos muchos armónicos correspondientes a frecuencias muy pequeñas que corresponderán al "ruido" de la señal. En principio los armónicos más interesantes son los que conforman la frecuencia principal y por tanto, serán en los que nos fijemos.

3.3.2. Energía espectral

Una vez hayamos calculado los coeficientes de los armónicos de la Transformada, se comienza a trabajar en el dominio de las frecuencias, por ello es fundamental determinar cuál es la frecuencia más importante respecto a la reconstrucción de la serie temporal original. Dicha información se obtiene por el módulo de la Transformada de Fourier. Así definimos como energía o densidad espectral como:

$$E_A(n) = 2 \cdot |F_A(n)|^2 = 2 \cdot (|F_{Real}(n)|)^2 + (|F_{Imag}(n)|)^2 \quad (17)$$

siendo válida esta expresión para una frecuencia n .

La representación en el dominio de la frecuencia dará lugar a picos pronunciados en las frecuencias dominantes y de esta manera podrá determinarse cuál es el comportamiento periódico fundamental al que se ajusta la serie temporal de datos.

3.3.3. El ciclo solar

Es interesante preguntarse por el ciclo solar y su relación con la atmósfera y el ozono, dados los procesos de creación vistos previamente. Y es que es bastante intuitivo que se nos venga a la cabeza la posible relación entre el ciclo solar y el periodo del ozono.

La actividad solar aumenta y decae formando un ciclo de 11 años que afecta a la vida en la Tierra de muchas maneras. El incremento de la actividad solar supone los aumentos de las emisiones ultravioletas y de rayos-X provenientes del Sol. Asimismo aumenta la temperatura, y los incrementos en la temperatura también modifican la densidad atmosférica para niveles muy altos de la capa, entre otras cosas.

Por supuesto, también afecta al clima, ya que un aumento de la actividad solar supone un cambio en la irradiancia solar que, pese a ser muy pequeña, produce cambios significativos: la Tierra se calienta y se enfría en función de sí la actividad solar aumenta o disminuye (Haigh, 2007).

Para contabilizar y representar esta actividad solar usamos el llamado **número de Wolf**, que es básicamente la cantidad que mide el número y tamaño de las manchas solares. Gracias a este número se pudo comprobar que dicha actividad solar es cíclica y que su periodo es cercano a los 11 años. El número de Wolf se calcula mediante:

$$R = k(10g + s) \quad (18)$$

donde R es el número de la mancha solar relativa, s el número de manchas individuales, g el número de grupos de la mancha solar y k un factor que varía con la situación e instrumentación. El número de Wolf actúa como un índice diario de la actividad solar (ver Fig. 10) (Hathaway, 2015).

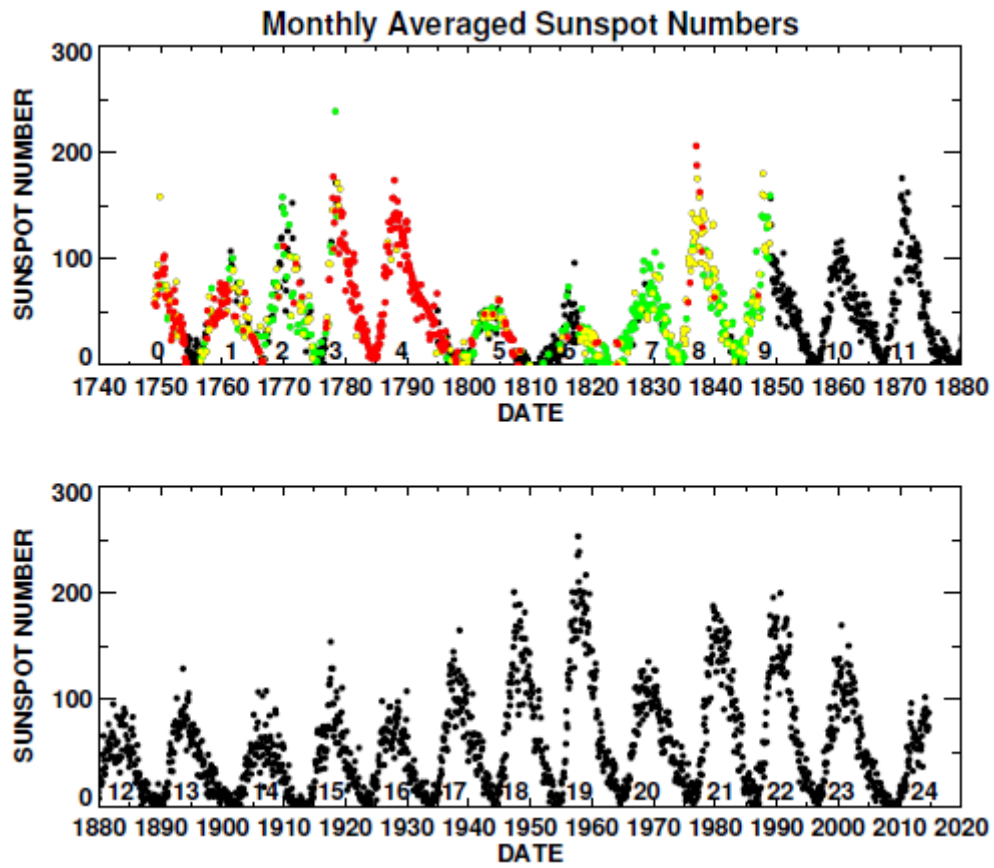


Figura 10: Medias mensuales del número de Wolf. Estas gráficas ilustran el ciclo solar y muestran que varía en amplitud, forma y longitud. La gráfica negra muestra las observaciones diarias. La gráfica de colores se lee de la siguiente manera: Los meses que faltan de 1 a 10 días de observación, son verdes. Los meses que faltan de 11 a 20 días de observación, son rojos. Finalmente los meses en los que faltan más de 20 días de observación, son negros. Fuente: Hathaway, 2015.

3.4. Software complementario:

Como podemos observar en la imagen de cómo están distribuidos los datos en cada archivo (Fig.8), se hace bastante difícil poder trabajar con ellos de la manera en la que están organizados en un primer momento. A su vez, nuestro objetivo principal es hacer uso de 16 años de archivos con estos datos, cada archivo con sus (aproximadamente) 365 datos. Esto nos da un total de aproximadamente 5840 datos (asumiendo que no faltasen días, que como explicamos anteriormente, faltan) por coordenada de latitud y longitud de ozono. Si tenemos en cuenta que en el hemisferio norte, que es donde vamos a trabajar, hay 90° de latitud y por cada grado hay 360° de longitudes, tendríamos un total de 189.216.000 datos, y eso solo para el primero de nuestros objetivos del análisis.

La conclusión a la que se llega es que si ya de por sí necesitamos ser capaces de leer y manipular un archivo para si queremos, por ejemplo, almacenar cada archivo en hojas de Excel, se hace muy tedioso ir uno por uno repitiendo el mismo proceso. Por ello en este trabajo se ha apostado por el desarrollo de códigos de programación en *Python 3.7*, tanto para descryptar cada archivo de valores como para almacenar las columnas de datos de ozono a lo largo de los años, separadamente por latitud y longitud (esto nos creará muchos archivos).

Con todos estos datos ya descargados, procederemos a utilizar el programa Excel tanto como para hacer más rápidamente los promedios como para generar una serie de tablas en función de lo que vayamos necesitando. Cabe destacar que importar todos los archivos de texto generados por nuestros códigos en *Python* en un tiempo aceptable (es decir no yendo archivo por archivo), no es trivial, por lo que también nos hemos ayudado de otro código en *MACROS* de Excel para esta parte.

Posteriormente para las representaciones gráficas utilizaremos tanto el programa *Wolfram Alpha Mathematica* (el cual nos permite importar archivos de Excel sin mayor dificultad), como *MATLAB* (aunque únicamente para las energías espectrales), como el propio Excel.

En cuanto a la última parte de nuestro análisis, en concreto la del análisis armónico, hemos utilizado un programa desarrollado en *MATLAB*, en concreto para hacer tanto la transformada discreta de Fourier y obtener los armónicos de las gráficas, como para seguidamente hacer la transformada inversa y obtener la representación de dichos armónicos en el dominio del tiempo (así como también las gráficas de los armónicos en el dominio de la frecuencia, que serán las energías espectrales).

4. Resultados

En este apartado se incluyen tanto las gráficas que hemos obtenido como su correspondiente análisis. Las gráficas pertenecientes al análisis temporal y al análisis latitudinal están hechas con *Mathematica*, importando los datos de las tablas Excel mencionadas en la metodología.

Por otro lado el último apartado, el del análisis de las periodicidades, las gráficas se han obtenido o bien con *MATLAB* (ya que el algoritmo que desarrollamos para esta última parte nos representaba directamente tanto la gráfica de los datos que veremos en el primer apartado, como las gráficas de los armónicos y las de la Transformada Inversa, superpuesta a la primera gráfica), o bien directamente con Excel.

4.1. Análisis temporal de la columna de ozono

A continuación tenemos las 10 gráficas correspondientes a las 9 franjas propuestas en el apartado 3.2.1 y otra que engloba todo el hemisferio norte. Todas estas gráficas muestran la evolución de las concentraciones de ozono en cada una de las franjas con el paso de los años (ver Fig.12).

En estas primeras gráficas podemos observar que a medida que aumenta la latitud, los valores máximos que alcanza el ozono son más altos, al igual que la variación entre máximos y mínimos a latitudes cercanas al polo norte son más pronunciadas. También se observa bien que todas estas evoluciones son periódicas, aunque no es una periodicidad perfecta podemos dar por hecho que siguen un orden periódico cada año, con sus temporadas de máximos y sus temporadas de mínimos. Estos fenómenos los podemos observar en la gráfica donde hemos juntado todas estas variaciones:

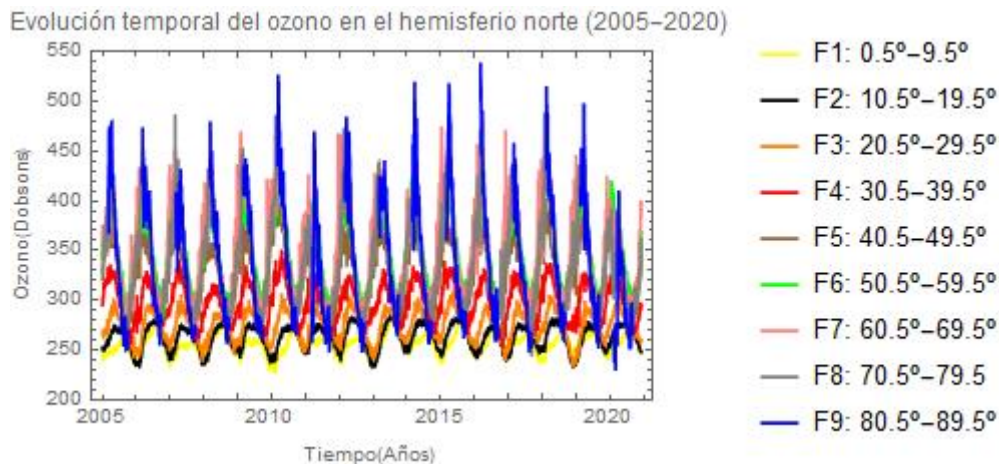


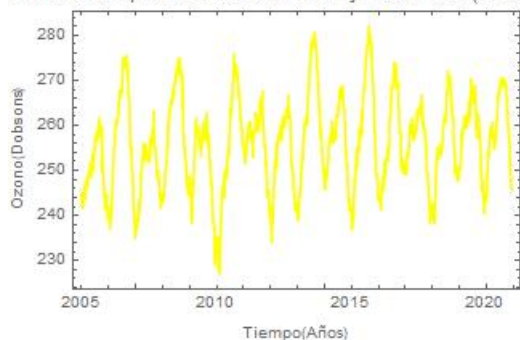
Figura 11: Evoluciones temporales de la columna de ozono para las diversas latitudes

En esta gráfica (ver Fig.11) se observa, de manera conjunta que los picos máximos de concentración están en las latitudes más elevadas (de 70.5° a 89.5°) al igual que las evoluciones con menos cambios y que presentan una periodicidad menos abrupta se encuentran en latitudes ecuatoriales (de 0.5° a 29.5°).

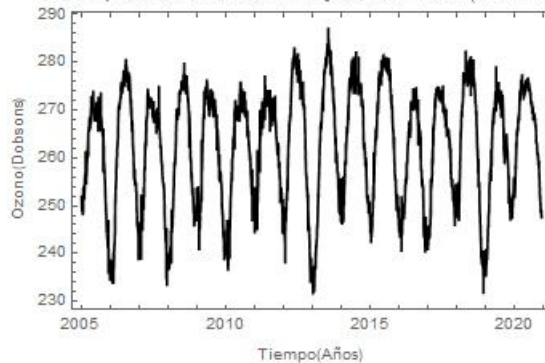
Para encontrar en qué temporadas se dan los máximos y mínimos sin embargo, tendremos que ver el comportamiento del ozono en el siguiente apartado, donde se ha analizado el comportamiento del ozono mes a mes de cada año.

Destacar que en la gráfica correspondiente a las latitudes 80.5°-89.5° aparecen "gaps" en los que directamente se unen los valores de antes de los gaps con los siguientes. Esto ocurre porque en esta gráfica hay periodos de meses (en invierno, correspondiente al invierno polar en el que no hay luz solar y no hay medición por parte del espectrómetro) en los que no tenemos datos. En *Mathematica* directamente al representarlo, los valores son ajustados de esta manera (ver gráfica de la franja 9 de la figura 12).

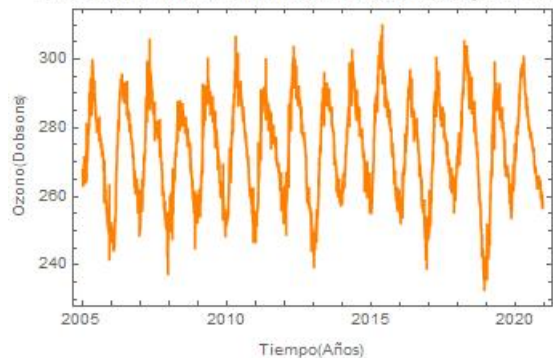
Evolución temporal del ozono en la franja 1: 0.5°–9.5°(2005–2020)



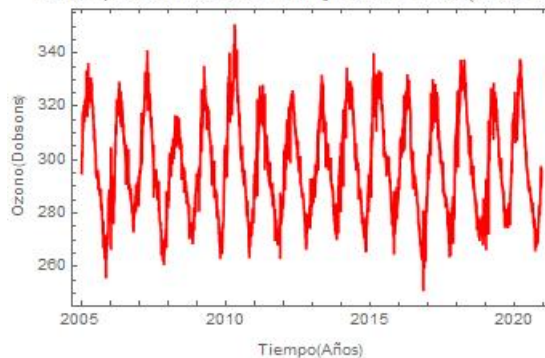
Ev. temporal del ozono en la franja 2: 10.5°–19.5°(2005–2020)



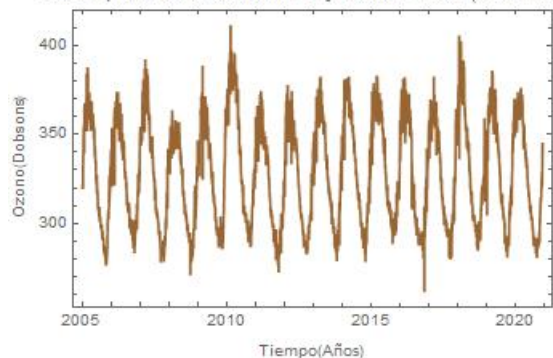
Ev. temporal del ozono en la franja 3: 20.5°–29.5°(2005–2020)



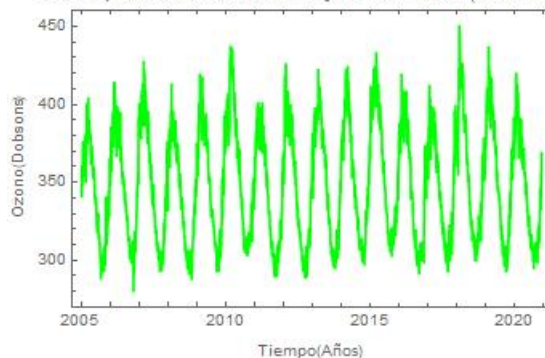
Ev. temporal del ozono en la franja 4: 30.5°–39.5°(2005–2020)



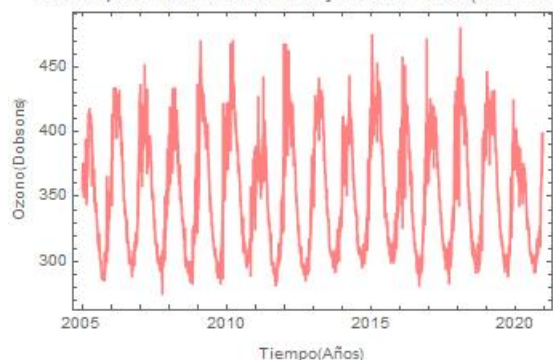
Ev. temporal del ozono en la franja 5: 40.5°–49.5°(2005–2020)



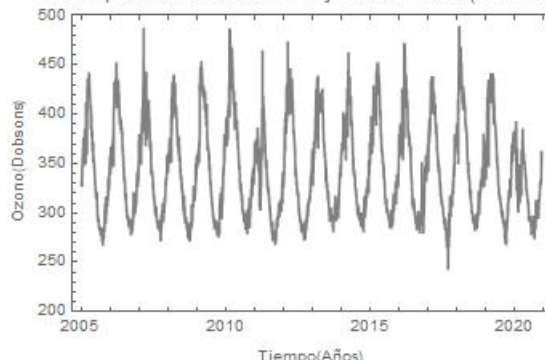
Ev. temporal del ozono en la franja 6: 50.5°–59.5°(2005–2020)



Ev. temporal del ozono en la franja 7: 60.5°–69.5°(2005–2020)



Ev. temporal del ozono en la franja 8: 70.5°–79.5°(2005–2020)



Ev. temporal del ozono en la franja 9: 80.5°–89.5°(2005–2020)

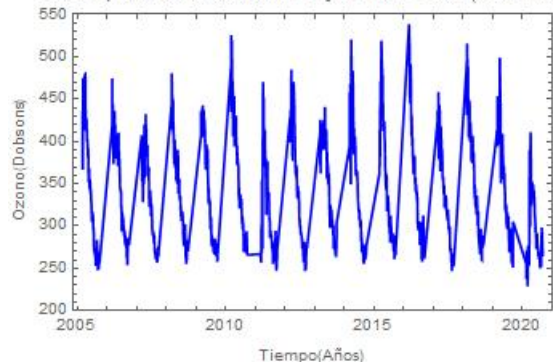


Figura 12: Gráficas de la evolución temporal de las franjas de latitudes escogidas

4.2. Análisis latitudinal de la columna de ozono

Siguiendo con nuestra metodología, hemos recogido las gráficas de las evoluciones de la concentración del ozono en función de la latitud año a año. A partir de aquí tenemos 3 tipos de gráficas que mostrar:

- Las primeras corresponden a las de la evolución latitudinal de los años 2005-2020 (ver Figuras 13 y 14).
- Las siguientes corresponden a una misma gráfica en 3 dimensiones vista desde diferentes ángulos. Representa la evolución de los promedios de concentración de los años 2005 a 2020 (es decir las medias mensuales de cada año, como las de la tabla 3). En estas, el eje z corresponde a las concentraciones del ozono en Dobsons, el eje x corresponde al tiempo, que en este caso serán los meses del año y por último el eje y corresponde a las latitudes en orden ascenente.
- La última gráfica es otro análisis temporal de los valores del ozono, aunque en este caso lo que hemos hecho es utilizar los mismos promedios usados en la gráfica anterior de 3D (ver datos en la tabla 4) con el objetivo de encontrar correlaciones lineales comparando la evolución que existe en cada franja.

| Mes/Latitud | Enero | Febrero | Marzo | Abril | Mayo | Junio | Julio | Agosto | Septiembre | Octubre | Noviembre | Diciembre |
|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 0.5 | 243.60881 | 248.083035 | 254.119194 | 257.113467 | 258.452166 | 262.365771 | 265.904899 | 267.640887 | 265.616229 | 257.408952 | 249.334458 | 244.785665 |
| 10.5 | 245.464798 | 252.132592 | 262.63869 | 270.958422 | 273.823756 | 274.391875 | 274.20871 | 272.058589 | 267.965354 | 259.006573 | 250.193813 | 244.946996 |
| 20.5 | 259.248972 | 268.986056 | 282.377419 | 291.718089 | 291.427857 | 286.633604 | 282.773831 | 277.474718 | 271.305979 | 263.104214 | 257.017396 | 254.90248 |
| 30.5 | 300.747944 | 311.460405 | 320.729677 | 323.495933 | 316.213226 | 304.348063 | 295.149093 | 288.433347 | 279.588021 | 272.829718 | 276.826458 | 289.212762 |
| 40.5 | 353.21498 | 367.057428 | 367.494899 | 358.966622 | 346.657627 | 328.055438 | 310.631855 | 299.588831 | 291.436125 | 290.697984 | 307.035042 | 333.645625 |
| 50.5 | 383.430569 | 396.919242 | 396.634609 | 384.342464 | 364.744539 | 343.252227 | 324.635737 | 309.102825 | 303.136488 | 306.398737 | 328.099916 | 356.091763 |
| 60.5 | 395.248246 | 403.477423 | 406.528851 | 399.014422 | 366.439286 | 335.621083 | 313.149677 | 300.822419 | 298.075188 | 308.388347 | 339.697521 | 371.304052 |
| 70.5 | 371.783649 | 399.409852 | 409.039577 | 403.829933 | 367.632097 | 331.784833 | 304.891694 | 289.361613 | 285.464875 | 300.020887 | 318.073479 | 346.573931 |
| 80.5 | | 390.724327 | 410.900279 | 406.481778 | 370.045806 | 330.288833 | 296.451714 | 276.2925 | 270.250386 | 264.47 | | |

Tabla 4: Promedios de las concentraciones de ozono de los años 2005-2020 en función de las latitudes (de 0.5° a 80.5°) y de los meses (de enero a diciembre). Esta tabla está hecha promediando los datos que tenemos de las tablas por años como la de la tabla 3.

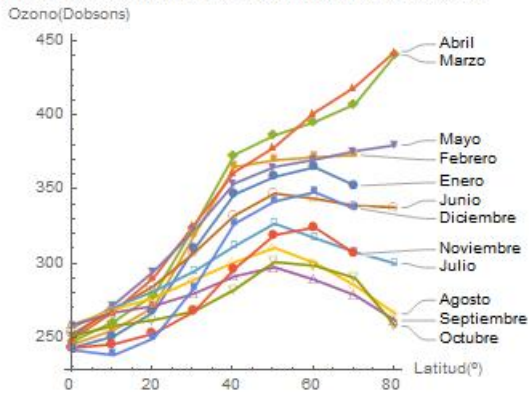
Vamos con las primeras figuras (13 y 14). En estas gráficas vemos que efectivamente la latitud es un factor clave a la hora de analizar la evolución de las concentraciones del ozono. Los máximos de casi todas las gráficas se encuentran fundamentalmente en las latitudes más elevadas y casi siempre en torno a los primeros meses de primavera, especialmente en marzo y abril, mientras que los mínimos en estas mismas latitudes suelen encontrarse en la transición de verano a otoño, en los meses de agosto, septiembre y octubre principalmente.

Indirectamente, esto a su vez demuestra el porqué existe una periodicidad en las evoluciones temporales del anterior apartado, y es que si nos fijamos en los periodos de valores máximos y mínimos se encuentran siempre en torno a las mismas temporadas, con algunas variaciones. Y es que en algunos años encontraremos los máximos repartidos en meses correspondientes a invierno (por ejemplo en enero y febrero) y los mínimos en meses de verano como julio y agosto. Este comportamiento responde a que la atmósfera no es igual cada año y los fenómenos de creación y destrucción de ozono se ven modificados dependiendo de cuándo se den los fenómenos de transporte de ozono hacia latitudes medias y altas (lo que dependerá también de cómo sean cada año las corrientes de chorro), la producción y pérdida de O_3 y su divergencia de flujo.

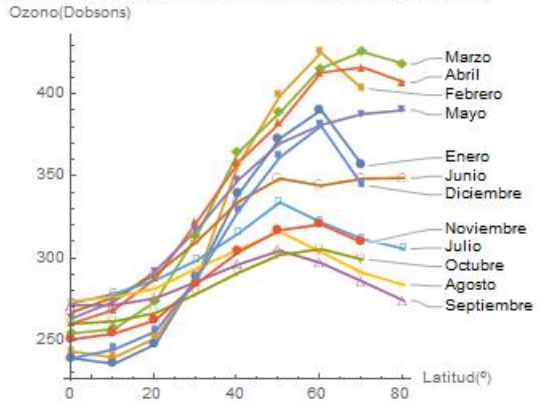
Por otro lado, los máximos y mínimos en la zona ecuatorial se dan en diferentes épocas del año debido a la latitud, y es que si bien la correspondencia de máximos y mínimos en cuanto al hemisferio sur es inversa (máximos en otoño, mínimos en primavera, respecto al hemisferio norte) al igual que sus temporadas de verano e invierno, tiene sentido que en el ecuador los máximos se encuentren en torno a finales de primavera, principios de verano y los mínimos prácticamente en el inicio del invierno, es decir a mitad de camino de los máximos y los mínimos que presenta el hemisferio sur (en estas gráficas quizás este comportamiento sea más complicado de ver ya que para latitudes ecuatoriales todos los puntos se condensan bastante y se hace difícil distinguir los máximos de los mínimos).

Esto concuerda con lo previsto en la teoría que explicamos en el apartado 3.2.2, por lo tanto consideramos que hasta el momento nuestros resultados están siendo coherentes al comportamiento real esperado.

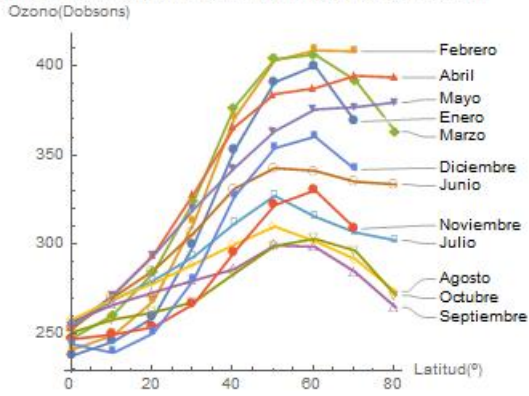
Evolución del ozono en función de la latitud en el año 2005



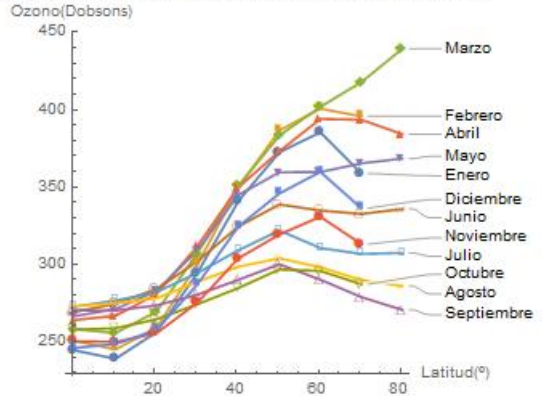
Evolución del ozono en función de la latitud en el año 2006



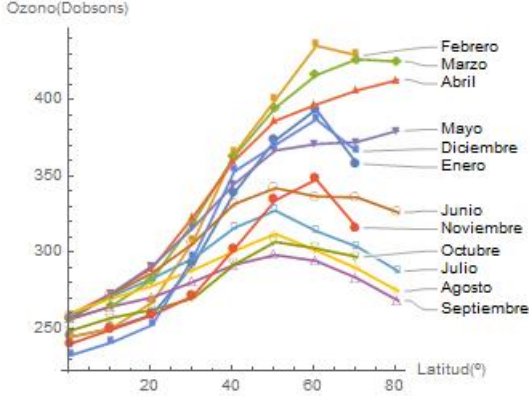
Evolución del ozono en función de la latitud en el año 2007



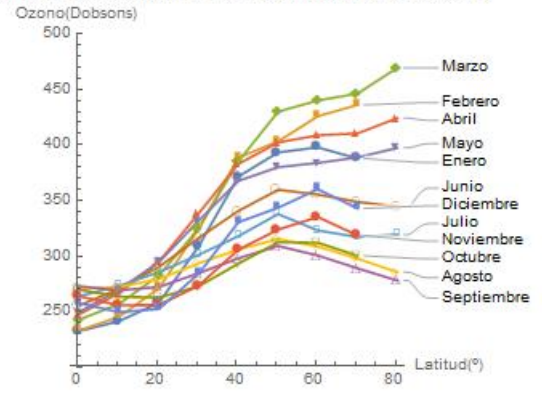
Evolución del ozono en función de la latitud en el año 2008



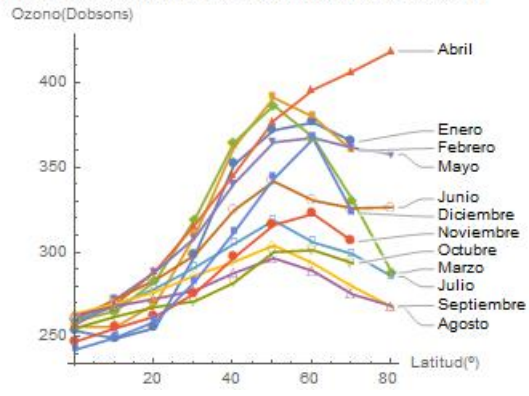
Evolución del ozono en función de la latitud en el año 2009



Evolución del ozono en función de la latitud en el año 2010



Evolución del ozono en función de la latitud en el año 2011



Evolución del ozono en función de la latitud en el año 2012

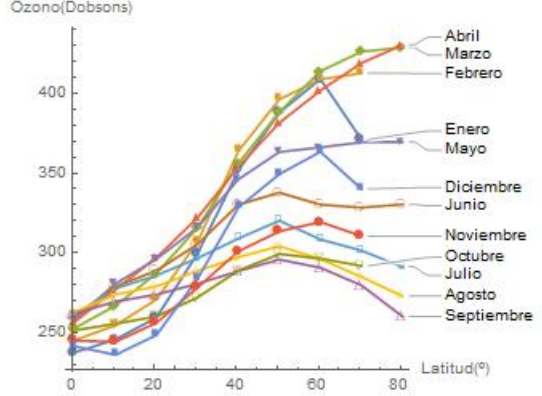
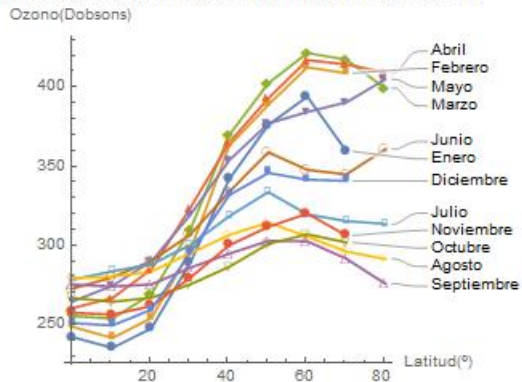
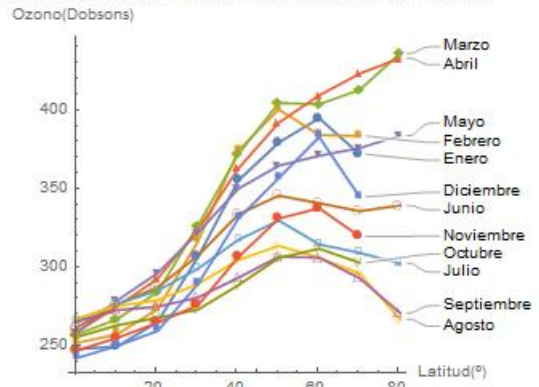


Figura 13: Gráficas de la evolución latitudinal de los años 2005-2012

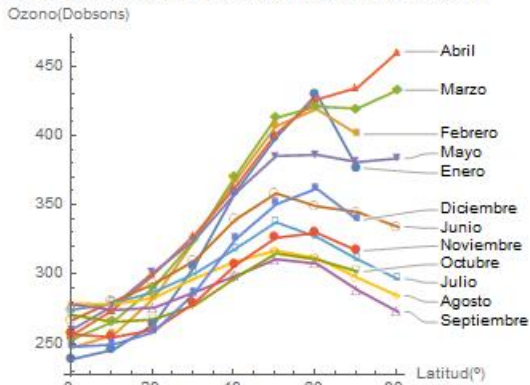
Evolución del ozono en función de la latitud en el año 2013



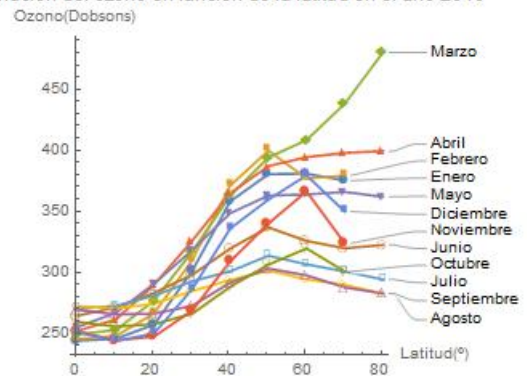
Evolución del ozono en función de la latitud en el año 2014



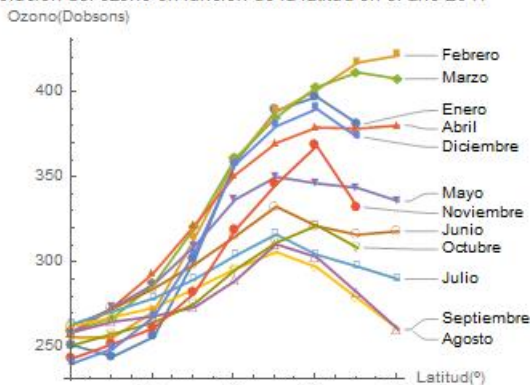
Evolución del ozono en función de la latitud en el año 2015



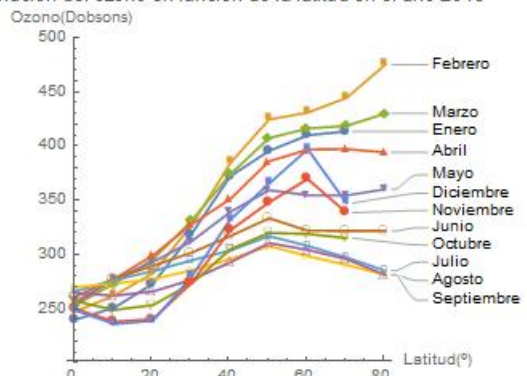
Evolución del ozono en función de la latitud en el año 2016



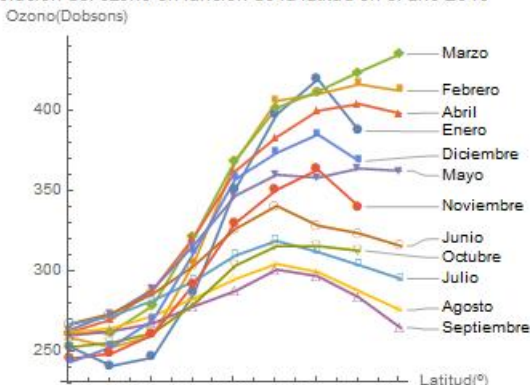
Evolución del ozono en función de la latitud en el año 2017



Evolución del ozono en función de la latitud en el año 2018



Evolución del ozono en función de la latitud en el año 2019



Evolución del ozono en función de la latitud en el año 2020

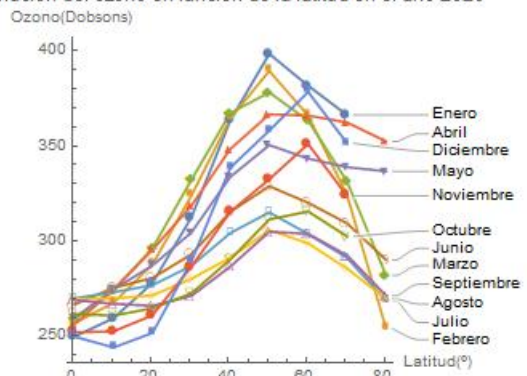


Figura 14: Gráficas de la evolución latitudinal de los años 2013-2020

Por último en lo referente a estas gráficas, hemos representado las evoluciones latitudinales promedias que están en la tabla 4, que justifican los comportamientos de máximos y mínimos en función de las latitudes que hemos explicado anteriormente (ver Fig.15):

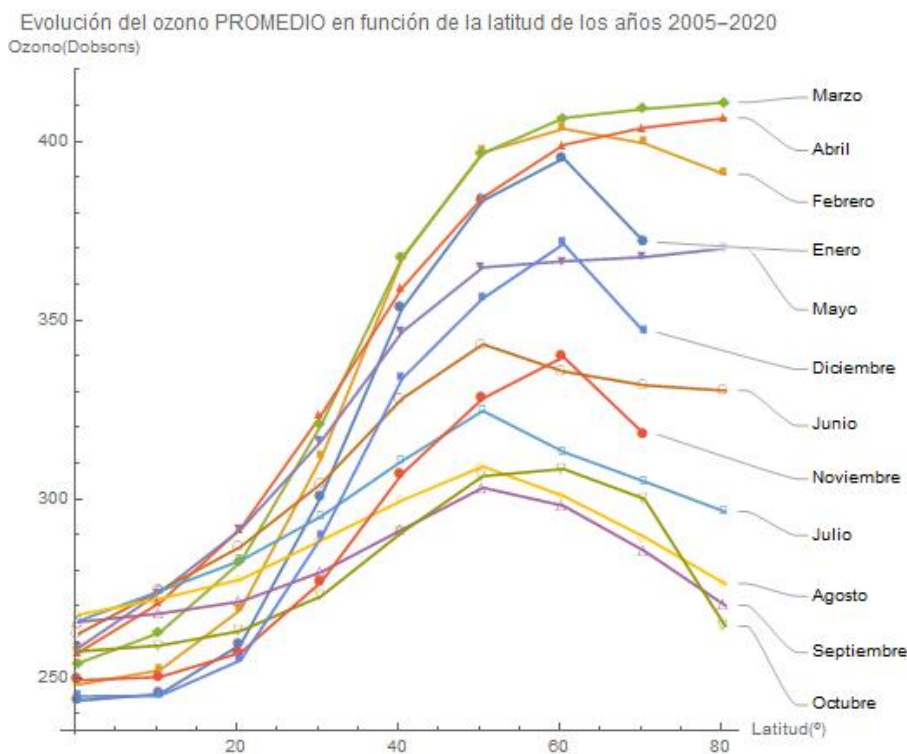


Figura 15: Evolución latitudinal de los promedios de los años 2005-2020 sacada a partir de los datos de la tabla 4

De estos mismos datos y siguiendo nuestros resultados tenemos a continuación la gráfica de los promedios anuales 3D, la cual concuerda con la Fig.15 y nos muestra de manera tridimensional los comportamientos vistos hasta ahora (ver Fig.16).

Rápidamente podemos ver que concuerda con los resultados anteriores simplemente mirando los máximos y mínimos de las latitudes altas y su correspondencia mensual (máximos primavera, mínimos otoño). De hecho, en estas gráficas podemos apreciar el comportamiento de los máximos y mínimos en el ecuador que era difícil de ver en las anteriores gráficas, ya que si miramos la 3ª gráfica de la figura 16, podemos ver que efectivamente los máximos de estas latitudes ecuatoriales están prácticamente en verano y los mínimos se encuentran al inicio del invierno a partir de diciembre.

Otro comportamiento que se observa bien en estas gráficas es el de la alta variación entre máximos y mínimos en latitudes altas, y mínimo en latitudes ecuatoriales, correspondiéndose esto con los resultados obtenidos de las primeras gráficas de las evoluciones temporales.

Por otro lado en la representación de la última franja de latitudes (de 80.5°-89.5°) vuelven a faltar datos de los meses de invierno por el fenómeno de la noche polar.

Finalmente esta gráfica 3D posiblemente sea, de todas las que hemos obtenido, en la que mejor veamos el fenómeno del transporte de ozono en la estratosfera.

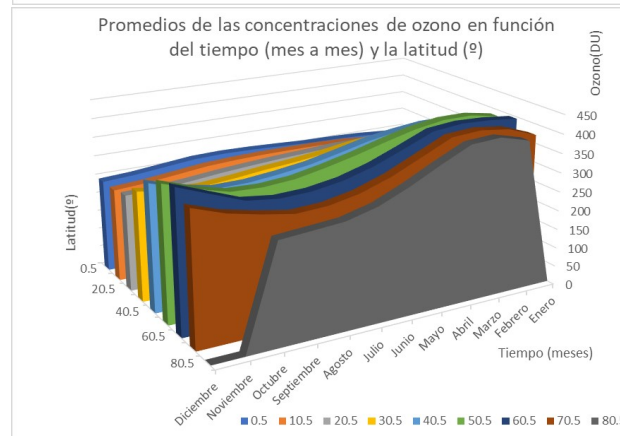
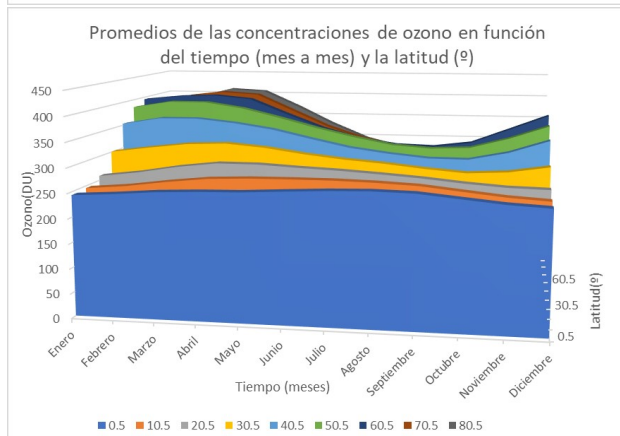
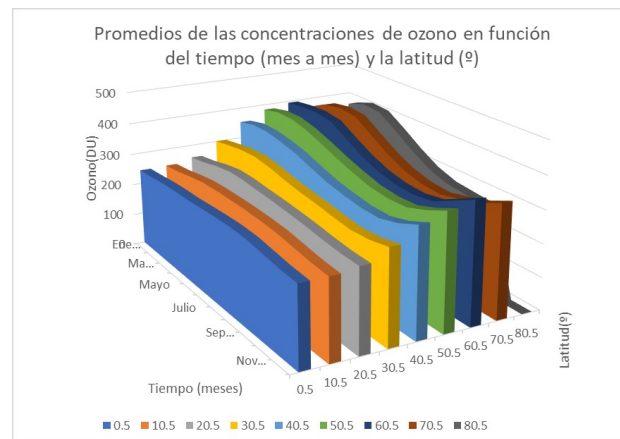
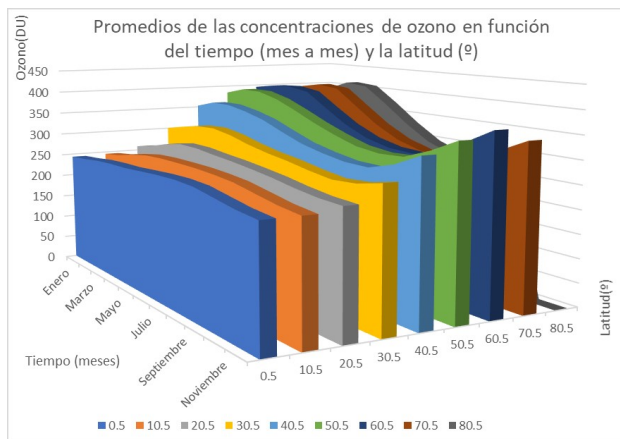


Figura 16: Diferentes vistas de la evolución de los promedios de las concentraciones de ozono de los años 2005-2020 en el hemisferio norte, a lo largo de un año y en función de las latitudes (Datos: tabla 4).

4.3. Análisis de las periodicidades de la columna de ozono

Este apartado final se ha realizado a partir de un programa en *MATLAB* que funciona de la siguiente manera:

- Necesitamos un fichero con la serie de los datos de la franja que queramos estudiar en formato *.xlsx* de Excel, tal y como si lo fuéramos a representar como en el apartado del análisis de las evoluciones temporales 4.1. En total usaremos los 9 de cada franja, para diferentes funciones que explicaremos.
- Por otro lado tenemos un fichero Excel también donde nuestro programa de *MATLAB* lee directamente las indicaciones que nosotros le queramos dar para que el programa nos devuelva los armónicos de la serie que nosotros queramos. Cada vez que queramos sacar un armónico u otro modificamos este archivo.
- Por último, el programa nos devuelve fundamentalmente 2 cosas: la primera son 3 gráficas, una con la representación de la serie que tenemos (nos devuelve por tanto gráficas como las obtenidas en el análisis temporal), la gráfica de representación de las energías espectrales (que nos mostrará los picos en los que se encuentran los armónicos), que es básicamente la gráfica de la Transformada de Fourier de la serie, en el dominio de la frecuencia y, finalmente la gráfica de la Transformada de Fourier Inversa, superpuesta a la gráfica sin transformar para que podamos comprobar si los armónicos elegidos corresponden o no a la serie. La segunda función al momento crea un archivo *.txt* con toda la información referente a la serie transformada, todos los armónicos que existen en la serie original en función de la energía espectral correspondiente (de hecho mirando este archivo y la gráfica de la Transformada de Fourier en el dominio de la frecuencia podemos elegir los armónicos más interesantes) y la lista de valores de la Transformada de Fourier Inversa que representa.

Luego a partir de este programa, hemos obtenido resultados para 2 tipos de aplicaciones del análisis armónico:

- 1.- La primera se corresponde con extraer los armónicos de las series de datos de las franjas y representar, únicamente la señal de la Transformada Inversa. Esto es básicamente un filtrado de la señal original y así obtendremos las gráficas correspondientes a las obtenidas en el análisis temporal pero filtradas. Para hacer esto hemos elegido los mismos armónicos para hacer el filtrado de todas las gráficas, con el fin de estudiar si la periodicidad en todas las latitudes se corresponde con los mismos armónicos, si hay diferencias y qué fenómenos se corresponderían con las posibles diferencias.
- 2.- La segunda se trata de estudiar directamente el periodo de 11 años, para representar los resultados en cada franja junto a los del ciclo solar (representando las Transformadas de Fourier Inversas sobre la gráfica del número de Wolf). Concretamente nuestros datos los hemos descargado del **NOAA** (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) y corresponden a un periodo de unos 13 años y medio (desde el 01/01/2005 hasta el 30/06/2017), luego acortaremos la representación de los datos del ozono para este apartado a los mismos años. La idea con esto es la de buscar equivalencias entre la evolución del ozono estratosférico y el ciclo solar.

Comenzamos representando las señales filtradas (ver figura 17). Los armónicos que hemos escogido son siempre los mismos y los escogemos mirando el fichero *.txt*. Más concretamente nos fijamos en los periodos que corresponden a una mayor energía espectral (ver figuras 19 y 20). Todo esto nos lo da el programa directamente. De hecho el primer armónico que muestran en todas las gráficas es el armónico correspondiente al año (que está en unos 363.688 días). Este armónico es el más importante ya que dicta la periodicidad principal de nuestros datos, por lo que concuerda bastante con lo esperado.

Evidentemente para sacar los armónicos solo tenemos que transformar los periodos a sus correspondientes frecuencias con una sencilla cuenta:

$$N_{armonicos} = \frac{N_{datostotales}}{periodo} \quad (19)$$

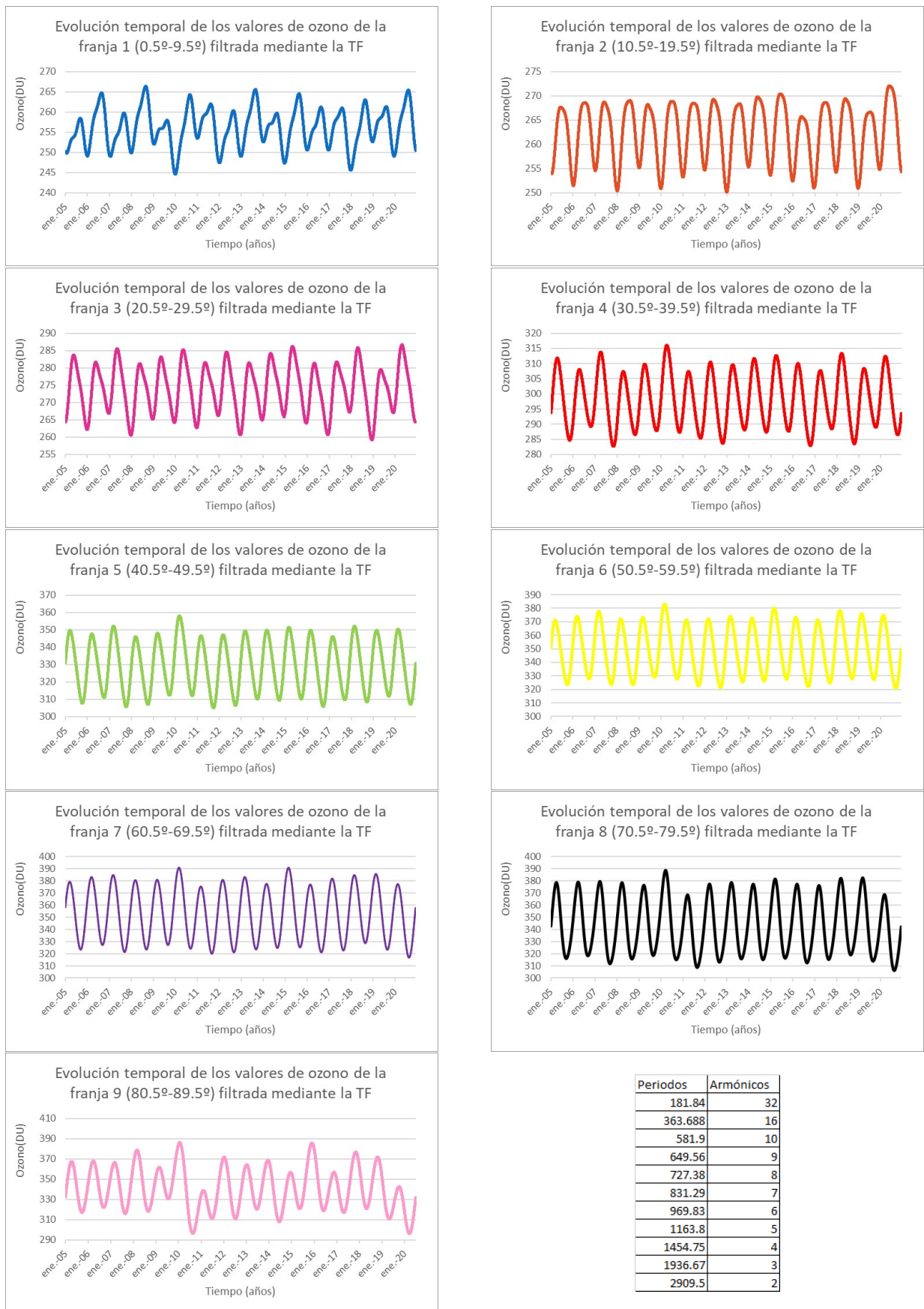


Figura 17: Representación gráfica de las Transformadas de Fourier Inversas de las franjas 0.5^o-89.5^o.

Tabla 5: Periodicidades y armónicos de la Transformada de Fourier.

Si comparamos estas gráficas con las obtenidas en la Figura 12, vemos claramente su correspondencia. Es más acabamos de aplicar el análisis armónico como filtro para eliminar el ruido de las series originales de manera que así veamos las periodicidades de cada franja de manera más inmediata.

Realmente, el ruido que forma las gráficas originales corresponde a las energías espectrales bajas (al hacer la Transformada de Fourier). Todos aquellos periodos cortos que podemos encontrar mediante este método que presentamos corresponderán al ruido.

Cabe destacar un último dato importante sobre este apartado y es sobre cómo se han representado aquellas series de datos en las cuales faltan datos (en nuestro caso, las franjas 6 y 9). Es importante destacar esto ya que tiene que ver con la manera en la que funciona nuestro programa de *MATLAB*:

Básicamente el programa, cuando detecta un espacio entre los datos, realiza una **interpolación lineal** entre los datos de arriba y de abajo del espacio en el que esté, de manera que nos crea otro dato que pese a no ser real, no se aleja del comportamiento que lleva la serie. Esta técnica funciona bien con la franja 6 ya que en esta franja falta un dato cada "x" meses aproximadamente, pero con la franja 9 realmente lo que se hace es comenzar desde el mes de marzo (cuando comienza a haber datos en la serie) y señalar la posición de ese dato respecto de cuál sería el primero de nuestra serie. Obviamente el método funciona pero quizás sea menos efectivo y como resultado la gráfica deje algunas discrepancias si la comparamos con la original.

Además, al tener diferente número de datos con esta franja, los armónicos varían un poco respecto a los que hemos escogido de las otras (que son generalmente los mismos con mayor o menor importancia de unos u otros dependiendo de la franja). Aún así las diferencias en este caso de la franja 9 son mínimas, no obstante conviene tener esto en cuenta a la hora de analizar los resultados. Esto se ve mejor en las gráficas de las energías espectrales que hemos adjuntado más adelante.

Por último hemos recopilado todas estas evoluciones en una misma gráfica para apreciar de nuevo cómo varían las evoluciones de las concentraciones a lo largo del tiempo en función de la latitud:

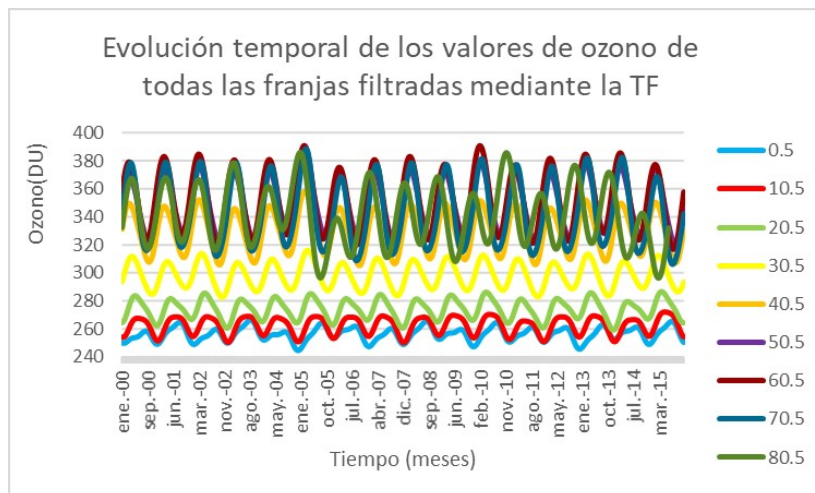


Figura 18: Representación de todas las TFI de las franjas en la misma gráfica

Si comparamos esta figura 18 con la figura 11 donde hicimos la primera representación de la misma evolución, en esta última se distinguen muchísimo mejor las diferencias entre latitudes al igual que los diferentes periodos y ni hablar de las formas de cada curva, por lo tanto concluimos que el filtrado de las series de datos mediante el análisis armónico es fundamental si queremos estudiar en profundidad la evolución de la columna de ozono.

A continuación vamos a ver cómo cambian las energías espectrales de la Transformada de Fourier de nuestros datos. Si miramos las figuras 19 y 20 vemos que prácticamente todas las representaciones tienen la misma forma, esto gracias a la periodicidad que comparten. Los periodos más importantes se ven en los picos de cada gráfica, que por lo general suelen estar en los mismos valores del periodo. Estos son los periodos que tenemos en la tabla 5.

Si nos fijamos en la gráfica correspondiente a la franja 1 de la figura 19 (la primera de todas), hemos destacado el armónico más importante, que es el anual. Este armónico, como podemos observar, se conserva en todas las franjas, al igual que el resto. Por ello que gracias a la periodicidad del ozono podemos hacer el filtro de la Transformada de Fourier de la figura 17 con los mismos armónicos para cada franja.

Cabe destacar en estos resultados que la franja 9 es la que muestra mayor variación de sus armónicos respecto a las demás franjas. Esto se debe a que el número de datos es menor, ya que tuvimos que suprimir los espacios en blanco para bastantes días para el correcto funcionamiento de nuestro programa, como explicamos anteriormente.

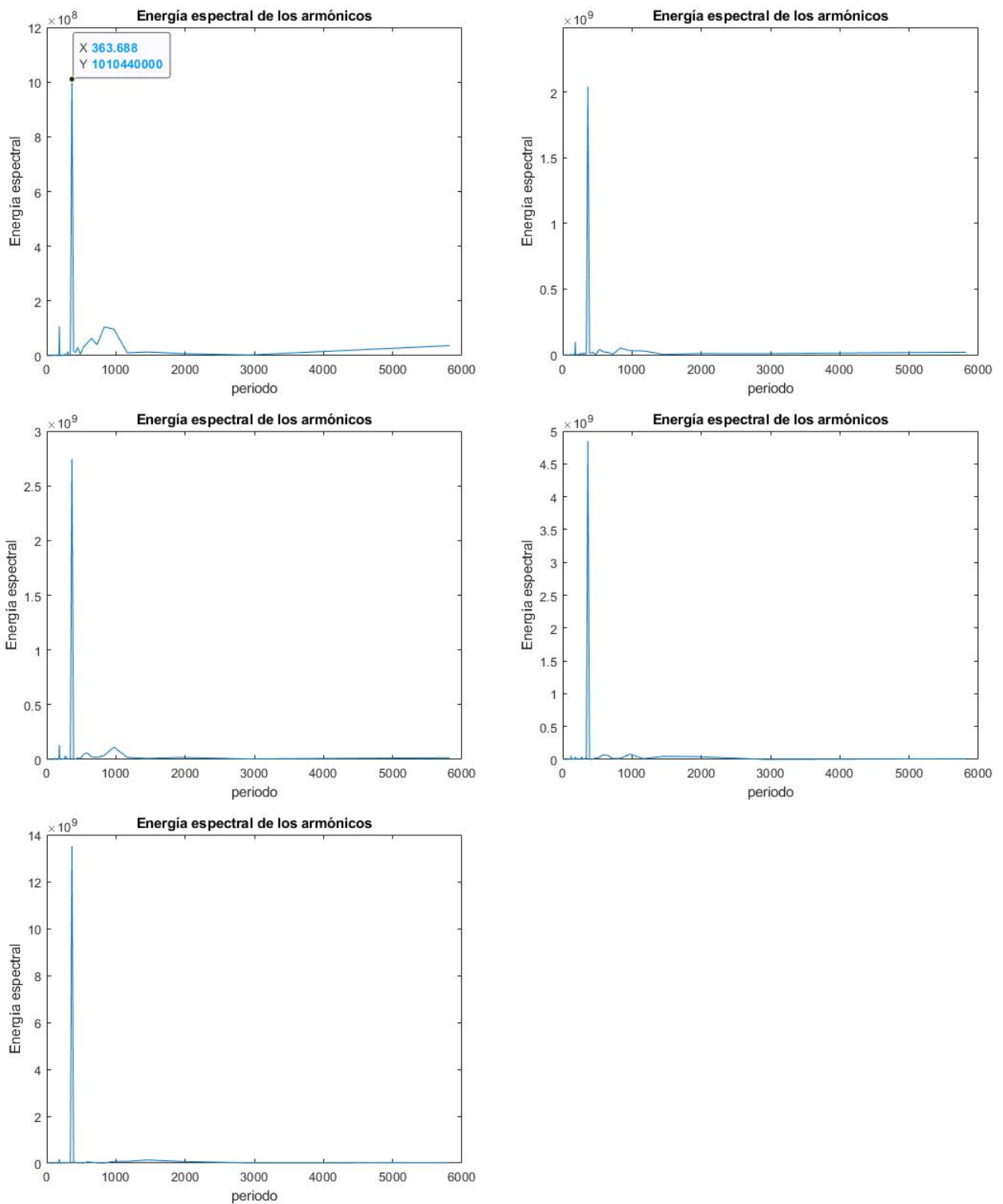


Figura 19: Representación gráfica de las energías espectrales del ozono calculadas mediante la Transformada de Fourier de las franjas 0.5° - 49.5° , ordenadas de menor a mayor latitud.

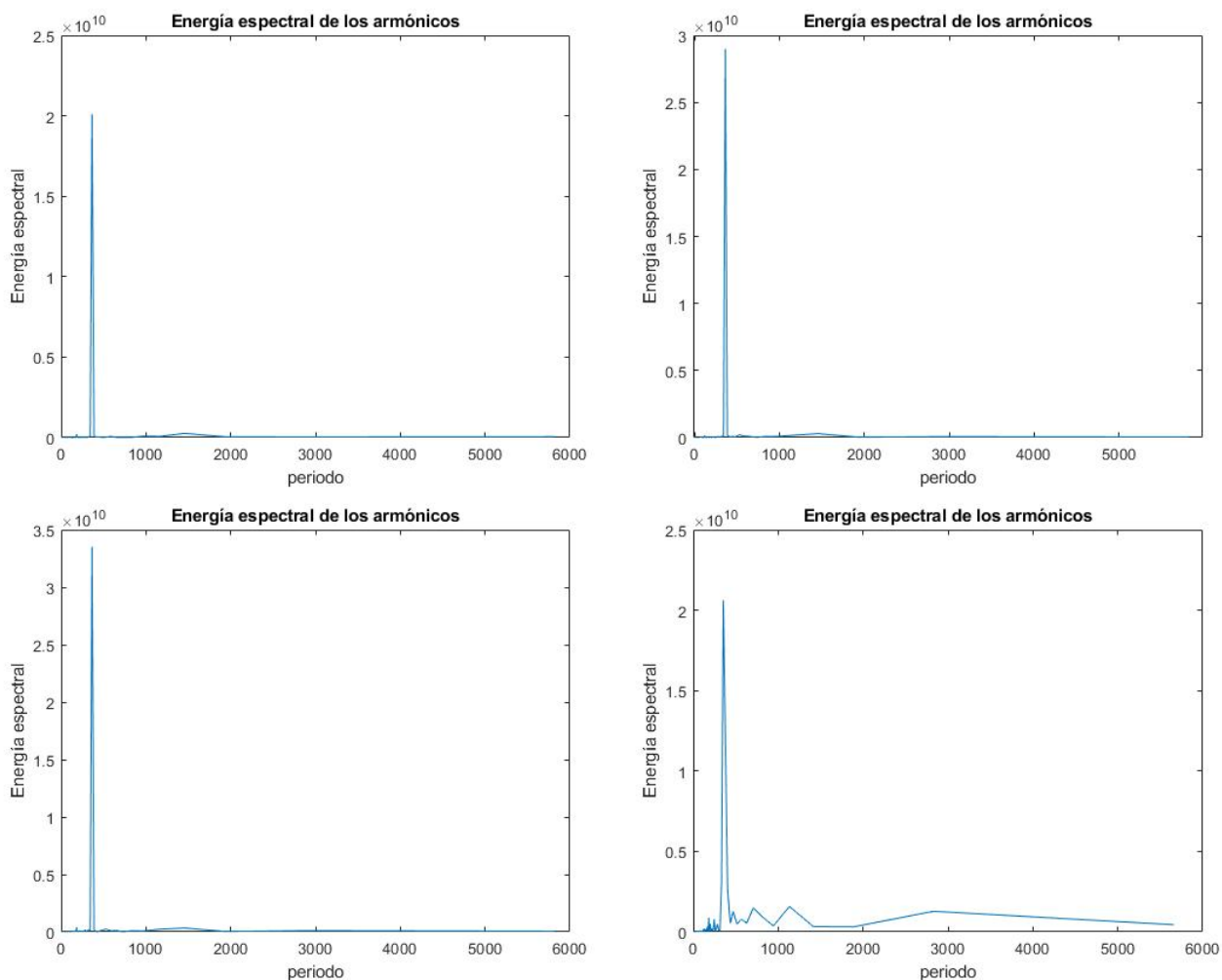


Figura 20: Representación gráfica de las energías espectrales del ozono calculadas mediante la Transformada de Fourier de las franjas 50.5° - 89.5° , ordenadas de menor a mayor latitud.

Para terminar con el trabajo, presentamos ahora los resultados relativos al análisis del periodo de 11 años, y su relación con el ciclo solar.

Para este apartado hemos representado el armónico de 11 años de cada franja, es decir el correspondiente a la Transformada de Fourier Inversa del armónico relativo a los 11 años.

Por otro lado los datos obtenidos del *NOAA*, reflejan la evolución del ciclo solar:

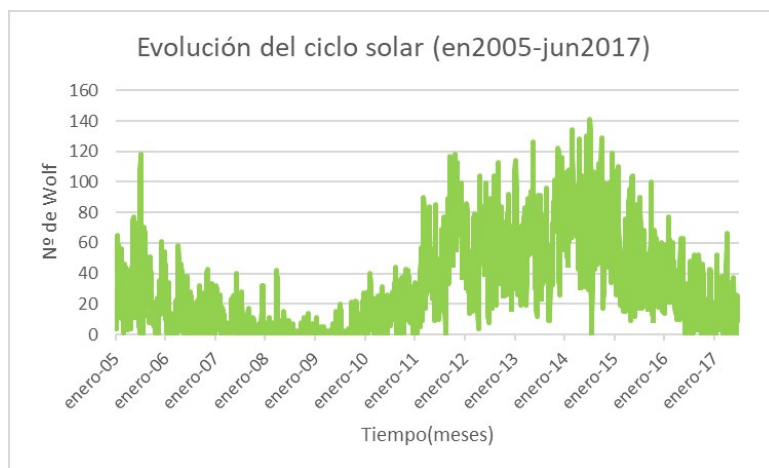


Figura 21: Representación de los datos del número de Wolf de 2005-2017 obtenidos del *NOAA*

Históricamente los mínimos de la actividad solar de los últimos años se han detectado en los años 2009 y 2019, tal y como reflejan los datos del n° de Wolf representados. Luego para buscar correspondencias con nuestros datos debemos fijarnos en que la forma de nuestra gráfica coincida con los periodos de máximos y mínimos de la figura 22. En las figuras 23 y 24 podemos encontrar estas gráficas. Para detallar esta relación mejor se ha realizado un ajuste lineal de los datos del ozono y el número de Wolf tal que:

$$[O_3](t) = N_{Wolf} \cdot A + B \quad (20)$$

De donde hemos obtenido la tabla 6 que explica si hay correspondencia entre el ciclo solar y el ozono. Si el coeficiente de correlación lineal es cercano a 1, la evolución del ozono estratosférico y el ciclo solar tendrán una relación lineal.

| Franja | A | B | Coefficiente de correlación |
|-----------|--------|--------|-----------------------------|
| 0.5-9.5 | 0.0005 | 254.96 | 0.8364 |
| 10.5-19.5 | 0.0004 | 261.61 | 0.8113 |
| 20.5-29.5 | 0.0003 | 297.61 | 0.6897 |
| 30.5-39.5 | 0.0003 | 273.3 | 0.6778 |
| 40.5-49.5 | 0.0004 | 328.31 | 0.6426 |
| 50.5-59.5 | 0.0008 | 347.59 | 0.5362 |
| 60.5-69.5 | 0.0007 | 351.29 | 0.4283 |
| 70.5-79.5 | 0.0008 | 342.21 | 0.5838 |
| 80.5-89.5 | 0.0026 | 335.45 | 0.4692 |

Tabla 6: Ajuste lineal del ozono estratosférico y los valores del número de Wolf. A especifica la pendiente y B la ordenada en el origen.

Si nos fijamos en las primeras 4 gráficas relativas a las franjas desde 0.5° a 40.5° vemos que la correspondencia con la evolución del ciclo solar coincide. Además si miramos la tabla 5 vemos también que los primeros valores correspondientes a las primeras franjas, su coeficiente de correlación lineal es más cercano a 1. Luego podemos ver que en las latitudes en las que la radiación solar es mayor, la evolución estratosférica del ozono se ve afectada por el efecto de la actividad solar.

Esto tiene sentido, ya que los procesos de creación de ozono dependen directamente de la radiación solar UV, como vimos en la introducción. En cuanto al resto de franjas, esta relación se va perdiendo poco a poco ya que a partir de latitudes más altas, la luz solar no llega de la misma manera, de manera que en latitudes elevadas no exista este fenómeno sigue siendo coherente con lo que nos indica la teoría. En la tabla 6 se comprueba esto ya que medida que aumenta la latitud, el coeficiente de correlación disminuye. Para tener más certeza sobre esto, hemos representado gráficamente el coeficiente de correlación en función de las latitudes para ver cómo disminuye cuanto mayor sea la latitud:

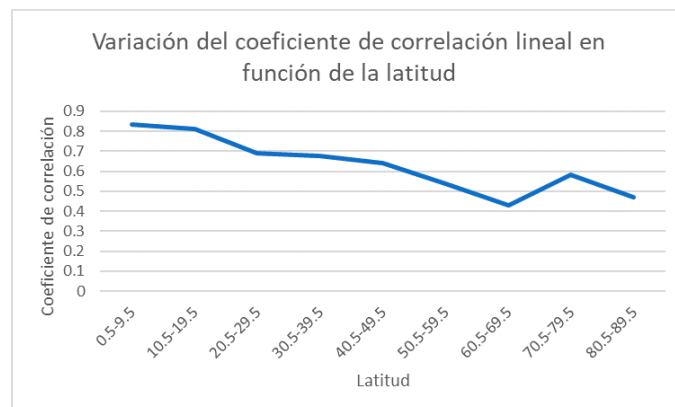


Figura 22: Variación del coeficiente de correlación lineal con la latitud.

Si ampliamos un poco más nuestra visión sobre estos resultados podemos apreciar una clara influencia geográfica entre la posición relativa del Sol con la Tierra. Es decir que la actividad solar afectará en mayor

o menor medida a la concentración de ozono estratosférica en función de la zona de la Tierra en la que nos encontremos. Esto es un comportamiento completamente natural ya que sin ir más lejos, el efecto del Sol nos separa (por ejemplo) las estaciones del hemisferio norte y el hemisferio sur, teniendo una fuerte dependencia de la latitud en cuanto a cómo afecta la actividad solar durante las diferentes estaciones en las diferentes regiones. Por lo que podemos concluir, observando las gráficas de las figuras 23 y 24 y la tabla 6 con su respectiva figura 22, que la influencia solar disminuye en función de la latitud (es menor para latitudes medias y prácticamente nula para latitudes polares).

Otro fenómeno aparente lo tenemos en cuanto a la curva de la TFI para las diferentes latitudes, y es que si nos fijamos la forma de la curva sigue un comportamiento sinusoidal (como es lógico habiendo hecho la TFI de un armónico) que varía entre la forma de seno y coseno en función de la misma altura geográfica a la que nos encontremos. El cambio de esta curva es debido a los procesos de transporte estratosférico provocados por los vientos estacionales en el hemisferio norte, como explicamos anteriormente en la introducción.

Por último destacar que las fluctuaciones debidas a la actividad solar pasan desapercibidas a primera vista, por eso en este trabajo se ha querido reflejar su importancia y efecto en el ozono estratosférico. Y es que los armónicos más comunes que obtendremos al hacer la Transformada de Fourier serán los de 1 año o los de 6 meses, sin embargo esta equivalencia hay que buscarla. Dada la longitud de las series de datos de nuestro estudio esto ha sido posible, ya que con periodos de tiempo inferiores a los 11 años, este efecto podría no verse reflejado en los resultados aunque como hemos visto, exista.

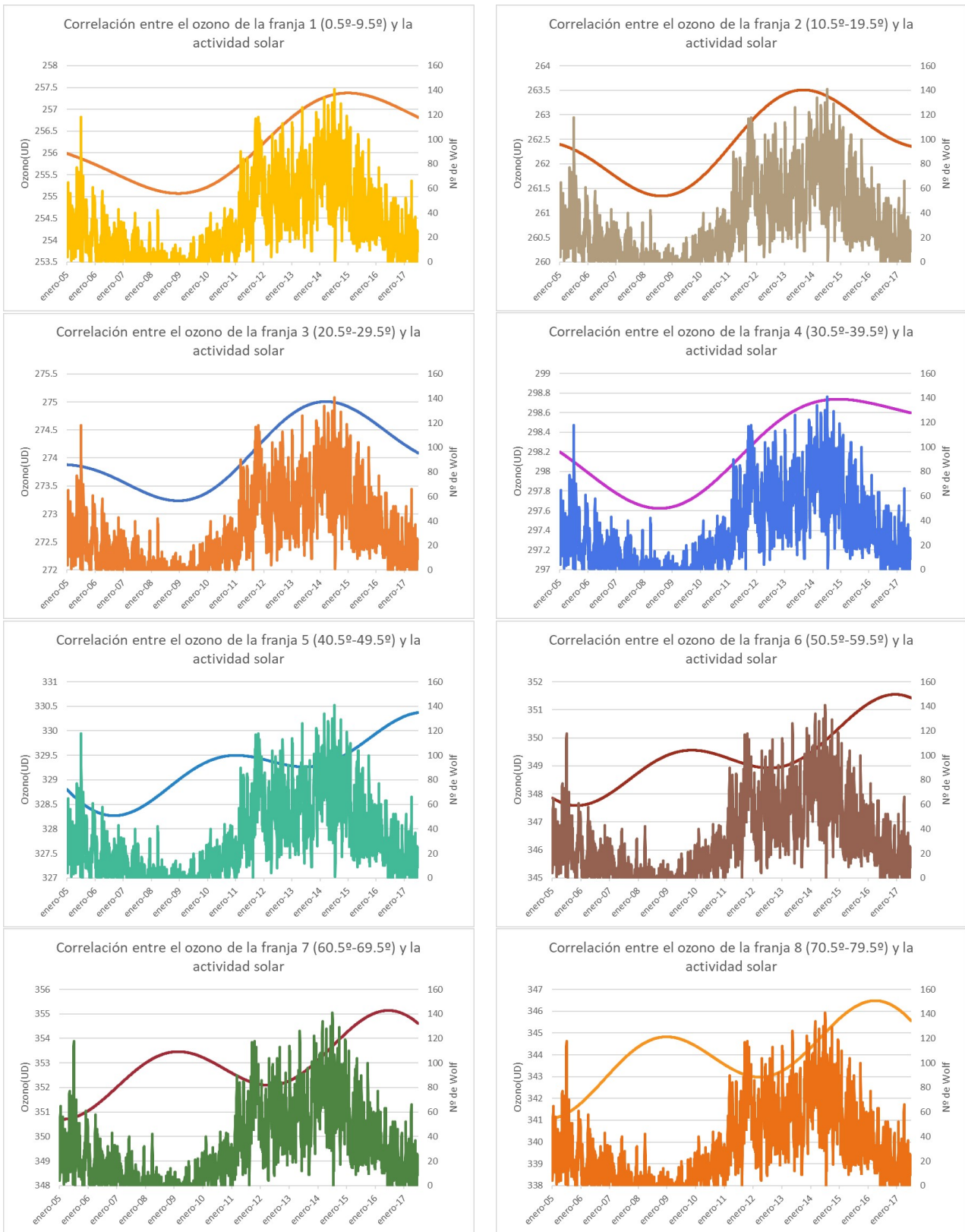


Figura 23: Representación gráfica de las Transformadas de Fourier Inversas de las franjas 0.5°-79.5° para el periodo de 11 años junto con la evolución temporal del ciclo solar del 01/01/2005 al 30/06/2017

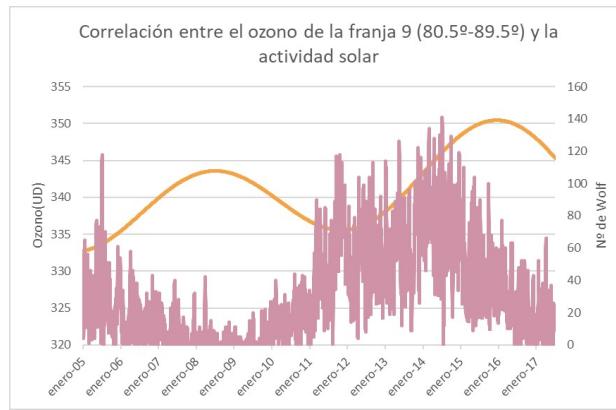


Figura 24: Representación gráfica de la Transformada de Fourier Inversa de la franja 80.5°-89.5° para el periodo de 11 años junto con la evolución temporal del ciclo solar del 01/01/2005 al 30/06/2017

5. Conclusiones

Tras el análisis de los datos y de los resultados obtenidos hemos explicado (o mejor dicho, justificado) la evolución de las concentraciones de ozono estratosféricas, para el periodo de 16 años desde 2005 a 2020.

Primero debemos recordar que todas nuestras representaciones se han hecho con promedios de todas las longitudes para cada latitud y posteriormente, promedios entre varias latitudes (cada 10°) que forman nuestras franjas. Además este trabajo ha supuesto gran carga de programación que previamente había que tener, ya que como hemos visto, hemos trabajado con varios lenguajes y diferentes programas según se requiriera, por ello hemos querido hacer especial énfasis en esto en las conclusiones ya que a la hora de trabajar esta parte es, probablemente, la más engorrosa y larga de todo el estudio.

Los resultados obtenidos han sido por lo general acordes a lo previsto en la teoría. En la primera parte de nuestro análisis (el de la evolución temporal) los resultados no abren mucho debate ya que son literalmente las representaciones de nuestros datos a lo largo del tiempo escogido. En este breve análisis hemos podido comprobar que las concentraciones de ozono estratosférico dependen de la latitud.

Siguiendo con nuestros objetivos, en la parte del análisis latitudinal hemos estudiado cómo es exactamente la dependencia del O_3 con la latitud, que sus máximos se encuentran en primavera y sus mínimos en invierno en el hemisferio norte, y que se pueden dar ligeras variaciones de estos entre algunos años, debido a que tanto la radiación UV como las corrientes estratosféricas no son iguales todos los años. Realmente este apartado ha sido clave para entender cómo es el transporte de ozono en la estratosfera.

Por último en el análisis de las periodicidades hemos llevado a cabo con éxito la representación filtrada de la evolución las concentraciones de O_3 de todas las franjas, por medio de la Transformada de Fourier, al igual que hemos probado su eficacia también se ha manifestado su importancia. Y finalmente hemos encontrado la relación entre el periodo de 11 años de nuestros datos de latitudes ecuatoriales con los de la actividad solar, lo cuál resalta de nuevo la importancia del Sol para los procesos de creación de ozono como la de los fenómenos de transporte estratosféricos para que el ozono se reparta por toda la estratosfera terrestre

Podemos concluir finalmente que gracias a entender el funcionamiento del ozono estratosférico en el hemisferio norte, podemos extrapolar algunos resultados, como por ejemplo el de la no incidencia de la actividad solar a latitudes medias y polares, al hemisferio sur, aunque evidentemente una comprensión más detallada en esta región requeriría su correspondiente análisis de datos, ya que en el hemisferio sur hay fenómenos que pueden cambiar bastante los resultados. Y es que partiendo de que el invierno y el verano no son iguales en el hemisferio norte y en el sur, fenómenos de los que hablamos en la introducción como el vórtice polar o las PSCs tienen mayor efecto, por lo tanto también abrimos una futura línea de investigación respecto a este trabajo.

6. Bibliografía

6.1. Páginas de interés:

- "NASA Ozone Watch: Images, data, and information for atmospheric ozone" (<https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/SH.html>)
- Web del satélite Aura: <https://aura.gsfc.nasa.gov/>
- Aura Spacecraft and Instruments: Ozone Monitoring Instrument (OMI): https://www.nasa.gov/mission_pages/aura/spacecraft/omi.html
- Descarga de datos del OMI: <https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/data/omi/>
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), Sunspot Numbers Data (National Centers of Environmental Information, NCEI): <https://www.ngdc.noaa.gov/stp/solar/ssndata.html>

6.2. Referencias

- Añel Juan A.: *Atmospheric ozone: historical background and state-of-the-art*, EPhysLab, Universidade de Vigo, Ourense, Spain & Smith School of Enterprise and the Environment, University of Oxford, Oxford, UK (2016)
- Bhartia¹, P. K.; McPeters¹, R. D.; Flynn², L. E.; Taylor, S.; Kramarova, N. A. Frith, S.; Fisher, B. and DeLand, M. Laboratory for Atmospheres, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD, USA (2013) *Solar Backscatter UV (SBUV) total ozone and profile algorithm*
- Calle, Abel: *Determinación y Análisis del Contenido Total de Ozono y de la Radiación UV Eritémica Mediante Imágenes NOAA*, 1997
- Cariolle, D; Lasserre-Bigorry, A.; Royer, J. F. : *A general circulation model simulation of the springtime antarctic ozone decrease and its impact on mid-latitudes*, 1990
- Cisneros, J.M. (1989): *La disminución del ozono en la Antártida*. Conferencias de las Jornadas sobre Transporte de Contaminantes a Larga Distancia. Castillo de la Mota, Medina del Campo, Valladolid, octubre 1988. Secretariado de publicaciones de la Universidad de Valladolid.pp.71-80.
- Chen, Z., Li, R., Chen, D., Zhuang, Y., Gao, B. y Yang, L. (2020b). *Understanding the casual influence of major meteorological factors on ground ozone concentrations across China. Journal of Cleaner Production*, 242: 107-116.
- Dessler Andrew E. : *The Chemistry and Physics of Stratospheric Ozone*, 2000 ozone on daily mortality in Spain. *Atmospheric environment*, 187: 107-116.
- Díaz, J., Ortiz, C., Falcón, I., Salvador, C. y Linares, C. (2018). *Short-term effect of tropospheric*
- Farman J. C., Gardiner B. G., Shanklin J. D.: *Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO_x/NO_x interaction*. Published: 01 May 1985
- Gadella M., Nieto L.M. : *Métodos Matemáticos avanzados para ciencias e ingenierías* - Valladolid : Universidad de Valladolid, Secretariado de Publicaciones e Intercambio Editorial, [2000]
- de Graaf, M., Sihler, H., Tilstra, L. G., & Stammes, P. (2016). *How big is an OMI pixel? Atmospheric Measurement Techniques*, 9, 3607-3618.
- Goral, A. K., Raval, S., Patra, A. K. (2020). *Path analysis approach to quantify the casual factors of ground-level ozone concentration near coal-mining regions. International Journal of Environmental Science and Technology*, 17: 645-660.
- Gottschalk C., Libra J.A., Saupe A.: *Ozonation of water and waste water: A practical guide to understanding ozone and its applications*, Book - 2009
- Haigh, Joanna D., Roscoe, Howard K.: *Influences of ozone depletion, the solar cycle and the QBO on the Southern Annular Mode*, 2007

- Hathaway, David H. : *The Solar Cycle*, 2015
- Jacobson Mark Z. : *Fundamental Of Atmospheric Modeling*; Stanford University, California (2005), Cambridge
- KASTING, J. F. and T. M. DONAHUE, T. M.: *Evolution of Oxygen and Ozone in Earth's Atmosphere* (20 Junio 2000)
- Levelt, P. F., van den Oord, G. H. J., Dobber, M. R., Mälkki, A., Visser, H., de Vries, J., Stammes, P., Lundell, J. O. V., and Saari, H.: *The ozone monitoring instrument*, IEEE T. Geosci. Remote, 44, 1093–1101, 2006
- Saha Kshudiram : *The Earth's Atmosphere: Its Physics and Dynamics*; Springer (2008)
- Schoeberl, Mark R; Hartmann, Dennis L. *The dynamics of the stratospheric polar vortex and its relation to springtime ozone depletions*, 1991
- Sillman Sanford : *OVERVIEW: TROPOSPHERIC OZONE, SMOG AND OZONE-NO_x-VOC SENSITIVITY*, University of Michigan (2003).
- Sloan, L. Cirbus; Pollar, D. : *Polar stratospheric clouds: A high latitude warming mechanism in an ancient greenhouse world*, 1998
- Stull Roland: *An Introduction to Boundary Layer Meteorology* (1988)
- Stull Roland: *Practical Meteorology: An Algebra-based Survey of Atmospheric Science*; University of British Columbia, Vancouver, Canada (2017)
- Sunnen Gerard V. , M.D.: *Ozone in Medicine: Overview and Future Directions* First published in the Journal of Advancement in Medicine Fall 1988; Volume 1, Number 3, pp. 159-174 [2]
- Wallace John M., Hobbs Peter V. : *Atmospheric Science: An Introductory Survey, Second Edition*; Academic Press (2006)
- Wilks Daniel S. : *Statistical Methods In The Atmospheric Sciences, Second Edition*; Department of Earth and Atmospheric Sciences, Cornell University (2005)