

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FÍSICA DE LA TIERRA, ASTRONOMÍA Y
ASTROFÍSICA:

Impacto de la meteorología en la
concentración de ozono
troposférico

Autor

Carlos Mougan Navarro

Tutor

Carlos Ordoñez Garcia



Índice

1. Resumen	2
2. Introducción	3
3. Objetivos	6
4. Metodología	7
5. Resultados	10
5.1. Interpretación de las variables obtenidas	12
5.2. Ajuste meteorológico de la concentración de ozono	16
6. Discusión	18
6.1. Crítica al modelo	18
6.2. Posible aplicación del trabajo	20
7. Conclusiones	21

Índice de figuras

1. Diferencia interanual de ozono con y sin ajuste meteorológico .	5
2. Cantidad de Ozono medido en Biella	7
3. Concentración de Ozono y humedad relativa	13
4. Concentración de Ozono y radiación de onda corta	14
5. Concentración de Ozono y la altura del geopotencial	15
6. Concentración de Ozono vs índice de elevación superficial . . .	16
7. Ozono en Biella antes y después de los ajustes metereológicos .	17
8. Residuos frente a valores ajustados	19
9. “QQ plot”	20

Índice de cuadros

1. Variables con mayor varianza explicada para Biella	11
---	----

1. Resumen

El objetivo de este trabajo es analizar las variables meteorológicas más importantes en la variación de la concentración de ozono superficial. El cual es un contaminante que afecta directamente a la salud pública. Para ello seleccionaremos un conjunto de variables meteorológicas que mediante un proceso iterativo iremos eliminando aquellas que nos aporten menos información sobre la variación de ozono. Finalmente tendremos un modelo de 4 variables: el geopotencial en altura a 500 hPa, la humedad relativa, la radiación de onda corta y el índice de elevación superficial. Hemos hecho un análisis cualitativo de la influencia de estas variables en el ozono troposférico. Finalmente, hemos concluido con unas sugerencias para mejorar el método y con las posibles aplicaciones que se le podrían dar a los resultados de este trabajo.

Abstract

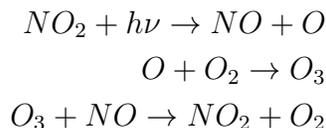
The aim of this work is to analyse which are the most relevant variables to determine the ozone concentration, which is one important pollutant that affects human health. We selected meteorological variables and using an iterative process we have deleted those variables which provided less information on the ozone variation. We finally chose a 4 variable model which provided the most meaningful information: the short wave flux, geopotential height at 500 hPa, relative humidity and surface lifted index. A qualitative analysis of those variables has been done. Finally we have given some guidance on how to improve the model and discussed some possible applications of this work.

2. Introducción

La contaminación del aire se debe a una combinación de altas emisiones de contaminantes y una meteorología desfavorable. Debido a que entramos en una época de cambio climático acelerado las implicaciones de este en la calidad del aire deben ser estudiadas con el propósito de entender sus consecuencias.

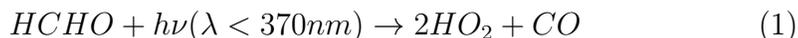
El ozono superficial y las partículas en suspensión (PM) son dos de los contaminantes atmosféricos que más conciernen a la salud pública.

- El ozono se produce en la troposfera por la oxidación fotoquímica del óxido de carbono (CO), metano y compuestos orgánicos volátiles (COV). En ausencia de COVs se encuentra en un estado estacionario conocido como “photochemical steady state”. Este equilibrio crea ozono al mismo tiempo que lo destruye y es un proceso complicado en el que intervienen diversos factores y elementos. Podemos ver de forma simplificada una aproximación en la siguiente ecuación.



Este estado estacionario se ve modificado en presencia de COVs, los cuales se oxidan para producir radicales peróxilos (HO_2), óxidos de nitrógeno y (NO_x). Deja así de estar en un estado estacionario y aumenta la producción de ozono troposférico.

Un ejemplo sería el de la fotólisis del formaldehidos, pues en estos hace falta una radiación incidente para que se altere el estado estacionario de la atmósfera produciendo ozono.



Este ecuación es un ejemplo sencillo de los procesos fotoquímicos de la atmósfera que por lo general son bastante más complicados.

La principales factores que hacen que aumente el ozono troposférico son la temperatura y la estabilidad atmosférica (Ordoñez et al., 2005)

El tiempo de vida del ozono en la troposfera oscila desde unos pocos días en la capa límite hasta varias semanas en la troposfera libre.

- Las partículas en suspensión (PM) principalmente son: sulfato, nitrato, carbón orgánico, carbón elemental, polvo y aerosol marino. Las primeras 4 componentes son partículas finas con un diámetro menor a $2,5\mu m$ y estas influyen mucho en la salud humana. Las PM son generalmente vistas como un problemas de la calidad del aire durante todo el año. La variación por temporadas es compleja y con una dependencia local. La disminución de PM viene principalmente asociada a la precipitación, al aumento de la altura de la capa límite planetaria (CLP) y a los vientos intensos.

Durante los meses de verano, en condiciones de estabilidad atmosférica, las concentraciones cercanas a la superficie de ozono pueden alcanzar altos niveles, causando daño a la salud, a la vegetación y a los materiales.

Debido al aumento de las emisiones de precursores de ozono en Europa y en el mundo industrial durante el periodo comprendido entre 1950 y 1990 (Staehelin et al., 1994), las concentraciones de ozono superficial en las zonas rurales han aumentado en un factor dos.

Como consecuencia del calentamiento global se espera que la producción de O_3 aumenten en las regiones contaminadas. La variación de la emisión de ozono con la temperatura queda determinada por la presencia de varios factores. La dependencia de estos factores con la temperatura es difícil de determinar como intentaremos explicar en las próximas secciones 5.1.

Las emisiones de contaminantes a la atmósfera en general pueden agruparse de la siguiente manera.

Antropogénicas. Son las emisiones producidas por el ritmo de vida del ser humano. Estas pueden depender o no de la temperatura. Por ejemplo, las producidas por la emisión de los gases de los vehiculos debido al tráfico diario no dependen de la temperatura. Hay otras que sí dependen como puede ser la evaporación de los gases contaminantes en una gasolinera.

Biogénicas. La dependencia de estas emisiones con la temperatura a pesar de estar cuantificada tiene una gran incertidumbre (Guenther, 1993) Por ejemplo, la evaporación o la emisión natural de las plantas a la atmósfera sí depende de factores meteorológicos como la temperatura. La vegetación es una emisora importante de COVs.

Existe una gran variación interanual de las variables meteorológicas. Tiene sentido estudiar la variación anual pues afecta directamente a las concentra-

ciones diarias de contaminantes atmosféricos, como podemos ver en la Figura 1. En esta imagen trataremos de ver la importancia de ajustar la cantidad de O_3 a las condiciones meteorológicas.

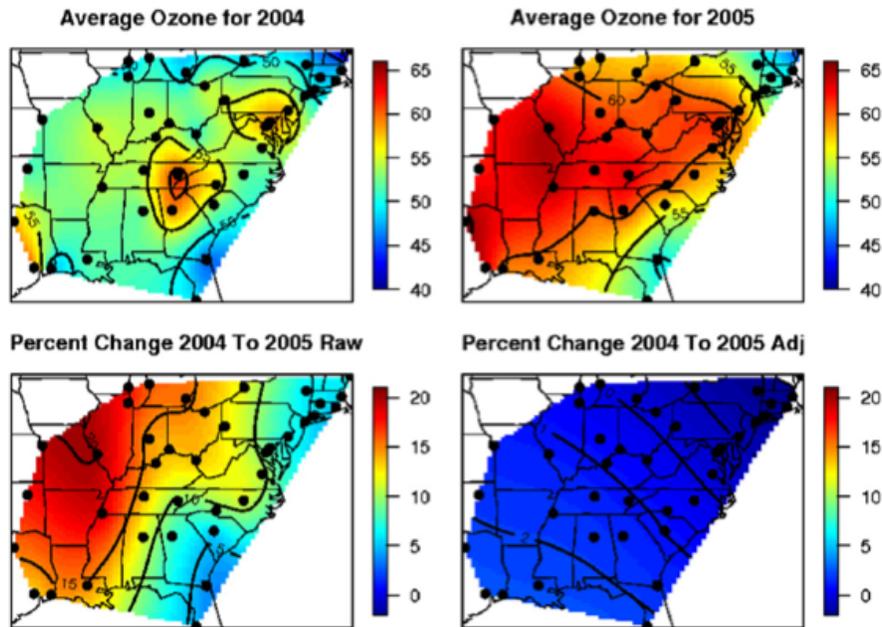


Figura 1: En las dos gráficas superiores se representa la media de ozono en 2004 y 2005. Las dos gráficas inferiores muestran el porcentaje de diferencia de Ozono antes y despues del ajuste meteorológico

La figura 1 nos muestra la importancia de usar un ajuste meteorológico cuando observamos la variación de ozono. Esta gráfica pertenece a un estudio realizado por (Camalier et al., 2007) en la zona este de Estados Unidos. Observamos en los dos cuadrantes superiores que la concentración de ozono en 2005 es muy superior a la concentración en 2004 . La concentración de ozono en 2004 solo está entorno a las 60 partículas por billón (ppb) en una zona pequeña en comparación con 2005 en la que la concentración de ozono es superada en la mayor parte de la zona continental. La gráfica inferior izquierda nos muestra la variación porcentual entre 2004 y 2005, observándose que en el interior del continente la variación está entorno a un 15-20 %. Tras ajustar con las variables meteorológicas la variación de un año a otro se ve profundamente modificada dónde no se llegan a alcanzar los valores de 5 %.

Por ello, podemos concluir que las diferencias entre 2004 y 2005 en esta zona de Estados Unidos son debidas principalmente a la meteorología y no a la variación de las emisiones de los compuestos precursores.

La correlación de la concentración de contaminantes con la meteorología ha sido un campo de estudio durante las últimas 30 décadas, con tres objetivos principales

1. Eliminar el efecto de la variabilidad meteorológica en los análisis a largo plazo sobre la tendencia de la calidad del aire.
2. Crear modelos empíricos para la previsión de predictores de calidad del aire.
3. Conseguir una mejor percepción de los procesos que afectan a las concentraciones de contaminantes.

Trataremos de centrar nuestro estudio en los meses de verano, pues son los más afectados por la concentración de ozono debido a las altas temperaturas. Como podemos ver en el estudio de Elminir (2005), la concentración media de O_3 en Junio en la ciudad de El Cairo, es de $79\mu gm^{-3}$ y la concentración en diciembre $6\mu gm^{-3}$. Este incremento en la concentración de ozono se debe a los mecanismos de producción fotoquímica del ozono, que son catalizados debido a la alta intensidad de radiación solar; mientras las bajas concentraciones en invierno se deben a una baja intensidad de radiación solar.

3. Objetivos

El objetivo principal de este Trabajo de Fin de Grado es estudiar el efecto de la variación de la meteorología en relación con los contaminantes atmosféricos en la ciudad de Biella, Italia.

A la vista de la influencia de la meteorología en las concentraciones de contaminantes, trataremos de hacer correcciones a la cantidad de ozono medido.

Finalmente, trataremos de determinar si la variación interanual de ozono medido en la atmósfera depende de los factores meteorológicos o de otras fuentes como pueden ser las emisiones antropogénicas o industriales.

Partiremos inicialmente del siguiente gráfico (Figura 2), que nos permite ver la concentración de ozono troposférico que hay en la ciudad de Biella entre los años 1998 y 2012.

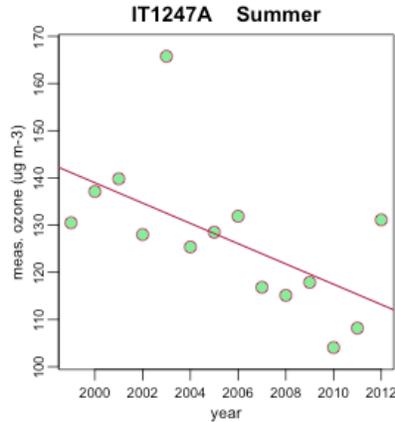


Figura 2: Evolución de las concentraciones de ozono (μgm^{-3}) medido en la ciudad de Biella entre los veranos de los años 1998 y 2012

4. Metodología

Trataremos de usar un modelo estadístico lineal que intente ajustarse a la variación de ozono en función de la meteorología. Este modelo no es del todo correcto pues tanto la producción de ozono como el tiempo de residencia de este en la atmósfera no son lineales. Como consecuencia de ellos será complicado que nos ajustemos a los valores medidos.

Cada variable desempeña un rol único en cada estación meteorológica pues los efectos de los diferentes parámetros van cambiando en función de la estación y de la época del año (Ordoñez et al., 2005).

En este TFG nos centramos en la estación de Biella en Italia durante los meses de verano que son los más afectados por la contaminación de Ozono debido, en principio, a las altas temperaturas que nos permiten tener mayores valores de correlación.

Los parámetros estimados por este modelo nos proveen una visión general a la respuesta del ozono con cada variable meteorológica.

Los datos meteorológicos que se van a emplear son los publicados por el National Center for Environmental Prediction (NCEP) y el National Center for Atmospheric Reanalysis (NCAR). Estos datos son accesibles desde la web Earth System Research Laboratory Los datos usados provienen de campos interpolados para todo el globo a una malla regular de 2.5° de resolución

espacial y varios niveles de altura, aunque el reanálisis proporciona hasta 17 niveles verticales en la atmósfera y en algunas variables resoluciones espaciales inferiores a 2.5° (Kalnay et al., 1996). Los datos usados son el resultado de la asimilación de diferentes medidas (sondeos, radiosondeos, datos de satélites, datos observados en superficies y océanos, medidas tomadas desde aviones, ...) en un modelo físico que, a su vez, realiza la interpolación para obtener los datos sobre una malla regular.

Utilizaremos series temporales con promedios diarios.

- Una media móvil de las 8 horas en un día en la que las concentraciones medidas de ozono alcanzan los niveles más altos.
- Variables meteorológicas; $x_1, x_2, x_3 \dots$, procedentes de un reanálisis NCEP/NCAR.

Filtraremos los datos para usar sólo los meses de verano (junio, julio y agosto) que son aquellos donde las temperaturas son más altas y obtendremos mayores valores de correlación.

Usaremos un modelo de regresión lineal simple, con el objeto de ver que variables $x_1, x_2, x_3 \dots$ determinan la variabilidad de las concentraciones superficiales de O_3 de un día a otro.

$$MDA8O_3 = a + b \cdot x_1 + c \cdot x_2 + d \cdot x_3 \dots \quad (2)$$

Para ellos se utilizará el método de eliminación hacia atrás paso a paso (backward stepwise regression). No sólo es relevante la meteorología sino que también hay factores que pueden ser relevantes como el que sea día laborable o fin de semana. Así se observa en nuestro modelo lineal:

$$O^3 = a + b \cdot T + c \cdot Rad + d \cdot u + e \cdot v \dots \quad (3)$$

No es importante el orden de magnitud de los coeficientes del ajuste dado que van multiplicados por la magnitud de cada variable.

Tras introducir todas las variables en el modelo procederemos de forma iterativa a ir eliminando una a una la variable cuya probabilidad de que el coeficiente sea cero sea mayor.

Este proceso iterativo, que utiliza un análisis de variables (estadístico F de Fischer), parará una vez que las variables que nos queden tengan el siguiente coeficiente de probabilidad nulo:

$$p = 10^{-8} \rightarrow prob = (1 - p) * 100 = 0,9999999 \quad (4)$$

Esta es una medida muy restrictiva pues buscamos quedarnos solo con las pocas variables que contengan la mayor información posible.

En nuestro modelo lineal los residuos son igual a la diferencia entre la predicho y lo observado. Si el modelo es robustos los residuos serán aleatorios.

Las variables utilizadas en el código son las siguientes:

vwnd - Viento zonal a 10 m Este viento está tomado a una altura de 10 metros. Las unidades son metros por segundo. Este viento va de Oeste a Este. Las unidades son m/s .

vwind - Viento meridional 10m Este viento está tomado a una altura de 10 metros. Las unidades son metros por segundo. Este viento va de Sur a Norte. Las unidades son m/s .

uwind850 - Viento zonal a un altura geopotencial de 850 hPa (aproximadamente 1500m).Las unidades son m/s .

vwind850 - Viento meridional a una altura geopotencial de 850hPa. Las unidades son m/s .

rhum - Humedad relativa. Es la presión de vapor de agua respecto a la presión de vapor de saturación $HR = \frac{e}{e_w(T)} (\%)$.

shum - Humedad Específica. Fracción de masa de vapor de agua respecto a la masa de aire húmedo $q \equiv \frac{m_v}{m}$ a una altura de 2 metros.(g/kg)

dlwrf - Flujo Incidente Radiativo de Onda Larga. Las unidades son W/m^2 .

dswrf - Flujo Incidente Radiativo Solar. Las unidades son W/m^2 .

tcdc - Porcentaje del cielo cubierto por nubes. Está generalmente correlacionado con la duración de la luz solar. La cobertura del cielo en la termodinámica de la atmósfera juega un papel importante en el balance de energía pues las nubes reflejan parte de la radiación solar.(%)

prate - Índice de precipitación ($Kg/m^2/s$)

cprate - Índice de precipitación convectiva, producida cuando el aire asciende por diferencia de temperatura a causa de un calentamiento local (ascensión convectiva). Este calentamiento produce una disminución de la densidad del aire y, por consiguiente, el ascenso del mismo. En este ascenso del aire inestable se forman nubes de desarrollo vertical, dando lugar en determinados casos a precipitación. ($Kg/m^2/s$)

slp - Presión a nivel del mar. En regiones montañosas la diferencia de presión entre distintos observatorios varía principalmente por la altura de estos. Para elaborar mapas de presión en zonas con diferente topografía reducimos los valores de presión a un nivel de referencia, el nivel medio del mar. (hPa)

hgt - Altura del Geopotencial a la altura de 500hPa. El geopotencial ϕ en cualquier punto de la atmósfera se define como el trabajo que debe realizarse contra la fuerza de la gravedad necesario para elevar una masa de aire desde el nivel del mar hasta dicho punto. En concreto la altura típica de un geopotencial de 500hPa es de aproximadamente unos 5500 metros de altura.

lftx - Surface Lifted Index, es la diferencia de temperatura entre la temperatura ambiente y la temperatura de una parcela que asciende adiabáticamente hasta una presión de 500hPa. Es un indicador de estabilidad en la atmósfera, cuando el valor dado es positivo la atmósfera es estable y cuando es negativo inestable. (K)

5. Resultados

Los parámetros obtenidos en el modelo que hemos usado nos proporcionan una pequeña percepción de cómo responde el ozono a cada variable meteorológica en la estación de Biella.

Cada variable desempeña un valor único explicando las variaciones de ozono. Por ejemplo, hemos observado que el aumento de temperatura estaba relacionado con el aumento de ozono mientras que el aumento del viento zonal estaba relacionada con la disminución de la concentración de ozono.

Inicialmente para poder ver la diferencia entre un modelo lineal y un modelo no lineal, hemos introducido en nuestro modelo lineal únicamente la variable T y en otro modelo T^2 . En el modelo de temperatura únicamente

Variabes	Coeeficientes
Radiación de onda corta (swf)	++
Humedad Relativa (hr)	-
Geopotencial a 500hPa (hgt)	++
Indice de elevación superficial	-

Cuadro 1: Variables con mayor varianza explicada para Biella

observamos una determinación de R^2 de un 0.3586, mientras que en el de T^2 observamos una correlación de un 0.4025. Por ello podemos decir que experimentalmente el cuadrado de la temperatura predice más que la temperatura en modo lineal.

Nuestro modelo es lineal, lo que lo hace un modelo muy sencillo. Por ello no podemos exigirle correlaciones muy altas. Hemos usado la variable no lineal T^2 , pero podríamos hacer uso de modelos mucho más complicados. Observamos que la temperatura depende mejor de forma cuadrática que lineal, esto se debe a que en la naturaleza los procesos de producción de ozono son complejos. Y los procesos naturales no tienen por que ser lineales, como podemos comprobar experimentalmente son no lineales.

Utilizando un modelo muchos más complejo que se ajustase a los parámetros de producción de Ozono podemos encontrar correlaciones mucho más altas. Como es el caso del artículo (Camalier et al., 2007) donde se encuentran resultados con una correlación de hasta 0.80.

Tras introducir las 14 variables descritas anteriormente y ejecutando el código (ver sección 4) que nos irá eliminando iterativamente las variables cuyo coeficiente es mayor que cero, obtenemos que las variables que nos dan más información para el Ozono en Biella son cuatro :

La varianza explicada por el modelo inicial es de un 55.46 %. Tras imponer el restrictivo coeficiente de $p = 10^{-8}$ obtenemos que únicamente con las cuatro variables mencionadas anteriormente la varianza es de 54.46 %. Vemos que aunque hayamos despreciado 10 variables, la pérdida de información es únicamente de un 1 %. Esto se debe a que hay muchas variables que o bien contienen información redundante o bien no influyen la variabilidad de ozono. No es importante el orden de magnitud de los coeficientes del ajuste dado que van multiplicados por la magnitud de cada variable.

5.1. Interpretación de las variables obtenidas

Observando los resultados obtenidos en el modelo final vemos que el índice de elevación superficial y la humedad relativa decrecen linealmente con la concentración de ozono. Debido a que el ozono tiene una respuesta no lineal para la mayoría de las variables, cuantificar este porcentaje es difícil, por lo que intentaremos dar una respuesta más cualitativa a los resultados de nuestro procedimiento estadístico.

Podemos entender que altos niveles de humedad están usualmente asociados a una alta abundancia de nubes y a inestabilidad atmosférica. La abundancia de nubes impide la penetración de la radiación solar lo que hace que los procesos fotoquímicos sean ralentizados y el nivel de ozono troposférico descienda. La inestabilidad atmosférica por lo general viene asociada con precipitaciones que realizan un proceso de barrido de los contaminantes de la atmósfera. Esto podemos verlo en la gráfica 3.

En ella podemos ver cómo la concentración de ozono presenta una dependencia positiva con la radiación. El coeficiente de determinación de la humedad específica con la concentración de ozono es de un 0.23.

Hemos encontrado que la radiación solar es mejor indicador que la temperatura debido a que esta aumenta la velocidad de las reacciones fotoquímicas en los diferentes procesos de fotoxidación de la atmósfera. Para nuestro caso particular, hemos obtenido una clara tendencia positiva de la radiación solar con el ozono. Como sabemos el ozono está relacionado directamente con los procesos fotoquímicos. Altas concentraciones de ozono son asociadas con altas radiaciones solares.

La radiación es un factor determinante en los procesos de producción de ozono, como podemos ver en la gráfica 4. En ella observamos cómo a medida que va aumentando la radiación incidente vamos obteniendo mayores valores de contaminación.

La otra variable con un índice de correlación alto es el geopotencial. El geopotencial, que lo hemos definido en la sección de metodología 4, nos da un coeficiente positivo. Esto quiere decir que a medida que tenemos un mayor geopotencial tenemos una mayor concentración de ozono.

El geopotencial a escala sinóptica, en este caso, es una medida de estabilidad de la atmósfera. Haciendo un análisis cualitativo un alto geopotencial nos está dando información de que estamos en una situación estable meteorológica usualmente asociada a tiempos despejados donde la radiación incidente será mayor. Como hemos comentado antes una mayor radiación incidente fo-

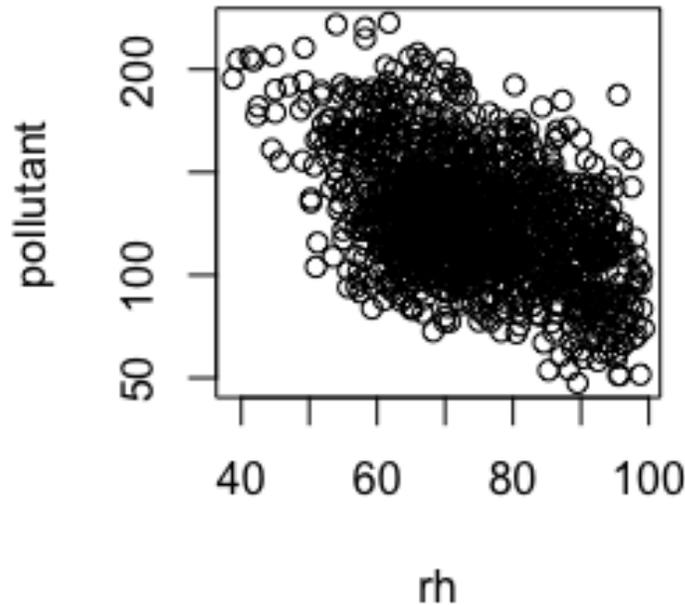


Figura 3: Representación gráfica de la concentración de Ozono (pollutant) (μgm^{-3}) respecto a la humedad relativa

menta la estimulación de los procesos de creación de ozono en la atmósfera.

Por otro lado, una mayor estabilidad atmosférica favorece el estancamiento de las masas de aire, lo que permite que se acumulen los precursores y reaccionen durante mas tiempo. De esta manera se contribuye a una mayor concentración de la cantidad de ozono en la atmósfera.

En la figura 5 podemos observar cómo a medida que la altura del geopotencial va aumentando obtenemos valores de concentración de ozono más elevados. Esto, como hemos dicho antes, se debe a la mejor penetración de la radiación solar y al aumento del tiempo para que ocurran los procesos químicos que dan lugar al ozono.

La última variable obtenida por el modelo, [ltx] indice de elevación su-

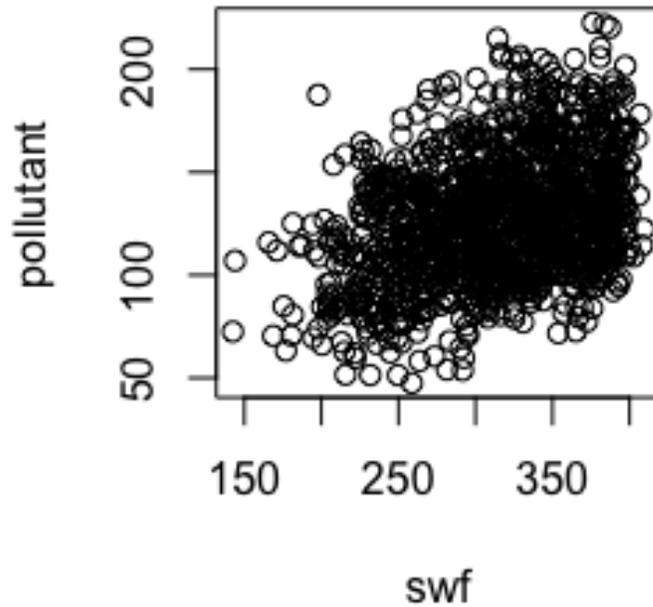


Figura 4: Representación gráfica de la concentración de ozono (pollutant) ($\mu g m^{-3}$) respecto a la radiación de onda corta (W/m^2)

perficial, que es la diferencia de temperatura entre la temperatura ambiente y la temperatura de una parcela que asciende adiabáticamente hasta una presión de 500hPa. Es un indicador de estabilidad en la atmósfera, cuando el valor dado es positivo la atmósfera es estable y cuando es negativo inestable. Observando la tabla 1 podemos ver que el coeficiente de determinación tiene un valor negativo.

El índice de elevación como hemos definido anteriormente, es una medida indirecta de la temperatura y está usualmente asociada a la convección. A altas temperaturas la radiación térmica del suelo calienta la parcela de aire en el estrato más bajo, pudiendo provocar así una precipitación convectiva. Por eso, decimos que es una medida indirecta de la temperatura que nos

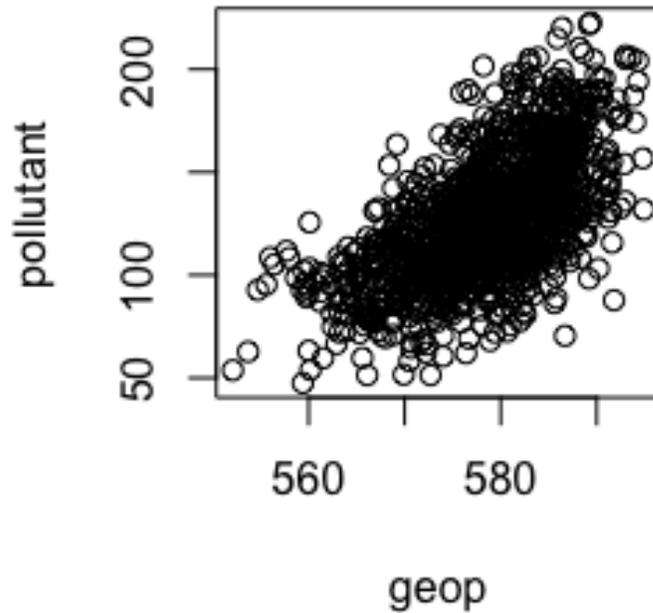


Figura 5: Representación gráfica de la concentración de ozono (pollutant) (μgm^{-3}) respecto a la altura del geopotencial(dam)

indica también la presencia de una inestabilidad atmosférica. En la figura 6 podemos ver como depende la concentración de ozono troposférico con el índice de elevación superficial. Observamos que no esta relación no es tan evidente como en los otros casos, vease por ejemplo la figura 3.

La correcta explicación de esta variable es muy complicada dado que es un mecanismo metereológico no intuitivo.

En esta sección hemos visto y analizado como influyen nuestras variables en la concentración de ozono. Observando las gráficas, en las que se ha representado de forma individual cada variable respecto a la concentración de ozono, vemos de forma intuitiva cual será el signo del coeficiente de determinación de cada variable.

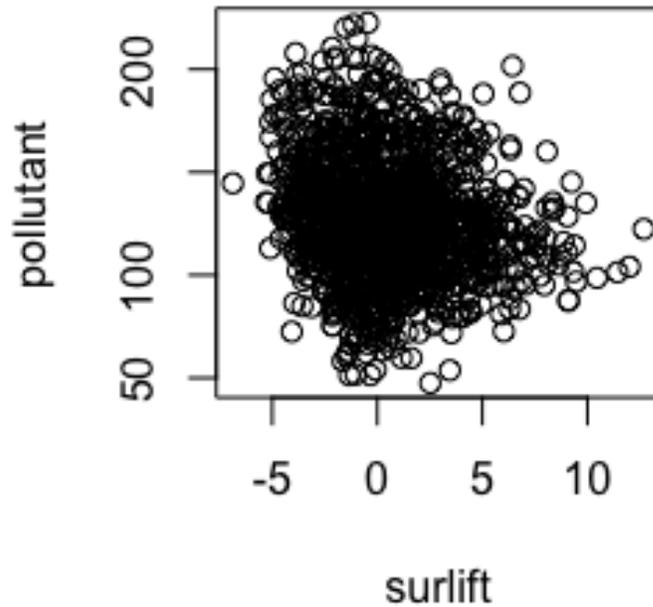


Figura 6: Representación gráfica de la concentración de ozono (pollutant) (μgm^{-3}) respecto al índice de elevación superficial

5.2. Ajuste meteorológico de la concentración de ozono

Uno de los objetivos de este tfg era poder hacer correcciones meteorológicas a la concentración de ozono medido. Podremos ver así si la variación de ozono troposférico se debe a una meteorología desfavorable o a la producción de este. En la sección 3 incorporamos la gráfica 2, en la que podíamos observar la concentración de ozono medido en la estación de Biella. Tras elegir las variables meteorológicas más determinantes para esta estación y realizar un ajuste con la ecuación (5) podemos realizar una gráfica con la nueva cantidad de ozono ajustado.

$$O_{3,ajustado} = \overline{medido} + (medido - predicho) \quad (5)$$

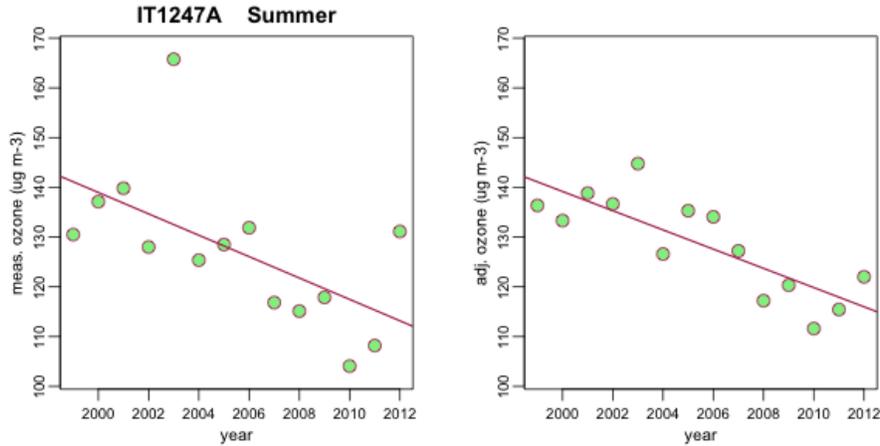


Figura 7: Representación gráfica de la concentración de ozono antes y después de realizar el ajuste meteorológico

Observando la figura 7 observamos que ciertos puntos se han acercado al promedio. Esto puede interpretarse como que durante esos años las situaciones desfavorables de meteorología fomentaron la aparición de ozono troposférico en la atmósfera.

Uno de estos puntos fue en 2003, en el que vemos cómo se pasa de valores de $160\mu\text{g m}^{-3}$ a valores de $145\mu\text{g m}^{-3}$ tras el ajuste meteorológico. Este año hubo una intensa ola de calor (Schär et al., 2004), que hizo que las temperaturas fueran más altas de lo normal y aumentase inusualmente la concentración de ozono. Esta ola de calor fue provocado por una situación anticiclónica con valores altos de geopotencial. Como hemos visto en la interpretación de variables obtenidas 5.1, altas temperaturas y altos valores de geopotencial incrementan la concentración de ozono en la atmósfera. Se estima que esta ola de calor (García-Herrera et al., 2010) estuvo relacionada con unas 40,000 muertes, principalmente personas de edad avanzada.

6. Discusión

6.1. Crítica al modelo

Como hemos dicho en las secciones anteriores (4), hemos usado un modelo lineal para intentar explicar la variación de la concentración de ozono con las variables meteorológicas. Esta variación responde a mecanismos complejos y no lineales. A pesar de esto hemos obtenido un coeficiente de R^2 de 0.5446 con solo 4 variables, mientras que con 14 variables obteníamos 0.5546. Para mejorar este modelo podríamos mejorar varios factores.

- Inicialmente algunas de las variables obtenidas mediante el reanálisis NCEP/NCAR no siguen una distribución gaussiana la cual sería la óptima para el ajuste estadístico. Un ejemplo sería la precipitación pues esta no sigue ningún parámetro predefinido. Para mejorarlo podríamos usar modelos no lineales, utilizar transformaciones logarítmicas (Wilks, 2011)
- Respecto a los datos de reanálisis usados, hemos usado unos datos procedentes del reanálisis de una malla 2.5° que equivale a una celda de unos 300km de lado. Nuestra estación se encuentra en una zona de gran variación orográfica (Prevot et al., 1997), de modo que la aproximación de una malla de 300km no es del todo precisa.

Atendiendo a la figura 8, podemos ver los valores ajustados frente a los residuos. El modelo es una buena aproximación si los residuos generados son aleatorios, como es el caso. En los valores extremos (iniciales y finales) el promedio se desplaza ligeramente hacia arriba, por lo que en estas zonas las aproximaciones no son de tan buena calidad. Para profundizar los errores de los extremos atenderemos a la gráfica 9, conocida como “QQ plot”.

En estadística una gráfica Q-Q es un gráfico de probabilidad, el cual es un método gráfico de comparar dos distribuciones de probabilidad representando una frente a otra. Si las dos distribuciones comparadas son idénticas la gráfica seguirá una línea de $y = x$. Si ambas distribuciones están linealmente relacionados la gráfica seguirá una línea que no es necesariamente la línea $y = x$. Si la tendencia de la gráfica Q-Q está menos inclinada que la línea $y = x$ la distribución representada en el eje horizontal está más dispersa que la distribución vertical. En el caso contrario si la inclinación es mayor la distribución vertical está más dispersa que la distribución horizontal. En

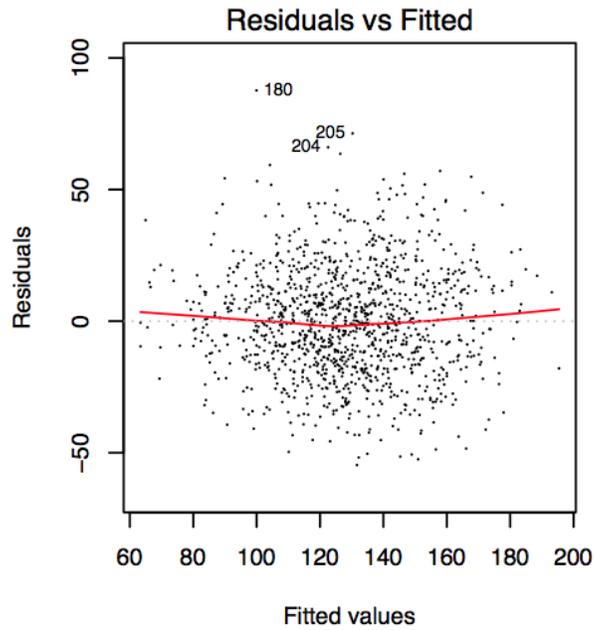


Figura 8: Representación gráfica de los residuos obtenidos frente a los valores ajustados

nuestro caso observamos que se ajusta correctamente, excepto en las zonas inferiores y superiores. Esto se debe a que el nuestro es un modelo lineal, y los fenómenos naturales no han de comportarse linealmente, por eso los extremos tienden a diverger. También puede deberse a que nuestro modelo solo tiene las 4 variables que le aportan mayor información, incorporando más variables estos extremos podrían ajustarse.

Esto nos puede ayudar a entender la relevancia de las variables obtenidas. Por ejemplo el geopotencial a 500hPa se encuentra a una altura sobre el nivel del mar de 5600m, ya perteneciente a la escala sinóptica, y a estas alturas las variaciones orográficas son de menor importancia. Mientras que en la temperatura, la diferencia entre una zona y otra es mayor y más en zonas montañosas. Si hubiéramos usado como datos la temperatura en superficie observada frente a la temperatura procedente de un reanálisis hubiéramos obtenido probablemente otros resultados. Este hecho no facilita el entendimiento de que se haya obtenido como una variable con un alto índice de

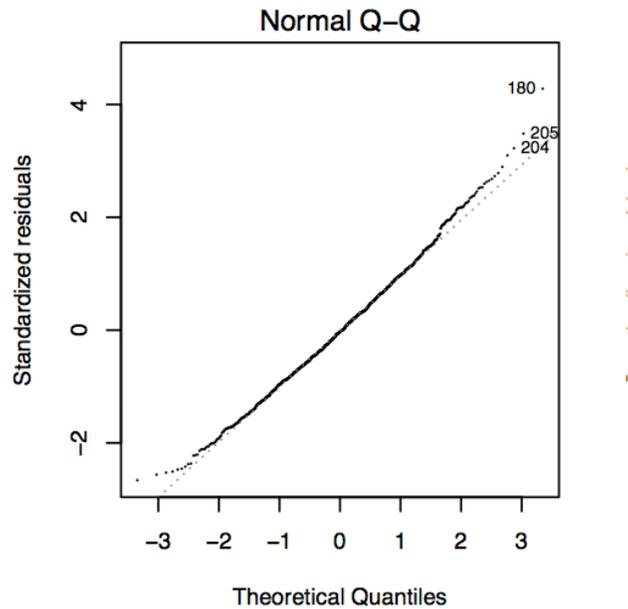


Figura 9: Representación gráfica del “QQ plot”

varianza explicada (R^2) el índice de elevación superficial, pues los fenómenos convectivos ocurren generalmente a una escala más local.

6.2. Posible aplicación del trabajo

Como hemos dicho anteriormente, en la sección 2, la variación de la concentración de contaminantes se debe a dos factores principales: la emisión de contaminantes y meteorología.

- Con los datos obtenidos podemos extraer la variación de concentración debido a la meteorología e intentar quedarnos principalmente con la variación debido a la emisión. Esto es relevante dado que la variación meteorológica interanual tiene efectos importantes en la contaminación como podemos ver en la figura 1.

Observando la gráfica 7 vemos que hay una tendencia en la concentración de ozono a que vaya disminuyendo cada año. Esto es útil pues así podemos comprobar si los principales emisores de precursores de

ozono y derivados (industrias, vehículos, residuos . . .) han disminuido su emisión de contaminantes. Este parece ser el caso de la ciudad de Biella como podemos ver en la figura 7, en la que observamos como la concentración de ozono ha ido disminuyendo anualmente.

- Otra posible aplicación sería la prevención de los picos diarios de máxima concentración de ozono. Ya hemos visto cuales son los factores que favorecen la concentración de ozono en una determinada zona. Observando la meteorología futura podemos determinar si nos encontramos ante una situación posible de altas concentraciones de contaminantes. Esto es un método más sencillo, pero no tan eficiente, que correr un modelo tridimensional con parametrizaciones físicas y químicas con objeto de predecir las concentraciones.

7. Conclusiones

En este trabajo de fin de grado hemos intentado estudiar cómo han variado las concentraciones de ozono con las diferentes variables meteorológicas.

Tras realizar un modelo estadístico lineal e ir eliminando una a una las variables menos significativas, nos hemos quedado finalmente con las cuatro que nos han dado mas información sobre la variabilidad de las concentraciones de ozono de un día a otro debido a la meteorología: la altura geopotencial a 500hPa, la radiación de onda corta, la humedad relativa y el índice de elevación superficial.

Hemos hecho un análisis cualitativo (sección 5.1) sobre los coeficientes de las variables obtenidas (ver tabla 1), viendo que tenemos dos indicadores positivos y dos negativos. Los valores positivos del coeficiente de determinación, nos predicen que la concentración de ozono irá aumentando a medida que estas variables vayan aumentando. Con valor positivo hemos obtenido la altura geopotencial (figura 5) y la radiación incidente de onda corta (figura 4) ambos son indicadores de estabilidad atmosférica. Respecto a los coeficientes negativos hemos obtenido la humedad relativa (figura 3) y el índice de elevación superficial (figura 6) ambos son indicadores de inestabilidad atmosférica. Hemos conseguido finalmente un valor de R^2 de 0.5446 usando únicamente estas variables.

Referencias

- Louise Camalier, William Cox, and Pat Dolwick. The effects of meteorology on ozone in urban areas and their use in assesing ozone trends. *Atmospheric Environment*, 41(7127-7137), 2007.
- Hamdy K. Elminir. Dependence of urban air pollutants on meteorology. *Science of the Total Environment*, 350:225–237, 2005.
- Ricardo Garcia-Herrera, J. Diaz, and J. Luterbacher. A review of the european summer heat wave 2003. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 40:10.1080/10643380802238137, 2010.
- Alex Guenther. Isoprene and monoterpene emission rate variability: model evaluations and sensitivity analyses. *Journal of Geophysical Research*, 98: 1–6, 1993.
- E. Kalnay, M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woollen, Y. Zhu, A. Leetmaa, R. Reynolds, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowiak, K. C. Mo, C. Ropelewski, J. Wang, Roy Jenne, and Dennis Joseph. The ncep/ncar 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77(3):437–471, 1996.
- Carlos Ordoñez, H. Mathis, M. Furger, and J. Staehelin. Changes of daily surface ozone maxima in switzerland in al seasons from 1992 to 2002 and discussion of summer 2003. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 5(1187-1203), 2005.
- André S.H. Prevot, Johannes Staehlin, and Gregoy L.Kok. The milan photooxidant plume. *Journal of Geophysical Research*, 102(D19):23,375–23,388, 1997.
- Christoph Schär, Pier Luigi Vidale, Daniel Lüthi, Christoph Frel, Christian Häberli, Mark A. Liniger, and Christof Appenzeller. The role of increasing temperature variability in european summer heatwaves. *Nature*, 427:332–336, 2004.
- J. Staehelin, N. R. P. Harris, and C. Appenzeller. Ozono trends. *Review of Geophysics*, 39:231–290, 1994.

D Wilks. Statistical methods in the atmospheric sciences. *Cambridge University Press*, 100, 2011.