

MÁSTER EN
TECNOLOGÍAS
AVANZADAS PARA EL
DESARROLLO
AGROFORESTAL

TRABAJO FIN DE MASTER

Análisis y representación de las medidas de la red
AERONET



Universidad de Valladolid

Ramiro González Catón



Índice

1. Introducción	1
1.1. Medidas Radiométricas	3
1.2. Redes AERONET y RIMA	3
1.3. Proyecto AEROPA	5
2. Objetivos	6
3. Metodología	7
3.1. Herramientas informáticas	7
3.1.1. Lenguaje de programación R	8
3.1.2. Base de Datos MySQL	8
3.2. Interpolación	9
3.2.1. Kriging	9
3.2.2. Inverse Distance Weighting (IDW)	9
3.3. Proyección geográfica	10
3.3.1. Indicatriz de Tissot	11
4. Resultados y Discusión	13
4.1. Selección de la proyección	13
4.1.1. Proyección Aitoff	15
4.1.2. Proyección Gall-Peters	15
4.1.3. Proyección Lambert	16
4.1.4. Proyección Rectangular	16
4.2. Interpolación	17
4.3. Aplicación de Máscara	21
5. Conclusiones	22
6. Líneas Futuras	23



Índice de figuras

1.	Ejemplos de aerosoles	2
2.	Comportamiento del factor P de reducción de pesos.	10
3.	Indicatrices de Tissot para distintas proyecciones geográficas	12
4.	Proyecciones cartográficas utilizadas.	14
5.	Distorsiones de la proyección Aitoff.	15
6.	Distorsiones de la proyección Gall-Peters.	16
7.	Distorsiones de la proyección Lambert.	17
8.	Distorsiones de la proyección Rectangular.	18
9.	Variación del parámetro p del método de interpolación IDW.	19
10.	Influencia de cada estación con el parámetro $p = 2$	21
11.	Mapa del AOD a 500 nm aplicada una máscara de 500 km al re- dedor de cada estación.	22



Resumen

Dentro del campo de los estudios atmosféricos, y más en concreto, del estudio de los aerosoles atmosféricos y la red AERONET, surge la idea de tener una visión global del comportamiento espacial de estos aerosoles. Para ello el GOA-UVa, encargado de la calibración y gestión de una parte importante de la red AERONET, y apoyado en la herramienta CÆLIS y en la extensión que almacena la base de datos del proyecto AEROPA, decide desarrollar una herramienta que genere de forma automática mapas interpolados para representar distintas variables.

Los mapas obtenidos por medio de esta herramienta representarán variables atmosféricas obtenidas de los instrumentos con que se mide en la red AERONET y abarcarán todo el territorio que cubre las estaciones incluidas en el proyecto AEROPA, es decir, Europa, y no más de este territorio.

Con la integración de herramientas de información geográfica en el proceso de creación de los mapas se consigue una interpolación y representación de los datos perfectamente georeferenciada en un sistema de proyección cartográfico.

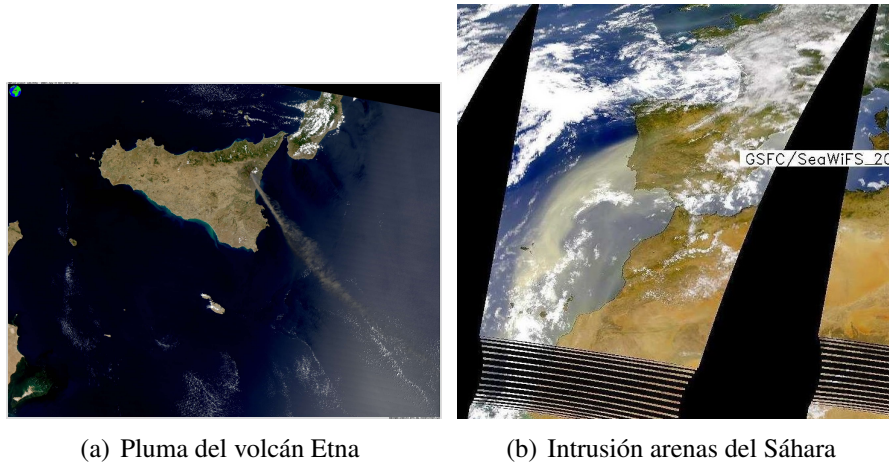
Keywords: Aerosol, AOD, Mapas, Interpolación, AERONET, AEROPA

1. Introducción

Este proyecto está enmarcado dentro del ámbito del estudio de aerosoles atmosféricos, se entiende como aerosol atmosférico el conjunto de partículas, sólidas o líquidas, que se encuentran suspendidas en la atmósfera, durante un tiempo suficiente para ser medidas (Toledano, 2005).

Estos “aerosoles”, término coloquial por el cual se conoce a los aerosoles atmosféricos (Willeke and Baron, 1993), tienen diversos orígenes: contaminación industrial, incendios, contaminación de vehículos, etc. Pero el mayor aporte de aerosoles a la atmósfera es de origen natural: sales marinas, ceniza de los volcanes, polen, minerales procedentes de los desiertos, etc (figura 1). En total, diariamente se emiten a la atmósfera varios millones de toneladas de partículas.

La importancia del estudio de estas partículas radica en su influencia directa en el clima (y por lo tanto en el cambio climático) al modificar el balance de la radiación (o radiativo) terrestre. Si bien la influencia de los aerosoles no es la más relevante (existen gases, como el vapor de agua, que afectan en un 60 % al cambio



(a) Pluma del volcán Etna

(b) Intrusión arenas del Sáhara

Figura 1: Ejemplos de aerosoles

climático) si es la que mayor incertidumbre tiene sobre sus efectos en el clima (Solomon et al., 2007).

Cada tipo de aerosol se comporta de diferente manera, debido a las propiedades físicas y químicas del aerosol. Las propiedades físicas (ópticas) son absorción y dispersión (scattering). Según esta clasificación un aerosol muy dispersivo conseguirá una disminución de la radiación que llega a la superficie de la Tierra y por tanto, a nivel climatológico, un descenso de la temperatura media. Sin embargo, un aerosol muy absorbente calentará la atmósfera de forma local, apreciándose una subida de temperatura en la zona. Además de estos efectos, también hay que tener en cuenta los efectos indirectos, como el cambio que producen en el proceso de formación de nubes, alargando su vida (mayor cantidad de agua en la atmósfera) y aumentando su reflectancia. El estudio del comportamiento de los aerosoles servirá para entender mejor estos procesos permitiendo crear modelos que permitan predecir ciertas características a partir de otras.

La presencia de aerosoles en la atmósfera es altamente variable, desde unos pocos micro gramos por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en aire muy limpio hasta los 1.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de una atmósfera muy contaminada. La mayor parte de los aerosoles se concentran en la baja troposfera, es decir, cerca del suelo, hasta 1-2 km de altura. Las partículas incorporadas a la atmósfera desde fuentes naturales o antropogénicas son eliminadas de la atmósfera por diversos mecanismos como lluvia o la simple acción de la gravedad.



1.1. *Medidas Radiométricas*

Dentro de las posibilidades para la medida de las propiedades de los aerosoles de la atmósfera podemos distinguir dos grandes grupos: medidas in-situ y las medidas realizadas por métodos de detección remota. Este trabajo se centra en las medidas realizadas por un fotómetro solar, en concreto el fotómetro solar CIMEL CE-318. Dentro de las medidas que realizan estos instrumentos, que están situados en la superficie terrestre, se encuentran las medidas de irradiancia solar transmitida que se puede entender como la cantidad de luz que atraviesa la atmósfera. Conociendo la irradiancia solar que hay fuera de la atmósfera, extraterrestre, se puede obtener uno de los parámetros más importantes dentro de la óptica atmosférica que es el espesor óptico total, ver ecuación (1).

$$E(\lambda) = E_0 * e^{-\tau * m} \quad (1)$$

Donde $E(\lambda)$ es la irradiancia solar espectral media en la superficie terrestre, E_0 es la irradiancia solar media extraterrestre (espectro solar fuera de la atmósfera), τ es la extinción y m se conoce con el nombre de masa óptica que se puede entender como la razón entre el camino óptico de los rayos del sol si éste estuviera en la vertical y el camino óptico real. La ecuación (1) se conoce como la ley de Beer-Bouguer- Lambert (Shaw, 1983).

Este espesor óptico total es la suma de varias contribuciones: el scattering por moléculas (o Rayleigh), la absorción por gases y la extinción por aerosoles. Por tanto, llegados a este punto podemos definir el espesor óptico de aerosoles restando al espesor óptico total la contribución de las moléculas y gases:

$$\tau_a(\lambda) = \tau - \tau_r - \tau_g \quad (2)$$

Donde τ_a es el espesor óptico de aerosoles, τ_r es la contribución del Rayleigh y τ_g hace referencia a la absorción por gases.

Otra de las medias que se manipulan en este trabajo es el vapor de agua precipitable (PWV). Ésta se define como la altura que alcanzaría el vapor de agua existente en toda la columna vertical atmosférica si este se condensara en el suelo (medido en cm) (Ortiz de Galisteo, 2011).

1.2. *Redes AERONET y RIMA*

La red AErosols RObotic NETwork (<http://aeronet.gsfc.nasa.gov>) (AERONET) (Holben et al., 1998) fue establecida por el GSFC-NASA y el Laboratoire d'Optique Atmospherique (LOA) de la Universidad de Lille (Francia) como una federación



de redes de ámbito regional o nacional basada en instrumentos localizados en tierra (estaciones) para la monitorización de los aerosoles atmosféricos. Según los enunciados propios de AERONET, el programa debe proveer series continuas en el tiempo de medidas de aerosoles y sus propiedades microfísicas y radiativas, fácilmente accesibles y dedicadas, tanto a la caracterización de los aerosoles, como a la validación de datos obtenidos mediante satélite, y otros objetivos como la sinergia con otras redes de medida. La filosofía es la de una red científica a la vez que operacional, es decir, debe generar series continuas y a largo plazo. Los datos son producidos en varios niveles de calidad correspondiendo el nivel 1 a los datos procesados en tiempo real, 1.5 datos en tiempo real filtrados de nubes y el nivel 2 a datos de calidad asegurada que han sido revisados por NASA y validados. Este último nivel es el que NASA recomienda para el uso de la información en publicaciones científicas pero están disponibles en torno a un año y medio después de ser medidos. Este plazo no sólo corresponde al tiempo de revisado de la información sino que hay que esperar a tener toda la metainformación con que se genera el dato estable. Esto significa, por ejemplo, en el caso del coeficiente de calibración que se debe esperar a que exista un coeficiente de post-calibración que es obtenido cuando el instrumento se quita de la estación para su mantenimiento.

Esta red nace ante la necesidad de sistematizar la observación remota de los aerosoles atmosféricos para validar las medidas de satélite. Empezó a operar en 1996 y se fue expandiendo gracias a instituciones nacionales e internacionales de carácter básicamente científico. Actualmente engloba una federación de redes bajo el nombre general de AERONET, como la red PHOTONS de Francia, AEROCAN de Canadá y la Red Ibérica de Medidas fotométricas de Aerosoles (<http://www.rima.uva.es>) (RIMA) de la Península Ibérica, entre las más importantes. Para asegurar el éxito de una red con cobertura a nivel mundial como es ésta (actualmente hay operativos más de 450 estaciones repartidas por todo el planeta) se requieren unos estándares en cuanto a la instrumentación, calibración y tratamiento de los datos. La implementación de un estricto protocolo garantiza la intercomparación directa de la información obtenida. Siguiendo estos estándares y con el mismo objetivo se creó en España en 2004 la red RIMA por iniciativa de varias universidades (Universidad de Valladolid, Granada, La Laguna, Valencia, Politécnica de Barcelona, Évora en Portugal, Extremadura, etc.) e instituciones como la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), Instituto Nacional de Técnica Espacial (INTA) y Centro de Investigaciones Energéticas y Medioambientales, CIEMAT). Desde su inicio este programa fue desarrollado y gestionado por el Grupo de Óptica Atmosférica de la Universidad de Valladolid (<http://goa.uva.es>) (GOA-UVa). Actualmente la red francesa PHOTONS y



RIMA componen la infraestructura AERONET-EUROPE que da servicio a la mayor parte de las estaciones europeas y del Norte de África.

Los datos de la red AERONET proporcionan observaciones globales y prácticamente en tiempo real de los parámetros que definen las características de los aerosoles (más de 40 parámetros) a nivel de columna, siendo el espesor óptico de aerosoles (AOD) el índice básico de estos datos. La importancia de la red radica en la variedad de estaciones con condiciones y tipos de aerosoles muy diversos: marítimos, desérticos, árticos, contaminación urbana e industrial, etc. Los datos recogidos, enviados vía satélite o internet, se procesan en el GSFC-NASA y están disponibles en internet para todo tipo de usuarios de manera libre y gratuita.

1.3. Proyecto AEROPA

La finalidad del proyecto AEROPA (<http://www.caelis.uva.es/aeropa/>) es establecer una serie de recomendaciones para un correcto y eficiente uso de los datos generados por la red AERONET, dentro de los objetivos y propósitos de la red europea EMEP (European Monitoring and Evaluation Programme o Cooperative Programme for Monitoring and Evaluation of the Long-Range Transmisión of Air Pollutant in Europe, <http://www.emep.int/>). Uno de estos objetivos es el desarrollo, aplicación y operatividad de una versión simplificada del modelo "Unified EMEP model", <http://www.emep.int/OpenSource/index.html>, para estimar el espesor óptico de aerosoles. El modelo general es un modelo de transporte químico que estima los niveles de concentración de los componentes atmosféricos trazando el transporte de la contaminación atmosférica transfronteriza (long-range transport) a escala global, regional, local. La versión simplificada estima el espesor óptico de aerosoles, lo que requiere un modelo de aerosoles que evalúe esta propiedad radiativa. Tradicionalmente esta no ha formado parte de los modelos CTM, pero actualmente se ve como una necesidad para la caracterización global de las propiedades de los aerosoles.

Así, este proyecto se diseña en función de esa necesidad en lo que se refiere a la disponibilidad y análisis de los datos de espesor óptico de aerosoles y otras propiedades de la red AERONET en el ámbito geográfico europeo para la comparativa con este modelo EMEP/MS-CW. Para ello se definen en este proyecto los siguientes objetivos:

- (a) Diagnostico sobre la calidad de los datos de AERONET en Europa y el Norte de África para la caracterización de los aerosoles y desarrollo de una base de datos relacional.



- (b) Caracterización de la evolución temporal de los datos de espesor óptico de aerosoles y parámetro alfa (AOD-alfa), a nivel Europeo y su representatividad climatológica.
- (c) Comparación de los datos AOD-alpha con el modelo EMEP del WSC-W en el ámbito geográfico de Europa sobre la base de los diferentes niveles de calidad proporcionados por AERONET.
- (d) Análisis de la sensibilidad del algoritmo de determinación del AOD a los parámetros locales (presión, ozono, nubosidad) en su comparación con el modelo EMEP del WSC-W.
- (e) Discriminación y clasificación de los tipos de aerosoles en Europa en base a sus propiedades ópticas y su origen.

Este proyecto nos permitirá establecer una serie de recomendaciones dirigida a los gestores de políticas medio-ambientales, atmósfera y otros elementos que contribuyen al estudio del cambio climático debido a los aerosoles.

2. Objetivos

El objetivo de este trabajo es desarrollar una herramienta informática capaz de crear una representación geográfica de cómo se comportan las variables atmosféricas antes mencionadas a lo largo del territorio abarcado por el proyecto AEROPA. Estos objetivos se puede sintetizar del siguiente modo:

- Crear un mapa, debidamente proyectado, del territorio abarcado por el proyecto AEROPA, utilizando para ello herramientas GIS.
- Obtener los datos de una variable concreta de todas las estaciones presentes en la base de datos de AEROPA para un periodo de tiempo deseado, para luego, con todos los datos, crear una interpolación para completar las zonas donde no haya datos.
- Cada una de la estaciones únicamente tendrá un área de influencia, de 500 km, por lo que si un punto no tiene ninguna estación a menos de 500 km no tendremos ninguna información de como se comporta esa variable en dicha zona.

Tanto la interpolación como la proyección utilizada tendrá que ser lo mas realista posible, para ello:



- La interpolación utilizada deberá ser verificada, y elegir la interpolación que mejor se adapte a grandes superficies, ya que vamos a considerar un territorio del tamaño de Europa.

Por otro lado, el resultado de la interpolación deberá estar proyectado de igual forma que el mapa dibujado y georeferenciado para que cada uno de los puntos encaje con los puntos del mapa y poder ser comparado con otras imágenes sin lugar a confusión.

- La proyección tendrá que ser una proyección que permita ver, de la forma mas realista posible, el territorio deseado, toda Europa. Para ello habrá que elegir una proyección que no deforme notablemente ninguna de las zonas deseadas, o dar la opción de elegir entre distintas proyecciones durante el proceso.

Finalmente, y siguiendo con la filosofía del GOA-UVa en el que se desarrolla el trabajo, todas estas herramientas deberán ser desarrolladas para poder ser utilizadas y ejecutadas en un servidor UNIX, para su posterior implantación en los sistemas que diariamente utilizan los miembros del GOA-UVa y la comunidad científica a la que sirve.

3. Metodología

Para poder satisfacer todos los objetivos descritos arriba se procede a crear una herramienta informática que, introduciendo una fecha de inicio, una de fecha de finalización, una variable a calcular y la proyección que deseamos tenga el mapa, nos genere una imagen con dicha variable interpolada para todo el territorio y proyectada en la proyección seleccionada.

Para llevar a cabo estas tareas se han seleccionado una serie de herramientas informáticas y tomado unas decisiones a la hora de calcular y representar las variables que, a nuestro parecer, eran mas convenientes para realizar dicha tarea. Estas herramientas y decisiones se describen a continuación.

3.1. Herramientas informáticas

Las herramientas utilizadas para llevar a cabo las tareas han sido principalmente dos. Por un lado, y ya que la base de datos de AEROPA está almacenada en una Base de Datos Relacional MySQL tendremos que hacer uso de esta base de datos, y del Lenguaje de Consulta Estructurado (SQL), y por otro lado, para el tratamiento y preparación de los datos utilizaremos el lenguaje de programación R.



3.1.1. *Lenguaje de programación R*

Para realizar las tareas de tratamiento y preparación de los datos y su posterior interpolación y representación gráfica se ha decidido utilizar el lenguaje de programación R (Venables et al., 2015). R es un lenguaje, basado en el lenguaje libre S, diseñado para en análisis estadístico y gráfico. Al estar orientado a la estadística y al tratamiento de gráfico proporciona un amplio abanico de herramientas para realizar estas operaciones. Otra característica de R es que es un lenguaje interpretado, lo cual quiere decir que no tiene que ser compilado cada vez que se quiera ejecutar en una máquina distinta, bastará con ejecutar el script que desarrollemos en este trabajo.

La decisión de utilizar este lenguaje de programación fue que, al estar preparado y diseñado para el tratamiento de datos gráficos, realiza de manera mas rápida y eficiente las tareas de interpolación y su posterior representación en un mapa georeferenciado.

Se comparó, su funcionamiento, con otros lenguajes de programación, como Python, y con herramientas GIS (Sistemas de Información Geográfica) como QGIS o ARCGIS y se llegó a la conclusión que:

- El lenguaje de programación Python requería de una llamada al propio lenguaje R para realizar la interpolación de los datos, como se muestra en muchos tutoriales, ya que la interpolación realizada por Python es más lenta y compleja.
- Los paquetes GIS carecían de herramientas para el tratamiento y preparación inicial de los datos, al menos de herramientas gratuitas y que puedan ser implementables en un servidor, como es el objetivo de este trabajo.

Por todos estos motivos se decidió utilizar el lenguaje de programación R para el preprocesado y posterior tratamiento de datos.

3.1.2. *Base de Datos MySQL*

Una base de datos se define como un conjunto de datos pertenecientes a un mismo contexto y almacenados sistemáticamente para su posterior uso. Debido al desarrollo informático la mayor parte de bases de datos actuales están en formato digital. Existen programas, que se conocen como Sistema Gestor de Bases de Datos (DBMS), que permiten almacenar y acceder, de manera rápida, eficiente y estructurada, a los datos.

Uno de estos DBMS es MySQL (the MySQL Core Team, 2015), el cual cumple con las propiedades de ser relacional, multihilo y multiusuario.



Aprovechando que el sistema CÆLIS (Fuertes Cocho, 2010) trabaja con un DBMS MySQL, y el proyecto AEROPA también está almacenado en MySQL, vamos a hacer uso de este sistema, y del SQL para acceder a la información guardada procedente de los datos medidas en la red AERONET

3.2. Interpolación

La interpolación espacial es un método para calcular el valor en un punto concreto del espacio partiendo de los valores de esa misma variable en otros puntos del espacio (Paredes Hernández et al., 2013). Existen dos grandes categorías en las que se clasifican los métodos de interpolación: Métodos determinísticos y Métodos probabilísticos.

Los métodos determinísticos utilizan información de las propiedades físicas de la variable para calcular el valor de cada celda, mientras que los probabilísticos hacen uso de las muestras disponibles para calcular los valores de las celdas. El método determinístico más utilizado es el IDW, mientras que el método probabilístico más utilizado es el Kriging.

3.2.1. Kriging

El Kriging es un método de interpolación geoestadístico que se basa en la descripción de la variación espacial de los datos que se generan mediante un variograma. Esta técnica se basa en que la variación espacial de los datos en la rejilla sigue un mismo patrón. Existen gran variedad de modalidades de este método de interpolación, de las cuales las más utilizadas son:

- Kriging simple
- Kriging ordinario
- Cokriging

3.2.2. IDW

El método IDW usa la función inversa de la distancia para calcular los pesos para cada uno de los valores de la celda (Murillo et al., 2012), este método parte de la premisa de que las cosas que están más cerca son mas parecidas y por ello tienen un peso e influencia mayor sobre el punto a calcular.

Este método hace el cálculo de los pesos según la función (3)

$$\lambda_i = \frac{d_{i0}^{-p}}{\sum_{i=1}^N d_{i0}^{-p}} \quad (3)$$

Donde d_{i0} es la distancia al resto de puntos y P es un factor de reducción de peso que se comporta suavizando la función como podemos ver en la figura 2.

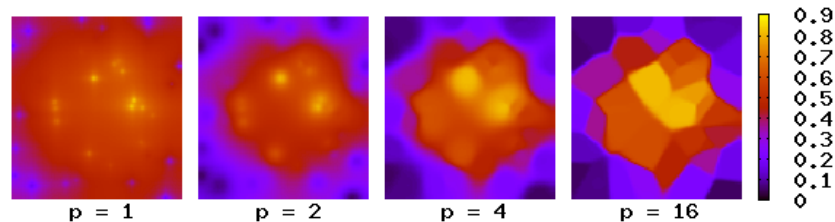


Figura 2: Comportamiento del factor P de reducción de pesos.

En nuestro caso, por un lado, no tenemos un grid de datos con los datos distribuidos de manera uniforme, y por otro lado, consideramos que las variables a representar pierden influencia según se van acercando de la fuente, es decir, tendrá que tener mas peso sobre el punto a calcular una variable que este a 50 km que una que esté a 200 km.

Por estos motivos, y vistas las características de cada uno de los métodos de interpolación, se ha decidido utilizar el método de interpolación IDW.

3.3. Proyección geográfica

Se considera la proyección como un sistema de representación gráfico que establece una relación entre los puntos de la superficie terrestre, curva, con los puntos de una superficie plana. Esta representación plana de la esfera terrestre es lo que conocemos como mapa.

Existen muchos tipos de proyecciones, de los cuales solo describiremos algunos, pero todos ellos se pueden clasificar en tres grandes grupos en función de la superficie sobre la que se realiza la proyección, estos tipos son:

- Proyección cilíndrica: se proyecta la superficie terrestre sobre un cilindro. El problema de esta proyección es la distorsión que se observa en las zonas de latitud elevada. De todas, la más utilizada es la proyección mercator.
- Proyección cónica: se proyecta la superficie terrestre sobre un cono cuyo vértice estará situado en uno de los polos. Esta proyección presenta grandes distorsiones según te vas acercando al ecuador. Entre las proyecciones cónicas más utilizadas están la proyección cónica simple, o la proyección de Lambert.



- Proyección azimutal, cenital o polar: se proyecta una porción de la superficie terrestre sobre un plano tangente a un punto seleccionado. Según te vayas alejando del punto seleccionado se verán distorsiones cada vez más grandes. Las proyecciones más utilizadas de esta categoría son la proyección ortográfica o la proyección estereográfica.

Todos y cada uno de los tipos de proyecciones que existen cumplen que, o son equidistantes y conservan la distancia, o son equivalentes y conservan la superficie, o son conformes y conservan las formas, pero nunca podrán cumplir las tres propiedades.

3.3.1. *Indicatriz de Tissot*

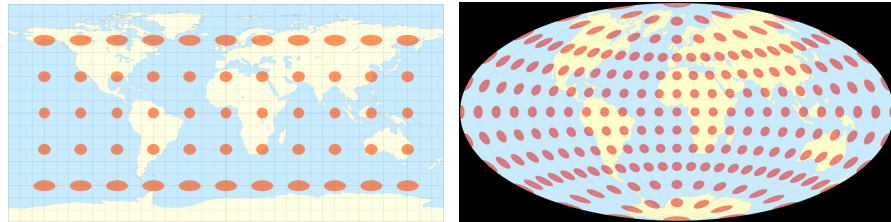
La indicatriz de Tissot, o elipse de distorsión es un concepto que trata de medir e ilustrar las distorsiones causadas por las proyecciones cartográficas (Goldberg and Richard Gott III, 2011). Esta figura es el resultado de proyectar un círculo, de una unidad de radio, de la superficie terrestre sobre un plano, esta figura normalmente es una elipse, pero depende de la proyección utilizada, si estamos utilizando una proyección conforme las indicatrices de Tissot serán todas círculos aunque su tamaño variará en función de la zona donde nos hallemos y si estamos utilizando una proyección equivalente las indicatrices de Tissot tendrán el mismo área aunque la forma y orientación variará en función de la ubicación.

Cuanto más se parezcan a un círculo estas proyecciones más real será la proyección en el mapa de la superficie real.

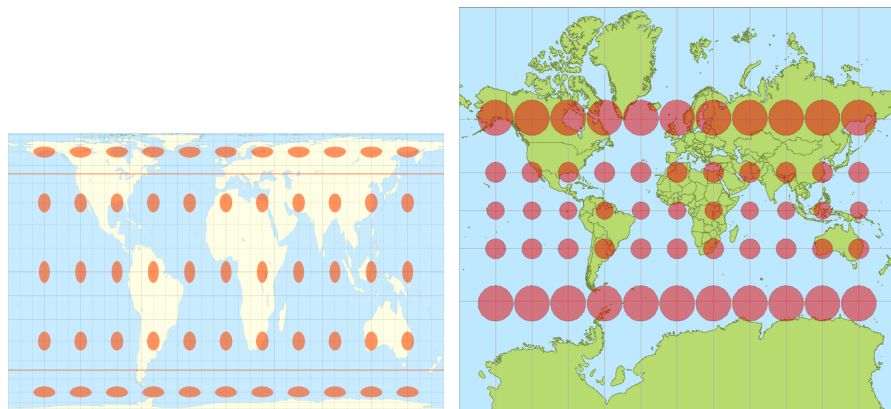
En la figura 3 podemos ver la representación de Tissot de distintas proyecciones.

Debido a todas estas propiedades, las proyecciones que vamos a utilizar son básicamente 4.

- Proyección Rectangular (Lat Long): Esta proyección es una proyección cilíndrica que trata de representar el globo terrestre suponiendo que los meridianos son líneas paralelas y verticales y los paralelos son circunferencias todas ellas de la misma longitud. Esta proyección tiene distorsiones de distancia y área.
- Proyección Aitoff: Se trata de una proyección azimutal modificada que no conserva ni las distancias ni las formas. Esta proyección tiene la peculiaridad de, al representar toda la superficie terrestre, ser una elipse el doble de



(a) Indicatriz de Tissot proyección Rectangular (Lat Long) (b) Indicatriz de Tissot proyección Aitoff



(c) Indicatriz de Tissot proyección Gall-Peters (d) Indicatriz de Tissot proyección Mercator

Figura 3: Indicatrices de Tissot para distintas proyecciones geográficas

ancha que de alta. La dirección norte sur solo es constante en el meridiano central, mientras que la dirección este-oeste lo es en todos los paralelos.

- Proyección de Gall-Peters: Es una proyección equiárea, aunque no conserva las distancias ni los ángulos. En esta proyección las menores distorsiones se presentan en las latitudes medias, zona donde vive una gran mayoría de la población mundial, aunque no conserva la forma de los países.
- Proyección Lambert: Se trata de una proyección constante, es decir, conserva las distancias. Se trata, básicamente, de una proyección cónica en la que se toman dos meridianos de referencia para proyectar, en los meridianos de referencia la distorsión es nula, y esta aumenta según nos vamos alejando de los meridianos de referencia. La dirección norte-sur solo se conserva en el centro del mapa, mientras que la dirección este-oeste no se conserva en



ninguno de los paralelos, al representarse estos curvados.

- Proyección Mercator: Esta proyección es una proyección cilíndrica que pretende representar la superficie terrestre sobre un cilindro tangente al ecuador. Esta proyección no conserva ni las áreas ni las distancias, pero al ser una proyección cilíndrica cumple la propiedad que para cualquier lugar del mundo la dirección norte sur aparece en la vertical. Otra propiedad positiva es que para zonas muy localizadas las distorsiones son muy pequeñas.

4. Resultados y Discusión

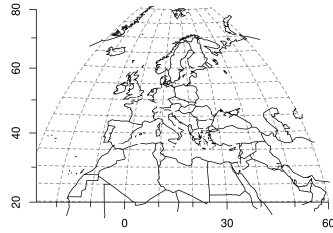
Los resultados obtenidos son un conjunto de herramientas informáticas que permiten la creación de mapas que, atendiendo a las especificaciones descritas anteriormente, nos conducen a la representación óptima para el objetivo que estamos tratando. En este punto tenemos que diferenciar dos criterios, por un lado tendremos que probar que los métodos de interpolación y proyección seleccionados para la creación del mapa son coherentes y válidos a lo largo de todo el proceso, lo cual vamos a demostrar, y por otro lado, tendremos que seleccionar una representación que permita apreciar, de manera realista, las áreas y superficies de la zona que estamos estudiando, Europa. Hay que destacar que este último punto es un tanto subjetivo, y llegado un punto lo que para una persona es una representación correcta para otra puede no serlo tanto, y viceversa.

4.1. Selección de la proyección

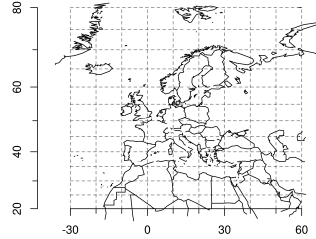
De todas las proyecciones existentes en la bibliografía (McIlroy et al., 2014) hemos seleccionado un conjunto de ellas, las mostradas en la figura 4, de las que seleccionaremos tan solo cuatro proyecciones permitidas por el programa desarrollado. Estas proyecciones son:

- Aitoff.
- Gall-Peters.
- Lambert.
- Rectangular.
- Gilbert.
- Mercator.
- Sinusoidal.

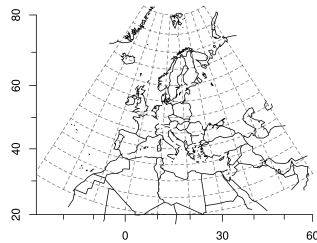
De todas estas proyecciones nos vamos a quedar con las proyecciones de Aitoff, Gall-Peters, Lambert y Rectangular por ser las más realistas para nuestra zona de influencia. A continuación, para cada proyección, dibujaremos un círculo a tres



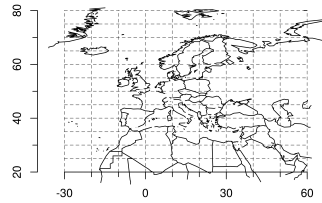
(a) Proyección Aitoff



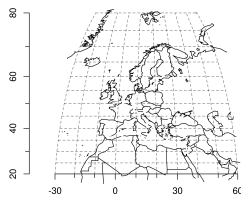
(b) Proyección Gall-Peters



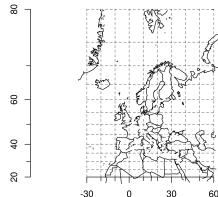
(c) Proyección Lambert



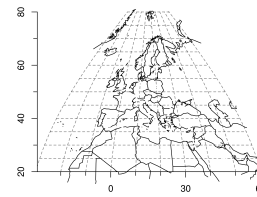
(d) Proyección Rectangular



(e) Proyección Gilbert



(f) Proyección Mercator



(g) Proyección Sinusoidal

Figura 4: Proyecciones cartográficas utilizadas.

latitudes distintas (más elevada, mas baja y una latitud media) para poder observar las distorsiones que se producen y compararlas con las indicatrices de tissot. Con este método podremos ver si estamos proyectando correctamente tanto el mapa como los puntos que vamos a dibujar, y de esa forma ver si las proyecciones seleccionadas son o no representativas para nuestra zona.

4.1.1. *Proyección Aitoff*

Como ya hemos mencionado anteriormente esta proyección no es conforme, lo cual quiere decir que deforma las áreas, tan solo va a proyectar un círculo en el punto central del mapa, en nuestro caso, como no abarcamos el punto con coordenadas latitud 0 y longitud 0, todos los círculos deberán mostrarse como elipses, teniendo mas excentricidad en latitudes elevadas, y menos excentricidad en latitudes bajas. Este comportamiento se puede apreciar en la figura 5.

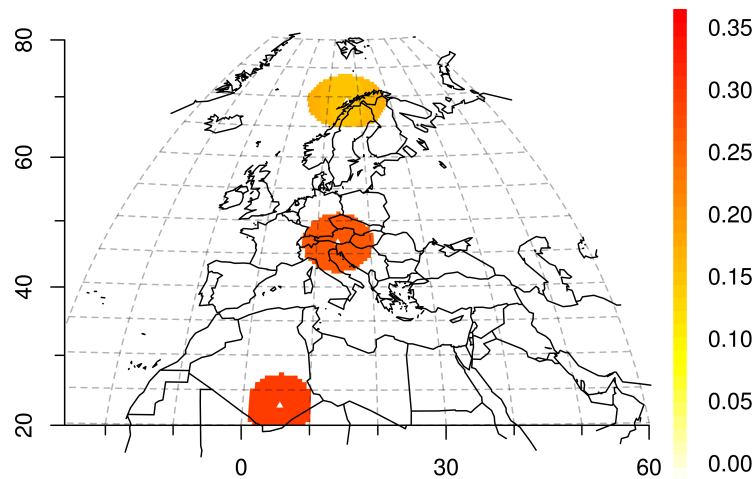


Figura 5: Distorsiones de la proyección Aitoff.

4.1.2. *Proyección Gall-Peters*

Esta proyección es una proyección cilíndrica que conserva las áreas, esto hace que se pueda comparar el tamaño de objetos distantes. Esta proyección va a



producir distorsiones tanto verticales como horizontales, siendo mucho mas pronunciadas en latitudes elevadas. Este comportamiento es el que se puede apreciar en la figura 6.

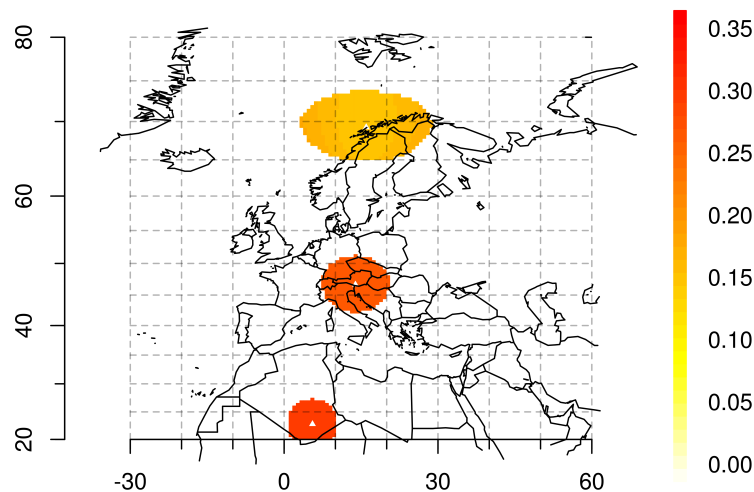


Figura 6: Distorsiones de la proyección Gall-Peters.

4.1.3. *Proyección Lambert*

Esta proyección es conforme, lo cual quiere decir que conserva las formas, si bien las áreas no las conserva. Por ese motivo, como se puede observar en la figura 7, los círculos proyectados conservarán la forma en cualquier punto del mapa donde estemos, mientras que el tamaño será mayor para latitudes mas elevadas e irá aproximándose al tamaño real según nos acerquemos a latitudes mas bajas.

4.1.4. *Proyección Rectangular*

La proyección rectangular es una proyección cilíndrica que se realiza proyectando la superficie terrestre sobre un cilindro tangente al ecuador, por este motivo las formas presentarán mas distorsión horizontal para latitudes elevadas. Eso es lo que podemos observar en la figura 8.

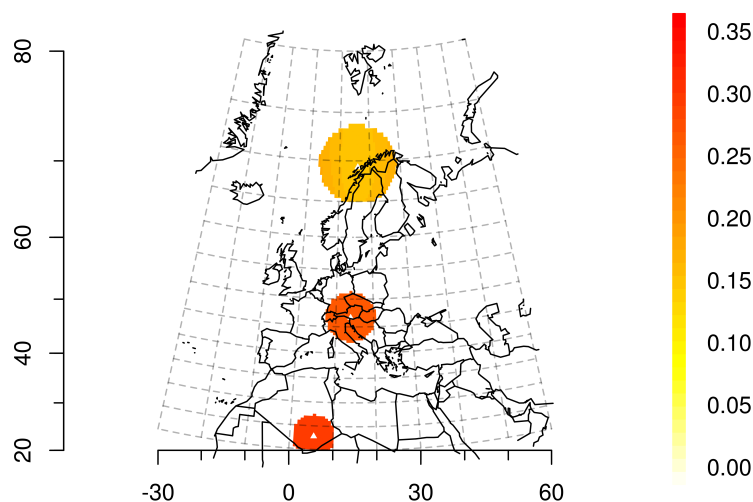


Figura 7: Distorsiones de la proyección Lambert.

4.2. Interpolación

El método de interpolación IDW calcula cada uno de los puntos en función del resto de puntos, dando a cada punto un peso específico que relaciona la distancia entre los puntos a calcular y los utilizados. Para rebajar o incrementar la influencia que sobre el punto a calcular tienen el resto de puntos utiliza un factor de ponderación (p) que se puede variar en el método. Vamos a comprobar como se comporta este factor cambiándole el valor y viendo sus efectos.

En la figura 9 vamos a ver los promedios diarios para el AOD medido a 500 nm y proyectado sobre Europa utilizando una proyección rectangular. Se puede ver como según se va aumentando el valor del parámetro p la influencia de cada estación sobre el resto del mapa aumenta considerablemente.

Una vez que hemos realizado un análisis visual del comportamiento del parámetro vamos a pasar a realizar un análisis desde un punto de vista más numérico. Para ello vamos a quitar una estación de los valores iniciales y comprobar el valor que la interpolación da a esta estación. Para seleccionar una estación de cuyos resultados nos podamos fiar tendremos que seleccionar una estación que se encuentre cerca de estaciones similares. Por un lado, quitamos la estación de Autilla del

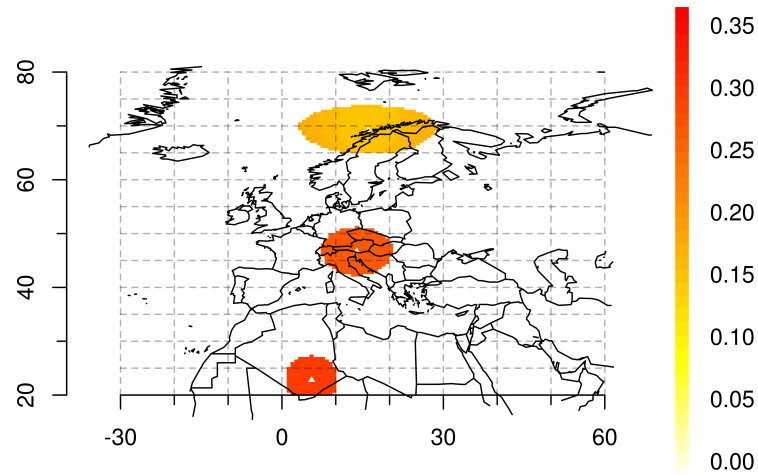


Figura 8: Distorsiones de la proyección Rectangular.

Pino, en la provincia de Palencia, que tiene la estación de Palencia a 10 Km, y por otro lado la estación de Cáceres, la cual tiene la estación de Evora a unos 190 km y la de Palencia o Autilla del Pino a 350 km, incluso alguna estación mas al sur de España, pero a una distancia superior a los 200 km. De esta forma tenemos una estación afectada por una estación muy cercana y de condiciones similares, y otra estación cerca de nuestro límite de actuación, los 500 km de la máscara, con condiciones también similares.

Para evaluar este método de interpolación lo que vamos a hacer es, para cada una de las dos estaciones, comparar el valor real con el interpolado, cogiendo para ello distintos periodos de tiempo (1 año, 6 meses, 1 mes, 1 semana y 1 día) y modificando en cada iteración el valor del parámetro p (1, 2, 4, 8 y 16). Los resultados son los que podemos ver en las tablas 1 y 2.

En estas tablas aparece coloreados de azul el valor real de la estación para el periodo de tiempo seleccionado, y en amarillo claro el valor que mas se le aproxima al real, en caso de ser comparable.

Lo que podemos apreciar es como, en la tabla 1 la mejor aproximación se consigue para valores altos del parámetro P . En este caso podemos decir que las

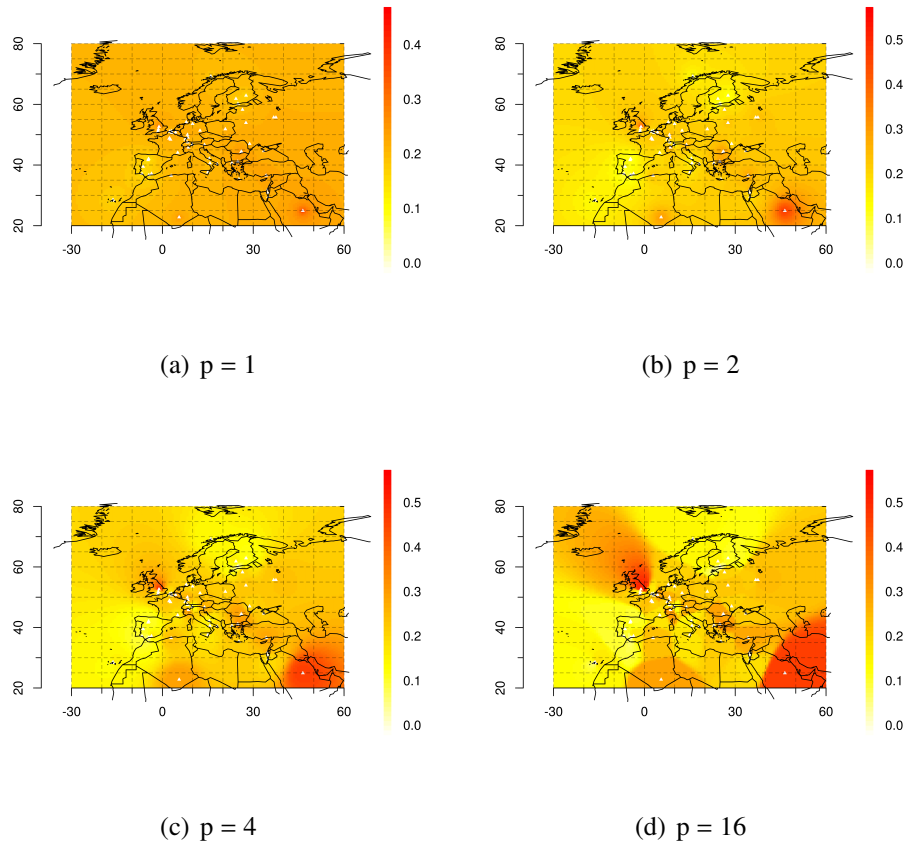


Figura 9: Variación del parámetro p del método de interpolación IDW.

estación que estamos excluyendo se encuentra muy cercana a otra estación que, aunque tenga unas características similares, tiene una diferencia en la altitud de unos 100 metros. Esto afecta directamente a la variable que estamos midiendo. Por este motivo, la influencia de una estación se reduce muy rápidamente. Por este motivo cuanto mayor sea el parámetro P mejor será la aproximación al valor real. Por otro lado, en la misma tabla 1 podemos ver como para los periodos de tiempo mas largos, la aproximación al valor real es más aproximada. Esto se debe a que al coger grandes periodos de tiempo, y calcular la media de estos valores, los valores van a ser mucho mas estables, incluso en la aproximación. Este mismo comportamiento se va a observar también en la tabla 2.

Por otro lado, en la tabla 2 vemos como las mejores aproximaciones se corres-



ponden para valores del parámetro P bajo, en concreto 2. Esto se debe a que las estaciones mas cercanas se encuentran a una distancia considerable, y sin ningún foco cercano.

Otros valores anómalos que se pueden observar en la tabla son debidos a la posible ausencia de datos, en el periodo seleccionado, en las estaciones más próximas o a la cantidad y calidad de los datos que puedan tener dichas estaciones. Este análisis habría que efectuarle atendiendo, con mucho mas detalle, al número de datos de los que disponemos para cada periodo seleccionado.

Por estos motivos, y visto que para distancias no muy cercanas que es lo mas habitual, el valor que mejor se comporta para el parámetro P es de 2, vamos a dejar este valor fijado a 2, aunque llegado el caso, dejamos la herramienta informática preparada para que este valor pueda ser elegido por el usuario. En la figura 10 podemos ver el resultado de realizar una interpolación sobre todas las estaciones disponibles dejando el parámetro P con el valor de 2.

Ciudad		Autilla del Pino					
Periodo	Inicio a Fin	real	p=1	p=2	p=4	p=8	p=16
1 año	2008-01-01 a 2008-12-31	0.1315779	0.1931869	0.1535661	0.1474739	0.141889	0.1365539
	2007-01-01 a 2007-12-31	0.1523223	0.2009366	0.1257424	0.1184011	0.1183799	0.1183799
6 meses	2008-06-01 a 2008-12-31	0.1364828	0.1925232	0.1566441	0.1514476	0.1466766	0.1421186
	2007-01-01 a 2007-06-30	0.1693813	0.2680961	0.2450703	0.2055612	0.1821289	0.1775153
1 mes	2008-05-01 a 2008-05-31	0.1528233	0.2996919	0.2810491	0.2408576	0.2071588	0.1958731
	2007-07-01 a 2007-07-31	0.101898	0.3067943	0.2414877	0.1608886	0.1208598	0.1113923
1 semana	2008-06-02 a 2008-06-08	0.1403047	0.2395764	0.1171567	0.1043432	0.104304	0.104304
	2007-09-10 a 2007-09-16	0.318648	0.2848995	0.2595404	0.2546443	0.2546218	0.2546218
1 día	2008-05-20	0.1112224	0.2405718	0.1931119	0.1186147	0.08535603	0.08032317
	2007-04-20	0.2084703	0.3623817	0.3608268	0.2822039	0.2095097	0.1945388

Tabla 1: Influencia del parámetro P y comprobación del método de interpolación para distintos periodos de tiempo en Autilla del Pino(provincia de Palencia).

Ciudad		Cáceres					
Periodo	Inicio a Fin	real	p=1	p=2	p=4	p=8	p=16
1 año	2008-01-01 a 2008-12-31	0.1451993	0.1787408	0.1430677	0.1373022	0.1331457	0.1316885
	2007-01-01 a 2007-12-31	0.1541289	0.1868404	0.1416555	0.1429112	0.1479638	0.1516012
6 meses	2008-06-01 a 2008-12-31	0.1440528	0.179231	0.1470238	0.1418719	0.1380327	0.1366081
	2007-01-01 a 2007-06-30	0.1773363	0.2279521	0.1724942	0.1693849	0.1693813	0.1693813
1 mes	2008-05-01 a 2008-05-31	0.1953169	0.2364021	0.1575717	0.1528306	0.1528233	0.1528233
	2007-07-01 a 2007-07-31	0.1110066	0.2207022	0.1074671	0.101904	0.101898	0.101898
1 semana	2008-06-02 a 2008-06-08	0.1307081	0.2063451	0.1330282	0.1348466	0.139189	0.140268
	2007-09-10 a 2007-09-16	0.1415275	0.1655289	0.0967245	0.09479299	0.09707053	0.09871312
1 día	2008-05-20	0.08016422	0.1806174	0.114181	0.1112249	0.1112224	0.1112224
	2007-04-20	0.193894	0.2847762	0.2125791	0.2084767	0.2084703	0.2084703

Tabla 2: Influencia del parámetro P y comprobación del método de interpolación para distintos periodos de tiempo en Cáceres.

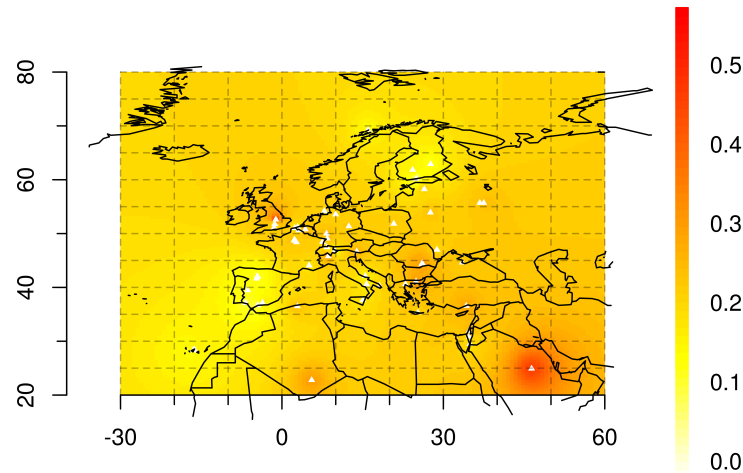


Figura 10: Influencia de cada estación con el parámetro $p = 2$.

4.3. Aplicación de Máscara

Finalmente, debido a que no queremos inventarnos más información de la que realmente tenemos, se va a aplicar una máscara a la interpolación. El objetivo de esta máscara es no mostrar información en algún punto del mapa si no tenemos una estación lo suficientemente cerca como para estar seguros de que el valor que está apareciendo en ese punto es aproximado a la realidad. Para conseguir este objetivo vamos a recortar la interpolación de tal forma que solo veamos una zona de 500 km de radio al rededor de cada estación. De esta forma, en aquellas zonas donde tengamos varias estaciones aparecerá la zona completamente cubierta, pero según nos acerquemos a zonas menos pobladas de estaciones habrá zonas que se queden sin información. En la figura 11 podemos ver como, para los mismos datos y proyección de los apartados anteriores, queda el mapa final una vez aplicada la máscara.

Vemos como en la zona de Europa central, debido al numero de estaciones existentes, está toda la superficie cubierta, pero según nos acercamos al norte de Europa o al desierto del Sáhara, van apareciendo zonas sin datos, debido a que no se haya ninguna estación cercana como para poder afirmar que los valores que

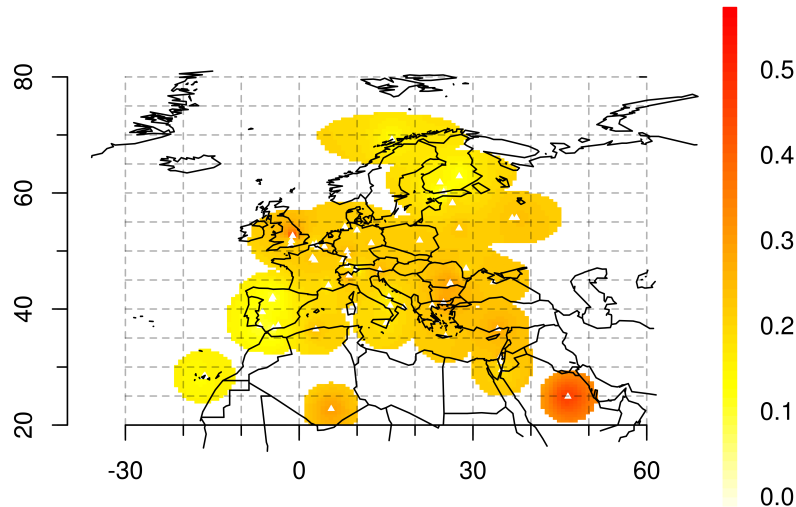


Figura 11: Mapa del AOD a 500 nm aplicada una máscara de 500 km al rededor de cada estación.

tenemos en esas zonas son realistas o no. Cabe destacar que esta máscara que estamos aplicando es una máscara dinámica, es decir, en función de las estaciones que haya en el periodo de fechas seleccionado el recorte por estaciones abarcará más superficie o menos. Dado el caso que solo tengamos una estación estaremos mostrando únicamente los 500 km que rodean a la estación, y si tenemos gran cantidad de estaciones estaremos cubriendo prácticamente toda la superficie.

5. Conclusiones

Tras la realización de este trabajo podemos concluir que se ha desarrollado una aplicación informática que proporciona una visión espacial del comportamiento de los aerosoles atmosféricos y otras variables atmosféricas, todas ellas obtenidas del proyecto AEROPA que se genera con los datos medidos por los instrumentos de la red AERONET.

Esta herramienta permite, ejecutándose en un entorno de R, seleccionar la variable atmosférica que queremos representar, que proyección cartográfica deseamos que tenga la salida, y el periodo de tiempo del que queremos obtener el promedio de los datos para interpolar en las zonas de las que no disponemos de información.

La herramienta para permitir estas opciones ejecutará de la siguiente forma:



```
R -f interpolate.r --slave --args 2008-01-01  
2008-12-31 aot_500 rectangular
```

Siendo, “20080101” la fecha de inicio, “20081231” la fecha de finalización, “aot_500” la variable a interpolar y “rectangular” la proyección que deseamos tenga el mapa.

Esta herramienta puede ser ejecutada en cualquier servidor ya que todas las librerías que se han utilizado para su desarrollo son librerías libres y sin la necesidad de tener que pagar por su licencia.

Con respecto a los resultados, podemos concluir que con el número de estaciones presentes en Europa se puede crear un mapa interpolado de todo el territorio Europeo. Para crear este mapa se deberá utilizar el método de interpolación IDW. Este método se optimiza asignándole el valor 2 al parámetro P del método, debido a la proximidad e influencia que queremos que cada estación tenga con el resto de puntos. La mejor proyección geográfica para representar los resultados obtenidos es una que, o bien no deforme las áreas del territorio que estamos viendo, o bien no deforme las distancias. Con estas características podremos apreciar mejor la evolución espacial que tienen las variables atmosféricas. Para ello las proyecciones que mejor se ajustan a estas condiciones, según nuestro punto de vista son: Aitoff, Gall-Peters, Lambert y Rectangular.

6. Líneas Futuras

Lo interesante de este trabajo es la posibilidad de líneas de trabajo que abre.

La más inmediata es integrar esta herramienta en el sistema CAELIS, de tal forma que en la propia aplicación web se cree un formulario que llame de forma más intuitiva y amigable a la herramienta desarrollada y facilite por pantalla el mapa creado.

Por otro lado, sería interesante comparar los mapas obtenidos con esta herramienta con otros productos generados por satélites, incluso llegar a crear una aplicación que trabaje de forma conjunta con los mapas generados por esta herramienta y con las imágenes obtenidas de los satélites.

Referencias

Fuertes Cocho, D., Jul. 2010. Caelis: Sistema de gestión y explotación para una red de investigación en aerosoles. Tech. rep.



- Goldberg, D. m., Richard Gott III, J., 2011. Flexion and Skewness in Map Projections of the Earth. *Cartographica*.
- Holben, B., Eck, T., Slutsker, I., Tanre, D., Buis, J., Setzer, A., Vermote, E., Reagan, J., Kaufman, Y., Nakajima, T., Lavenu, F., Jankowiak, I., Smirnov, A., OCT 1998. AERONET - A federated instrument network and data archive for aerosol characterization. *Remote Sensing of Enviroment* 66 (1), 1–16.
- McIlroy, D., Brownrigg, R., Minka, T. P., Bivand, R., 2014. Package 'mapproj'. Tech. rep.
- Murillo, D., Ortega, I., Carrillo, J. D., Pardo, A., Rendon, J., 2012. Comparación de métodos de interpolación para la generación de mapas de ruido en entornos urbanos. *Ing. USBMed*.
- Ortiz de Galisteo, J. P., 2011. Análisis del contenido total en columna del vapor de agua atmosférico sobre la península ibérica medido con distintas técnicas: Radiosondeos, fotómetros solares y sistema gps. Tesis Doctoral, Universidad de Valladolid.
- Paredes Hernández, C. U., Salinas Castillo, W. E., Martínez Becerra, X., Jiménez Hernández, S. B., 12 2013. Evaluación y comparación de métodos de interpolación determinísticos y probabilísticos para la generación de modelos digitales de elevación. *Investigaciones geográficas*, 118 – 130.
URL http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112013000300009&nrm=iso
- Shaw, G., 1983. Sun photometry. *Bulletin of the American Meteorological Society* 64 (1), 4–10.
- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K., M., T., H.L., M., 2007. Technical Summary. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. . Cambridge University Press.
- the MySQL Core Team, 2015. *MySQL 5.7 Reference Manual*. Tech. rep.
URL <http://downloads.mysql.com/docs/refman-5.7-en.a4.pdf>
- Toledano, C., December 2005. Climatología de los aerosoles mediante la caracterización de propiedades ópticas y masas de aire en la estación 'el arenosillo'



de la red aeronet. Tesis Doctoral, Universidad de Valladolid.

URL http://goa.uva.es/toledano/Publicaciones/Tesis_Toledano.pdf

Venables, W. N., Smith, D. M., the R Core Team, 2015. An Introduction to R. Tech. rep.

URL <http://cran.r-project.org/doc/manuals/R-intro.pdf>

Willeke, K., Baron, P., 1993. Aerosol measurement: principles, techniques, and applications . New York: Van Nostrand Reinhold.