



Universidad de Oviedo

ESCUELA POLITÉCNICA DE MIERES

**Análisis SIG de la influencia de las deposiciones ácidas
de la central térmica de Velilla del Río Carrión
(Palencia) en la calidad del aire y en los ecosistemas de
*Quercus pyrenaica Willd***

**GIS analysis of the influence of acid deposition from
thermal power station of Velilla del Río Carrión
(Palencia) in air quality and ecosystems of *Quercus
pyrenaica Willd***

TRABAJO FIN DE MÁSTER

MÁSTER EN TELEDETECCIÓN Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Guzmán Pedrosa Puebla

DIRECTORES:
Gil González Rodríguez y Ana Colubi Cervero

Mieres, Julio 2015.

DEDICATORIA

A mi abuelo (allá donde estés), por enseñarme a amar la naturaleza.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, ya que sin vosotros, nada de esto hubiera sido posible.

A aquellos amigos que hice en Asturias: *toda la grandeza de este mundo no vale lo que un buen amigo...*

GRACIAS

ÍNDICE

| | Página |
|--|-----------|
| 1.-RESUMEN ----- | 6 |
| 1.-ABSTRACT ----- | 7 |
| 2.-INTRODUCCIÓN ----- | 8 |
| 2.1.-La contaminación atmosférica ----- | 8 |
| 2.2.-Efectos de la contaminación atmosférica sobre los ecosistemas forestales -- | 10 |
| 2.3.-Medidas para conocer los efectos de la contaminación ambiental ----- | 12 |
| 2.3.1.-La Red Europea de Seguimiento de daños ----- | 12 |
| 2.3.2.- Análisis del estado de salud forestal y calidad del aire en España ---- | 13 |
| 2.4.-Análisis del efecto de la contaminación atmosférica en la zona de estudio -- | 14 |
| 2.4.1.-Premisas conocidas en la elaboración del estudio ----- | 16 |
| 3.-OBJETIVOS ----- | 17 |
| 4.-PROCEDIMIENTO ----- | 18 |
| 4.1.-Descripción de la zona de estudio ----- | 18 |
| 4.1.1.-Localización Geográfica ----- | 18 |
| 4.1.2.-Características fisiográficas, análisis del MDT ----- | 18 |
| 4.1.2.1.-Altitud ----- | 18 |
| 4.1.2.2.-Pendientes ----- | 19 |
| 4.1.2.3.-Orientaciones/Exposiciones ----- | 19 |
| 4.1.3.-Climatología ----- | 19 |
| 4.1.4.- Figuras de protección ----- | 21 |
| 4.1.5.- Los núcleos de población y la central térmica ----- | 21 |
| 4.2.- Método de muestreo ----- | 24 |
| 4.2.1.-Establecimiento de la malla de puntos y puntos de muestreo ----- | 24 |
| 4.2.2.-Determinación de la calidad del aire a través del análisis de los líquenes existentes en la corteza de <i>Q. pyrenaica</i> (biomonitorización) ----- | 24 |
| 4.2.2.1.-Cálculo del IPA ----- | 26 |
| 4.2.3.-Recogida de muestras de suelo y análisis del pH ----- | 27 |
| 4.2.4.-Toma de muestras y análisis del pH las hojas de <i>Q. pyrenaica</i> ----- | 28 |
| 4.2.5.-Medición del pH de la corteza de árboles de <i>Q. pyrenaica</i> ----- | 29 |
| 4.2.6.-Medida de los diámetros ----- | 30 |
| 4.2.7.-Enfermedades y daños ----- | 31 |
| 4.3.- Modelo de datos SIG ----- | 31 |

| | |
|--|-----------|
| 5.-RESULTADOS ----- | 36 |
| 5.1.-Análisis Estadístico ----- | 36 |
| 5.1.1.-Análisis de la calidad del aire mediante el uso de líquenes como bioindicadores ----- | 37 |
| 5.1.2.- Modelo de distribución del Índice de Pureza Atmosférica (IPA) en el robleal ----- | 38 |
| 5.1.3.- La distancia a la central como variable de modificación del IPA ----- | 38 |
| 5.1.4.- La dirección del viento dominante como variable de modificación del IPA ----- | 40 |
| 5.1.5.-Extrapolacion del IPA a la totalidad de la zona de estudio. Impacto en las localidades de Guardo y Velilla y figuras de protección ----- | 41 |
| 5.1.6.-Clasificación de la calidad del aire según los valores de IPA ----- | 42 |
| 5.2.-Efecto de las emisiones acidas en los ecosistemas de <i>Quercus pyrenaica</i> ----- | 43 |
| 5.2.1.-Análisis del pH las hojas de <i>Q. pyrenaica</i> ----- | 43 |
| 5.2.2.-Análisis del pH de la corteza de <i>Q. pyrenaica</i> ----- | 44 |
| 5.2.3.-Análisis del pH del suelo ----- | 45 |
| 5.2.4.-Influencia de las emisiones acidas en el crecimiento del arbolado ----- | 46 |
| 5.2.5.-Enfermedades y daños ----- | 47 |
| 5.3.- Correspondencia entre los diferentes datos ----- | 48 |
| 5.3.1.-Coeficientes de correlación y matriz de diagramas de dispersión ----- | 48 |
| 5.3.2-Relacion del IPA con las diferentes variables medidas en los robledales ----- | 49 |
| 5.3.2.1.-Relacion de los niveles de IPA y las distintas fracciones de pH ----- | 49 |
| 5.3.3.-Relacion entre las diferentes variables y el diámetro medio ----- | 51 |
| | |
| 6.-CONCLUSIONES ----- | 53 |
| | |
| 7.- BIBLIOGRAFÍA ----- | 54 |

| | |
|---|-----------|
| ANEXOS----- | 58 |
| Mapa 1 - Localización general----- | 58 |
| Mapa 2 - Distribución de los puntos de muestreo----- | 59 |
| Mapa 3 - Pendientes y Altitud----- | 60 |
| Mapa 4 - Orientaciones Exposiciones----- | 61 |
| Mapa 5 - Puntos de muestreo bajo la influencia de los vientos dominantes----- | 62 |
| Mapa 6 - Figuras de protección----- | 63 |
| Mapa 7 - Núcleos de población----- | 64 |
| Mapa 8 - Enfermedades y daños----- | 65 |
| Mapa 9 - Mapa 9 - Modelo de distribución del Índice de Pureza Atmosférica en el robledal. Zonas de isocontaminación isopureza del aire----- | 66 |
| Mapa 10 -Extrapolación del IPA a la totalidad de la zona de estudio. Impacto en las localidades de Guardo y Velilla y figuras de protección----- | 67 |
| Mapa 11 - Modelos de distribución del pH de hojas, corteza y suelo----- | 68 |
| Coordenadas XY (ETRS89) de los puntos de muestreo----- | 69 |
| Matriz de diagramas de dispersión, líneas de mínimos cuadrados y diagramas de caja----- | 71 |
| Tabla de datos----- | 72 |

1.-RESUMEN

La contaminación atmosférica incide negativamente sobre los ecosistemas forestales, llegando en ocasiones a provocar severos procesos de degradación. Los procesos más importantes asociados a la contaminación atmosférica son la acidificación de ecosistemas y la disminución de la calidad del aire con su consiguiente perjuicio para la salud humana.

En Velilla del Río Carrión existe una central térmica que, en su actividad, emite a la atmósfera tanto óxidos de azufre y nitrógeno como metales pesados.

Por esto, el principal objetivo del presente estudio es estimar e interpretar los efectos de las emisiones de gases contaminantes emitidos por la central térmica de Velilla del Río Carrión sobre las masas de *Quercus pyrenaica* cercanas a la misma, contando con la estadística y los SIG como herramientas de análisis.

El estudio se llevó a cabo en el Norte de la provincia de Palencia (abarcando también una pequeña parte del NE leonés), incluyendo los municipios de Guardo, Velilla del Río Carrión, Valderrueda y Boca de Huérgano. Tomado como centro la torre de refrigeración de la central térmica citada, se estableció una circunferencia de 5 kilómetros de radio y dentro de la cual se instaló una malla de puntos de 750 metros de lado. Los datos a analizar pertenecen a los puntos de muestreo, surgidos de la intersección de dicha malla con masas de *Quercus pyrenaica* y son de fuente y elaboración propia: pH de las hojas y corteza de *Quercus pyrenaica*, pH del suelo, estudio de la comunidad líquénica (la cual expresa la calidad del aire mediante el Índice de Pureza Atmosférica), diámetros medios, daños o enfermedades en los robles así como otros datos surgidos del análisis SIG.

Los bioindicadores líquénicos muestran una calidad del aire de mediocre a muy mala en la zona de estudio, notándose un evidente modelo de dispersión influenciado por la distancia a la central y la dirección de los vientos dominantes. El mayor impacto de las emisiones ácidas se produce sobre las hojas de *Quercus pyrenaica*, presentando valores de pH muy ácidos en toda la zona de estudio. Por el contrario, tanto la corteza como el suelo presentan valores más básicos de pH, no observándose un proceso claro de acidificación en los mismos. Los crecimientos en diámetro de los robles están relacionados con los valores obtenidos de IPA, de tal forma que buenas calidades del aire son afines a valores altos de diámetro medio y viceversa. No se hallaron evidencias claras de enfermedades y daños producidos por la contaminación atmosférica, detectándose de forma aleatoria la presencia del hongo patógeno oídio.

1.-ABSTRACT

Air pollution has a negative impact on forest ecosystems, sometimes leading to cause severe degradation processes. The most important processes associated with air pollution are acidification of ecosystems and declining air quality with the resulting damage to human health.

In Velilla del Río Carrión exist a power plant that, in their activity, emitted to the atmosphere both sulfur and nitrogen oxides and heavy metals.

Therefore, the main objective of this study is to estimate and interpret the effects of emissions of polluting gases from the thermal power plant of Velilla Carrión River on the woodland of *Quercus pyrenaica* close to it, with the statistical and GIS analysis tools.

The study was conducted in northern Palencia (also covering a small part of Leon NE), including the municipalities of Guardo, Velilla del Rio Carrión Valderrueda and Boca de Huérgano. Taken as a center cooling tower of that power plant, a circumference of 5 km radius was established and within which a mesh of points of 750 meters was set aside. The data analyzed are those of the sampling points arising from the intersection of said mesh with masses of *Quercus pyrenaica* and are source and authors: pH of the leaves and bark of *Quercus pyrenaica*, soil pH, study of the lichen community (which expresses the quality of the air by the Index of Atmospheric Purity), mean diameters, damage or disease in oaks and other GIS data emerging from the analysis.

The lichen bioindicators show air quality from mediocre to very bad in the study area, noticing an obvious dispersion model influenced by the distance to the center and direction of the prevailing winds. The greatest impact of acid emissions occurs on the leaves of *Quercus pyrenaica*, presenting very acidic pH values throughout the study area. By contrast, both the cortex and the floor have more basic pH values, not observed acidification clear therein. The growth in diameter Oaks are related to the values obtained IPA, so that good air quality are related to high values of mean diameter and vice versa. No clear evidence of disease and damage caused by air pollution, randomly detecting the presence of pathogenic fungus mildew were found.

2.-INTRODUCCIÓN

2.1.-La contaminación atmosférica

Las acciones humanas que provocan la degradación de la naturaleza se remontan a la aparición de los primeros núcleos urbanos, aunque no se habla de polución, o contaminación atmosférica, hasta la Era Industrial (Pardos, 2006). La Revolución Industrial desarrollada a partir de la segunda mitad del S.XIX supuso un gran cambio en los aspectos sociales, económicos y medioambientales de aquella época en adelante. Lo que distingue este periodo fue el cambio de una economía basada en los productos manufacturados a la producción en serie dentro de fábricas, destacando la industria textil y siderúrgica, las cuales empezaron a utilizar combustibles fósiles (carbón principalmente) para el desarrollo de su actividad. Esta economía al alza propicio un aumento en la importancia del transporte (ferrocarril en un principio), que también se beneficiaba de las propiedades de los combustibles fósiles (Fordham University, 2014).

Analizando los aspectos medioambientales, esta Revolución conllevó al empeoramiento de la situación sanitaria de los bosques, tanto en España como en el resto de Europa, llegando a situaciones alarmantes en algunos casos (Calatayud y Sanz, 2000). Se empezó a cuestionar si el mal estado de los ecosistemas forestales era realmente debido a la denominada “lluvia ácida” o si contribuían al mismo otras causas (Krause *et al.*, 1986). E incluso las expresiones inglesa y alemana de *Forest Decline* y *Waldsterben*, respectivamente, se acuñaron para nombrar estos hechos.

Todo ello conllevó al nacimiento de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero, que junto con acciones como la deforestación masiva, emigración rural y tendencia a la agricultura y ganadería intensiva, fueron el detonante del cambio climático que sufrimos actualmente.

Como se puede ver en la Figura 1, las emisiones de los gases de efecto invernadero, según el Protocolo de Kioto, aumentaron en alrededor del 70% entre 1.970 y 2.004, de los cuales el CO₂ es el máximo contribuyente. En el año 2005 la concentración de CO₂ superó con mucho el área de distribución natural de los últimos 650.000 años (IPCC, 2013).

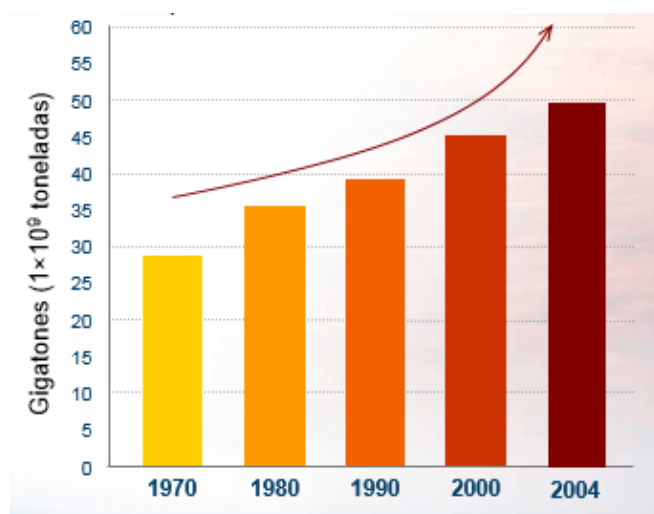


Figura 1. Emisiones totales de Gases de Efecto Invernadero (1970-2004). Fuente: IPCC, 2013.

Uno de los efectos más descritos y estudiados de la contaminación atmosférica es la deposición ácida, conocida comúnmente como lluvia ácida (Figura 2). Este fenómeno consiste en la transferencia desde la atmósfera a la superficie terrestre, en forma húmeda o seca, de ácidos fuertes (H_2SO_4 , HNO_3), y compuestos que los producen [NH_3 , $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, NH_4NO_3], procedentes de emisiones gaseosas de SO_2 , NO_x y NH_3 .

El SO_2 se forma principalmente (80%) en la combustión de combustibles fósiles y en procesos industriales y los óxidos de nitrógeno se forman también como subproductos de la combustión de carbón y fuel para producir electricidad (Pardos, 2006).

La lluvia normalmente presenta un pH de aproximadamente 5,65 (ligeramente ácido), debido a la presencia del CO_2 atmosférico, que forma ácido carbónico, H_2CO_3 . Se considera lluvia ácida si presenta un pH menor que 5, pudiendo alcanzar en algunos casos pH 3. Entre los efectos que la lluvia ácida produce en los ecosistemas forestales podemos destacar la acidificación de los suelos y el debilitamiento de los ejemplares al dañarles las hojas, limitación de los nutrientes que reciben o exposición a sustancias tóxicas. Dichos efectos contribuyen a un crecimiento menor y, en ocasiones, la muerte de las masas forestales (United States Environmental Protection Agency, 2014).

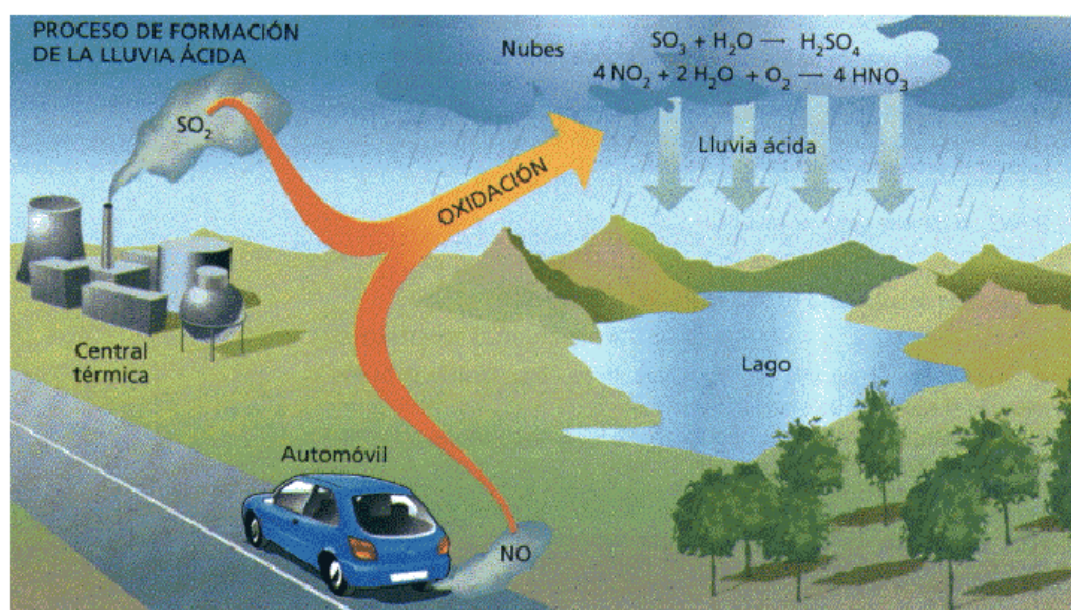


Figura 2. Esquema sobre la aparición de la lluvia ácida. Fuente: Gobierno de Canarias, 2014.

2.2.-Efectos de la contaminación atmosférica sobre los ecosistemas forestales

Como se aprecia en siguiente esquema (Figura 3), la contaminación atmosférica repercute de manera directa, o a través de sus efectos, en las especies:

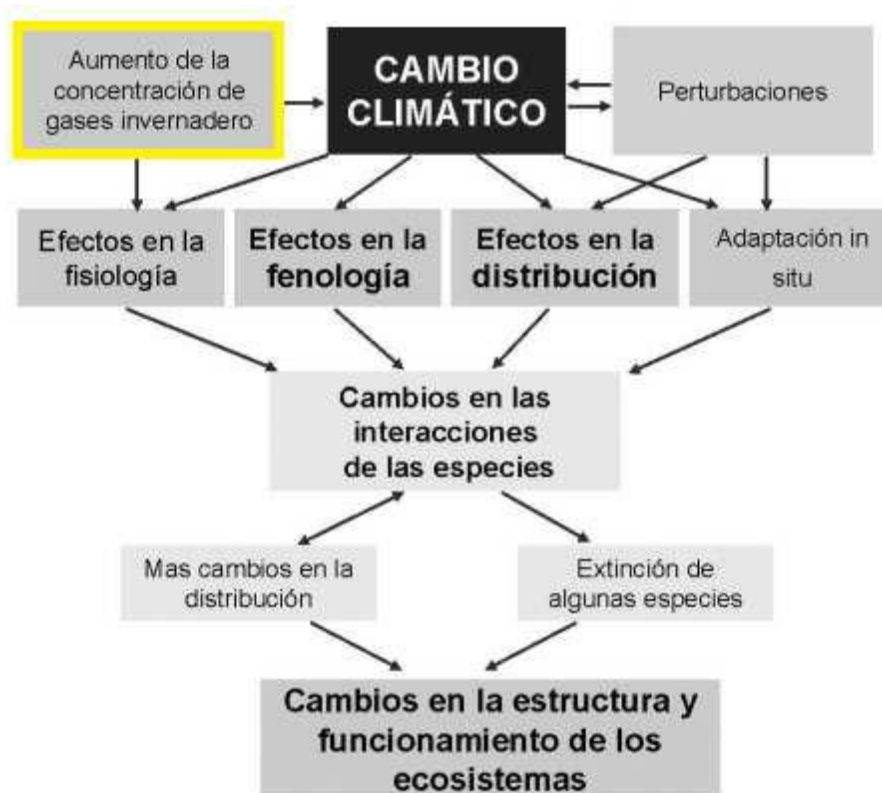


Figura 3. Efectos biológicos del cambio climático. Fuente: Filella *et al.*, 2003.

Realmente, los principales efectos de la contaminación atmosférica sobre las masas forestales son los siguientes:

- Cambios en la morfología y fisiología de los árboles y plantas. Por ejemplo, en los últimos dos siglos, la densidad estomática ha disminuido en un 21%, las plantas están floreciendo y fructificando por término medio 10 días antes que hace 30 años y las hojas de los árboles salen ahora por término medio unos 20 días antes que hace unos cincuenta años, indicando una posible adaptación a las condiciones más cálidas y áridas de la actualidad mediante una mayor eficiencia en el uso del agua (Matamala y Peñuelas, 1990).

- Provocar alteraciones en las habilidades competitivas de las especies, llegando a una modificación en la composición de las comunidades (Filella *et al.*, 2004).

- Mayor pérdida de nutrientes en los lixiviados tras las lluvias (Filella *et al.*, 2004).

- Perturbación de los ciclos vitales, ya que el periodo vegetativo se ha prolongado unos cinco días por década durante los últimos cincuenta años (Filella *et al.*, 2004).

La contaminación atmosférica no solo tiene un efecto directo negativo sobre la vegetación por deposición de los contaminantes sobre la parte aérea de las plantas y pérdida de nutrientes por lavado e intercambio iónico, sino indirectos, los cuales incluyen la acidificación del suelo con la consiguiente liberación de aluminio y otros metales pesados. También afecta a las relaciones de la vegetación y del suelo con los distintos tipos de microorganismos implicados en el funcionamiento del ecosistema como por ejemplo, los hongos micorrícicos y a la ecología de los insectos (Lendzian y Unsworth, 1983).

-La influencia de ciertos contaminantes en los bosques es una realidad que no se puede olvidar, y por ello se necesitan herramientas que permitan determinar cuáles son las cargas críticas de estos contaminantes en el seno de las masas forestales. La carga crítica se puede definir como “la deposición más alta de componentes acidificantes que no producen cambios químicos que puedan causar daños en la estructura y funcionamiento del ecosistema forestal” (Nilsson y Grennfelt, 1988).

Rodríguez-Lado y Macías (2006) han determinado que en Galicia la mayoría de los ecosistemas forestales soportan cargas de acidez superiores a los 2000 eq N ha⁻¹ año⁻¹. y que un 5% de los ecosistemas forestales gallegos excedían esta carga crítica.

La emisión de óxidos de azufre, la deposición de óxidos de nitrógeno, las altas concentraciones de ozono, los metales pesados, y con efectos más localizados los derivados fluorados, son factores cuya acción dañina sobre los bosques europeos ha sido ampliamente descrita (Percy, 2002).

Todos ellos afectan a ecosistemas forestales al conducir a alteraciones en las interacciones de muchos elementos, por ejemplo N, S, H⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ y Al³⁺ (Smith *et al.*, 1999).

La determinación de las deposiciones de contaminantes atmosféricos, tanto por vía húmeda o seca, así como de la carga crítica de cada ecosistema forestal es muy compleja en España ya que se trabaja en zonas muy heterogéneas de dimensiones considerables donde es difícil ubicar equipos sofisticados para la medición de contaminantes (MAGRAMA, 2013). Por ello es necesario un sistema de control de la calidad del aire para salvaguardar el medio ambiente y, en definitiva, la salud tanto humana como de los diferentes ecosistemas (Fernández-Salegui y Terrón, 2003).

2.3.-Medidas para conocer los efectos de la contaminación ambiental

2.3.1.-La Red Europea de Seguimiento de daños

Ante las alarmas sobre el estado de los bosques cabe destacar el “Programa de Cooperación Internacional para la Evaluación y Seguimiento de los Efectos de la Contaminación Atmosférica en los Bosques” (ICP-forests) en el que 35 países europeos, Canadá y USA vienen llevando a cabo el seguimiento del estado de los bosques desde 1986 con el establecimiento de un abundante número de parcelas.

En 1987 se puso en marcha la instalación de la Red de Nivel I, de seguimiento extensivo, para evaluar el estado de los bosques en Europa y que contaba con 5.700 puntos en Europa, 620 de ellos en España (Figura 4). En ellos se lleva a cabo con periodicidad anual el análisis del estado de salud del arbolado y de los principales factores que actúan negativamente sobre el mismo mediante la evaluación de parámetros rutinarios como la pérdida de follaje del arbolado (defoliación), la determinación de agentes causantes de daños en los árboles, el nivel de fructificación, etc. (MAGRAMA, 2014).

Ya en 1997 se instauró la Red de Nivel II, de seguimiento intensivo (cuenta con datos más específicos y complejos que la Red de Nivel I), para estudiar las consecuencias de la contaminación atmosférica y de otros factores en los ecosistemas forestales. Se desarrolla en 770 parcelas de observación permanente situados en 31 países, de ellos 440 pertenecen a la Unión Europea (Figura 4) y 54 a España (Figura 5).

Entre sus principales objetivos destacan:

1. Conocer la variación en el tiempo y en el espacio del estado de salud de los bosques y la relación de esta variación con los factores de estrés, incluida la contaminación atmosférica, a escala nacional, regional e internacional.
2. Contribuir a un mejor conocimiento del impacto de los contaminantes atmosféricos y otros agentes nocivos sobre los ecosistemas forestales así como de las relaciones causa efecto e interacciones.

Para ello, se llevan a cabo una evaluación de copas, toma de muestras edáficas, toma de muestras foliares, estimación del crecimiento y la producción, medida de la deposición atmosférica, seguimiento de las condiciones meteorológicas, solución del suelo, calidad del aire, desfronde, biodiversidad, fenología, muestras de vegetación arbustiva y herbácea y seguimiento de daños por ozono (MAGRAMA, 2014).

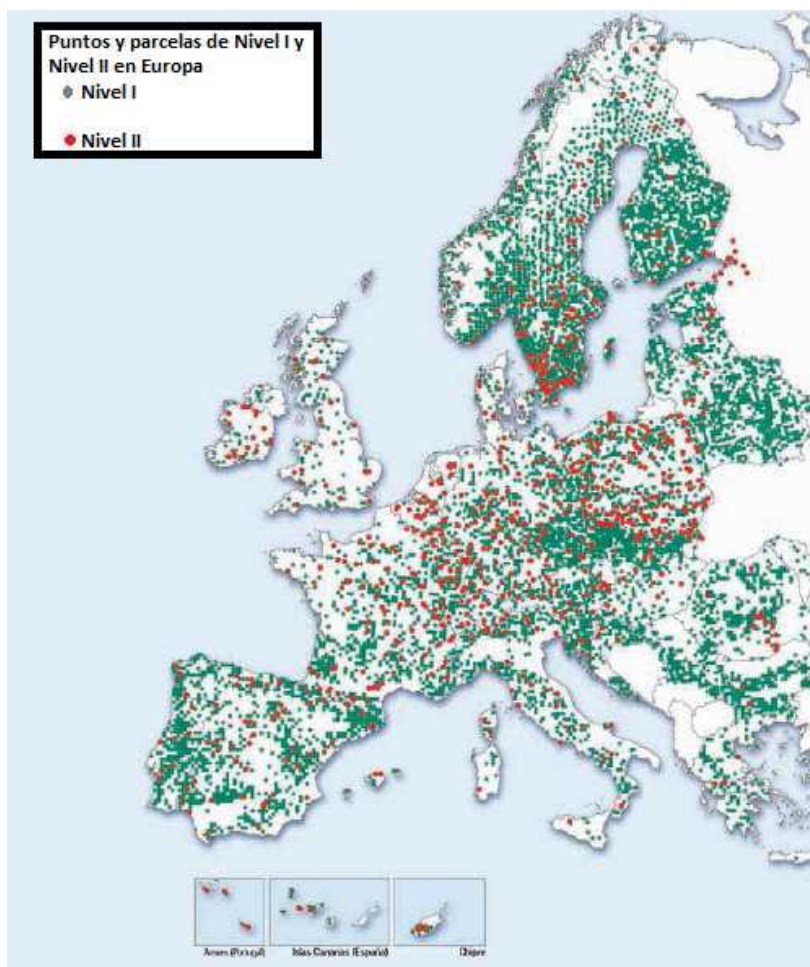


Figura 4. Puntos y parcelas de Nivel I y Nivel II en Europa. Fuente: ICP-Forest, 2013.

2.3.2- Análisis del estado de salud forestal y calidad del aire en España

El estado de deterioro percibido en algunas áreas boscosas españolas se relacionó con posibles emisiones de contaminantes atmosféricos procedentes de centrales térmicas próximas (Pardos, 2006).

La pertenencia de España al “Programa de Cooperación Internacional para la Evaluación y Seguimiento de los Efectos de la Contaminación Atmosférica en los Bosques” (ICP-forests) desde 1994 (Figura 5) ha permite el seguimiento intensivo y continuado de las perturbaciones que puedan irse produciendo a nivel de impacto directo (SO₂, NO₂, O₃) sobre las copas de los árboles y en la evolución de los suelos (acidificación y eutrofización por exceso de aporte de N) (Pardos, 2006).

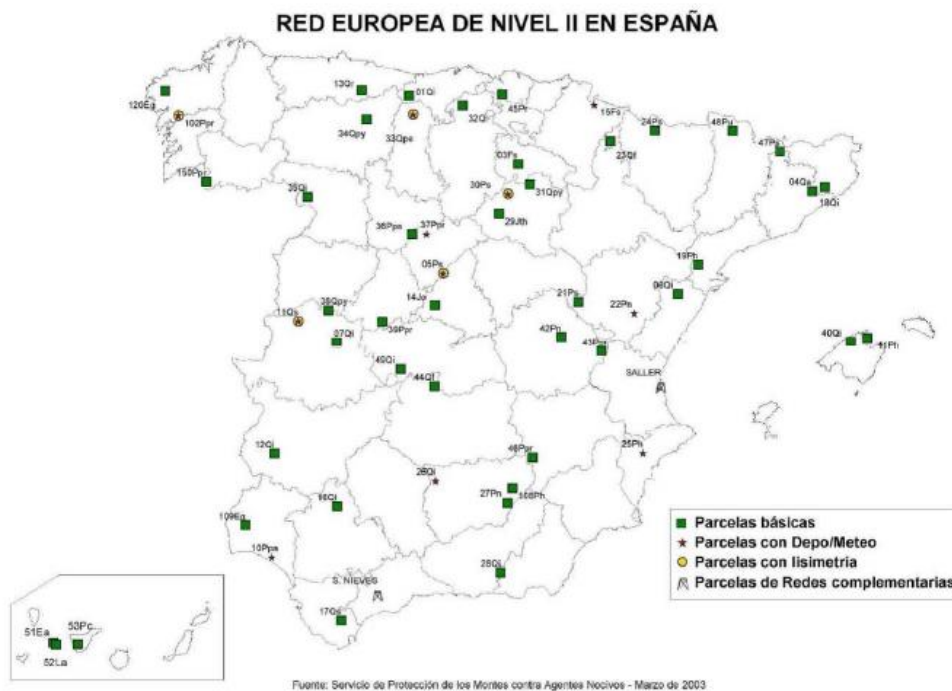


Figura 5. Red Europea de Nivel II en España. Fuente: MAGRAMA, 2014.

Además el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente dispone de estaciones para la evaluación de la calidad del aire (2013) en las cuales se miden las concentraciones de SO₂, NO₂, Pb, CO, O₃ entre otros, y cuyos resultados están disponibles en su Web en formato shp.

2.4.-Análisis del efecto de la contaminación atmosférica en la zona de estudio

Existen numerosos estudios que demuestran que las centrales térmicas, en su actividad de producir energía mediante la combustión de materiales fósiles, expulsan a la atmosfera una serie de elementos y compuestos perjudiciales para las masas forestales, de los cuales, por haberse llevado a cabo también en España destacamos los siguientes:

-Estudio de Seguimiento de la Caracterización Ecológica del Entorno de las CC.TT. de As Pontes y Meirama (NOR-CONTROL, 1997).

-Biomonitorización de la calidad del aire en los alrededores de La Robla (León) (Fernández-Salegui y Terrón, 2003).

-Estimation of air pollution in the area of influence of the coal power station at La Robla (Leon, Northwest Spain) using epiphytic lichens as bioindicators (Terrón y Barreno, 1994).

-El Estudio de la Contaminación Atmosférica en los Bosques (Pena, 2001), trabajo en el que se exponen los efectos sobre la vegetación cercana a las centrales térmicas de Andorra y Escucha (Ambas localidades de Teruel).

Por ello, este trabajo se centra en el estudio de diferentes variables en las masas forestales que permitan valorar el efecto de las deposiciones acidas en masas de *Quercus pyrenaica* situadas en las cercanías de la central térmica de Velilla del Rio Carrión (Palencia).

Los líquenes epífitos (aquellos que se desarrollan sobre la corteza de los arboles) están considerados entre los mejores bioindicadores de la contaminación atmosférica ya que tienen la capacidad de ofrecer información sobre el estado del medio en el cual se desarrollan y su acción sobre ellos. La respuesta que ofrecen se produce de manera gradual, ya que según va aumentando el nivel de contaminación progresivamente se deteriora el talo liquénico.

No todas las especies responden del mismo modo. Las más sensibles o toxisensibles desaparecen con las primeras alteraciones, mientras que las especies toxitolerantes permanecen, e incluso inicialmente ven aumentada su presencia, hasta que llega un nivel de concentración de contaminantes demasiado elevado que provoca su desaparición, produciéndose el llamado desierto liquénico (Fernández-Salegui y Terrón, 2003).

Según Calatayud y Sanz (2000), uno de los primeros mapas de calidad del aire según las especies de líquenes en diferentes puntos de la ciudad de Estocolmo fue el elaborado por Sernander (1926), más tarde, Hawksworth y Rose (1970) elaboraron una lista de líquenes epífitos, que aparecían o no según las concentraciones de SO₂ en el aire.

Posteriormente, muchos han sido los investigadores que han realizado índices para conocer y evaluar la pureza atmosférica utilizando la diversidad y frecuencia liquénica. Entre estos índices cabe destacar el IPA (Índice de Pureza Atmosférica) de Leblanc y De Sloover (1970).

Es por esto que se decidió llevar a cabo una biomonitorización empleando la flora liquénica de la zona de estudio (mediante la metodología IPA) para conocer la distribución de los contaminantes y con ello la calidad del aire.

Otras variables que ayudan a determinar el grado de afección sufrido por las masas forestales expuestas a deposiciones acidas son por ejemplo el pH de la corteza, el cual, es un factor importante para el establecimiento de los líquenes, y condiciona su respuesta a los contaminantes (Calatayud y Sanz, 2000).

En este sentido, la acidificación de la corteza de los árboles se ocasiona de dos formas. La primera de ellas está relacionada con la lluvia acida, que al precipitar sobre la corteza de forma directa hace que el pH de la misma descienda. El segundo modo de acidificación tiene que ver con la fijación de óxidos en la corteza provenientes de las emisiones contaminantes (SO₂...), que, al contacto con el agua de las precipitaciones, forman ácidos (H₂SO₄...) que hacen disminuir el pH de la corteza.

Ciertos componentes volátiles no solo se almacenan en la corteza, sino que también se acumulan en las hojas, produciendo en muchos casos un desequilibrio nutricional en la planta de manera que otro nutriente puede actuar como limitante del crecimiento de la planta (Smith y Smith, 2001). Por otro lado, la concentración de nitrógeno y otros elementos en las plantas, así como su estequiometría son indicadores muy útiles de impacto del N o de otros componentes (Hicks *et al.*, 2000; Rowe *et al.*, 2008).

Por otro lado, el pH del suelo también podría ser un indicador del impacto de las deposiciones ácidas sobre los ecosistemas. Diferentes estudios (De Graaf *et al.*, 1998; DEFRA, 2008) apuntan a un incremento de la acidez del suelo como consecuencia de las continuadas deposiciones atmosféricas sobre una zona. Este cambio en el pH del suelo influye negativamente en la asimilación de compuestos por parte de las plantas.

2.4.1.-Premisas conocidas en la elaboración del estudio

En el año 2008, ajustándose a la nueva normativa de emisión de gases a la atmósfera, la central térmica de Velilla del Río Carrión lleva a cabo la instalación de una planta de desulfuración, que reduce un 97% las emisiones de óxido de azufre procedentes de los gases de combustión y en un 80% las emisiones de partículas (IBERDROLA, 2014).

Sin embargo, la ausencia de datos empíricos en la zona de estudio anteriores al 2008 imposibilita establecer una comparación rigurosa de los resultados a lo largo del tiempo. No obstante, se supone que los efectos producidos por la polución de la central han de ser mínimos desde la instalación de la planta de desulfuración.

3.-OBJETIVOS

La contaminación atmosférica es uno de los principales agentes de cambio global en nuestro planeta y uno de sus principales efectos es el declive y mortalidad de las masas forestales existentes en gran parte de la Tierra.

En las últimas décadas se ha intentado determinar las consecuencias de dicha contaminación sobre la vegetación, es por ello que existen numerosos estudios que demuestran que la presencia de centrales térmicas activas tiene resultados negativos sobre el arbolado existente en las proximidades de dichas instalaciones, de manera que el deterioro y muerte de estas masas puede ser directamente atribuido a ello.

Por esto, el principal objetivo del presente estudio es estimar e interpretar los efectos de las emisiones de gases contaminantes emitidos por la central térmica de Velilla del Rio Carrión sobre las masas de *Quercus pyrenaica* cercanas a la misma, contando con la estadística y los SIG como herramientas de análisis.

De forma particular se pretende:

1.- Estudiar, mediante una extrapolación del modelo de distribución del IPA (Índice de Pureza Atmosférica) en los robledales la calidad ambiental del aire, así como de qué manera está afectando la contaminación sobre los núcleos de población de Guardo y Velilla del Rio Carrión.

2.- Analizar la evolución espacial de algunas propiedades químicas directamente relacionadas con los ecosistemas forestales (pH del suelo, corteza y lixiviado de hojas), así como estimar su posible relación con la fuente contaminante.

3.- Conocer la influencia de la contaminación atmosférica en el crecimiento de los ejemplares de *Quercus pyrenaica* mediante el estudio de su diámetro.

4.- Comparar y relacionar los resultados obtenidos mediante indicadores químicos con los resultados que nos ofrece el uso de bioindicadores, con el fin de conocer la influencia de la fuente contaminante sobre los robledales estudiados y la presencia o no de un gradiente de contaminación.

4.-PROCEDIMIENTO

4.1.-Descripción de la zona de estudio

4.1.1.-Localización Geográfica

El presente estudio se llevó a cabo principalmente, en el Norte de la provincia de Palencia (abarcando también una pequeña parte del NE leones), en la comarca denominada “Montaña Palentina”, la cual incluye los municipios de Guardo, Velilla del Río Carrión, Valderrueda y Boca de Huérgano (perteneciendo a Palencia los dos primeros y a León los dos últimos municipios). Esta información se encuentra recogida de forma gráfica en el Mapa 1 - Localización general (Anexos)

4.1.2.-Características fisiográficas, análisis del MDT

Los MDT empleados en el presente estudio fueron adquiridos en la página web del IGN, en su apartado de descargas, escogiendo el tipo MDT05LIDAR por presentar una mayor calidad que el resto de los disponibles.

Debido a que la zona de estudio es coincidente con cuatro hojas diferentes del MDT (104, 105, 131 y 132), la primera operación realizada fue el recorte por la capa poligonal “Zona de Estudio” de cada una de ellas mediante la herramienta “*Extract by Mask*” para después unir las en un solo MDT con “*Mosaic to New Raster*”, ambas ejecutadas con ArcGis.

4.1.2.1.-Altitud

Dentro del área de estudio se distingue una cota máxima de 1.869 metros (Peña Mayor) y una cota mínima de 1.079 metros, encontrándonos altitudes comprendidas entre 1.654 y 1.094 metros en la zona muestreada.

Se procedió a obtener la elevación de cada uno de los puntos de muestreo con el MDT. Para ello se utilizó la herramienta de ArcGis “*Extract Values to Points*”. En este caso se escogió la opción en la cual el valor obtenido para cada punto es equivalente al valor de elevación del pixel del MDT, sin usar interpolación de celdas adyacentes. Además, mediante “*Contour*” se dibujaron las curvas de nivel cada 50 y 100 metros (numeradas) (Mapa 3 - Pendientes y Altitud - Anexos).

4.1.2.2.-Pendientes

La pendiente fue hallada en grados con “*Slope*”, tomando como base el MDT recortado y unificado por la zona de estudio, además se obtuvieron los valores de pendiente para cada uno de los puntos de muestreo con “*Extract Values to Points*”, todas ellas herramientas de ArcGis. Se procedió a calcular los valores puntuales utilizando una interpolación bilineal de las células adyacentes válidas (excluyendo los NoData), obteniendo un valor más acorde a la realidad, ya que al establecer los mapas de pendientes y orientaciones sin aplicar filtros de suavizado se obtienen valores muy cambiantes en zonas de superficie pequeñas (Mapa 3 - Pendientes y Altitud - Anexos).

El área de robledal muestreado (*Q. pyrenaica*) presenta una pendiente media entorno al 20%.

4.1.2.3.-Orientaciones/Exposiciones

Estas fueron calculadas mediante “*Aspect*”, y de la misma manera que en el caso anterior se obtuvieron los valores de orientación para cada uno de los puntos de muestreo.

Se concluye que las orientaciones predominantes en la zona muestreada son Sur y Este como se puede apreciar en el Mapa 4 - Orientaciones / Exposiciones - Anexos, en el cual, la aplicación de dos filtros Gaussianos sucesivos de radio 4 y desviación estándar 1 permiten una visualización más homogénea de las orientaciones

4.1.3.-Climatología

Con el fin de conocer la climatología de una forma más precisa se analizaron los datos de la estación meteorológica de Velilla del Rio Carrión, situada en el embalse de Compuerto y ubicada en el límite NE de la zona de estudio.

Dicha estación meteorológica, con indicativo o código 2363, se sitúa a una altitud de 1.140 metros y sus coordenadas son 350.278 X, 4.746.489 Y (Huso 30).

Debido a la naturaleza del estudio no se afrontó un análisis termopluviométrico por considerarse innecesario, centrándose la investigación climatológica al análisis de los vientos predominantes de la zona ya que los contaminantes que emite a la atmosfera la central térmica de Velilla del Rio Carrión son arrastrados por estas corrientes de aire, influyendo de forma decisiva en el lugar de deposición de los mismos (Mapa 5 - Puntos de muestreo bajo la influencia de los vientos dominantes - Anexos).

Para el estudio de los vientos se usaron los datos de viento dominante en los días de precipitación medidas durante el periodo comprendido entre 1982 y 2011 (que se corresponde con una serie de 30 años) y facilitados por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET).

Así, para el periodo 1982-2011, la estación meteorológica cuenta con 255 datos de dirección del viento, que muestran los siguientes resultados (Tabla 1 y Figura 6):

Tabla 1. Resumen de datos sobre dirección del viento y su frecuencia.

| Dirección del viento (grados) | Frecuencia (días) | Porcentaje |
|-------------------------------|-------------------|------------|
| 40 (NE) | 64 | 25,1% |
| 140 (SE) | 9 | 3,5% |
| 180 (S) | 12 | 4,7% |
| 230 (SW) | 118 | 46,3% |
| 320 (NW) | 28 | 11,0% |
| 360 (N) | 24 | 9,4% |

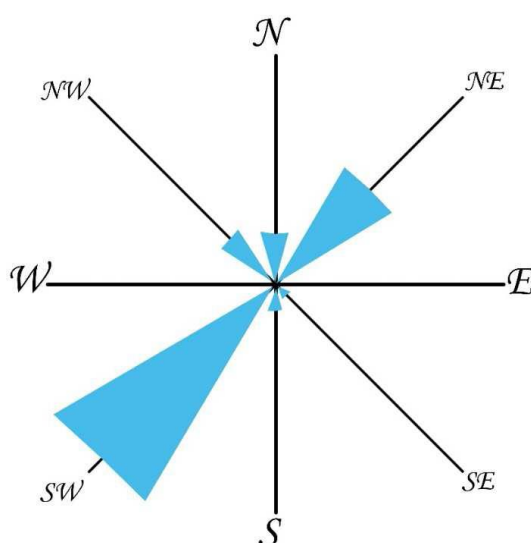


Figura 6. Rosa de los vientos para la estación meteorológica de Velilla del Río Carrión (1982-2011), en la cual, una mayor amplitud de color denota una superior influencia de los vientos hacia la dirección cardinal en la que se encuentra (no confundir con flechas de dirección).
Elaboración propia.

Como se aprecia claramente en la imagen, los vientos dominantes soplan en dirección Suroeste, asimismo una proporción menor de los vientos soplan en dirección Noreste.

Más adelante se estudiará la dirección del viento dominante como variable de modificación del Índice de Pureza Atmosférica (IPA) y se determinará qué puntos de muestreo sufren un mayor impacto en este sentido. Mapa 5 - Puntos de muestreo bajo la influencia de los vientos dominantes (Anexos). Se consideran como influenciados por el viento los puntos de muestreo situados 35° a cada lado de la dirección del viento dominante, es decir, los que se hallan entre 195° y 265°

4.1.4.- Figuras de protección

Al centrarse este trabajo en la temática de la contaminación, resulta interesante tener en cuenta las diferentes figuras de protección que existen en la zona de estudio, por la influencia que las emisiones de la térmica pueden ejercer sobre las mismas. Así podemos observar la existencia de LIC´s (Lugares de Importancia Comunitaria, surgidos de la Directiva Hábitats) y ZEPA´s (Zonas de Especial Protección para las Aves, derivadas de la Directiva Aves) (enmarcados dentro de la RED NATURA 2000) dentro de la superficie de estudio (Mapa 6 - Figuras de protección - Anexos).

Hay que destacar que estos terrenos LIC y ZEPA no coinciden con los robledales existentes y analizados en este estudio, sino que coinciden con zonas montañosas y lugares arbolados con pino, encina y haya colindantes con la zona de muestreo.

Examinando el Plan de Espacios Naturales Protegidos de Castilla y León podemos distinguir las siguientes figuras de protección presentes en la zona de estudio (Mapa 6 - Figuras de protección - Anexos):

- Parque Natural Fuentes Carrionas y Fuente Cobre – Montana Palentina:
Situado el extremo Norte de la provincia de Palencia, linda al Oeste con León y al Norte con Cantabria.

- Parque Regional Picos de Europa en Castilla y León:
Situado al Noreste de la Provincia de León, limita al Este con Palencia y al Norte con Asturias y Cantabria.

4.1.5.- Los núcleos de población y la central térmica

Como ya se expuso anteriormente, uno de los objetivos es estudiar de qué manera está afectando la contaminación sobre los núcleos de población de Guardo y Velilla del Río Carrión, únicos municipios englobados en el área de estudio (Mapa 7 - Núcleos de población) y que cuentan con 6.915 y 1.462 habitantes según el Instituto Nacional de Estadística (2013). Si además, tenemos en cuenta el Mapa 5 - Puntos de muestreo bajo la influencia de los vientos dominantes, podemos observar como especialmente el casco urbano de Velilla del Río Carrión está emplazado en la segunda dirección de los vientos, mientras que Guardo se sitúa a tan solo 45° de los vientos dominantes.

En la zona Norte de Palencia se sitúa la Cuenca Minera Palentina, por lo que la actividad principal de este territorio se ha centrado durante decenios en la explotación de carbón (hulla y antracita), pasando de una minería de interior a las explotaciones a cielo abierto de la actualidad, monopolizada durante años por la empresa UMINSA (Unión Minera del Norte). Gran parte del mineral extraído tiene como destino la Central Térmica de Velilla del Río Carrión (Figura 7), propiedad de IBERDROLA, cuyo fin es la producción eléctrica mediante la combustión (con un volumen de producción de 1.791.444 MW/h entre los dos grupos que la constituyen) y cuyos efectos sobre las masas forestales se pretenden determinar.



Figura 7. Fotografía de la central térmica de Velilla del Río Carrión y parte de los robledales muestreados. Fuente: Víctor Manuel Fernández Díez.

En el año 2005, IBERDROLA comenzó a aplicar mejoras en el proceso de combustión para reducir los óxidos de nitrógeno en más de un 67% (IBERDROLA, 2014). Posteriormente, en el año 2008 se instaló en la central una planta desulfuradora, con el objetivo de ajustarse a la nueva normativa de emisión de gases a la atmosfera. Dicha planta desulfuradora, en teoría, reduce un 97% las emisiones de óxido de azufre procedentes de los gases de combustión y un 80% las emisiones de partículas (IBERDROLA, 2014).

El resultado de la instalación de esta planta desulfuradora se aprecia claramente en las Figuras 8, 9 y 10, donde se puede observar una disminución de las emisiones a la atmosfera, tanto de CO₂, como de óxidos y metales pesados, aunque hay que señalar un pequeño repunte en los años 2011 y 2012, pero que nunca llega a los niveles de principios del 2000. Estos datos han sido recogidos en la web del Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes (2014).

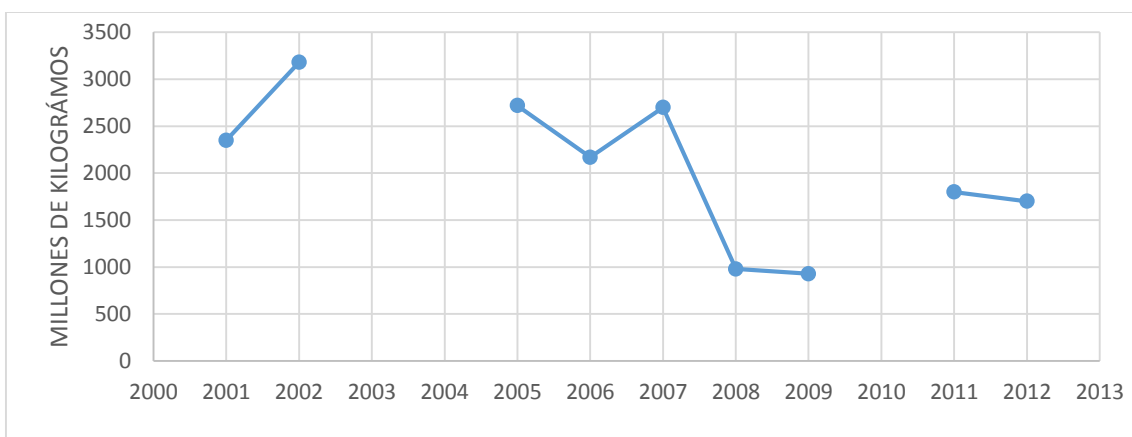


Figura 8. Emisiones a la atmosfera de Dióxido de Carbono (CO₂). Elaboración propia.

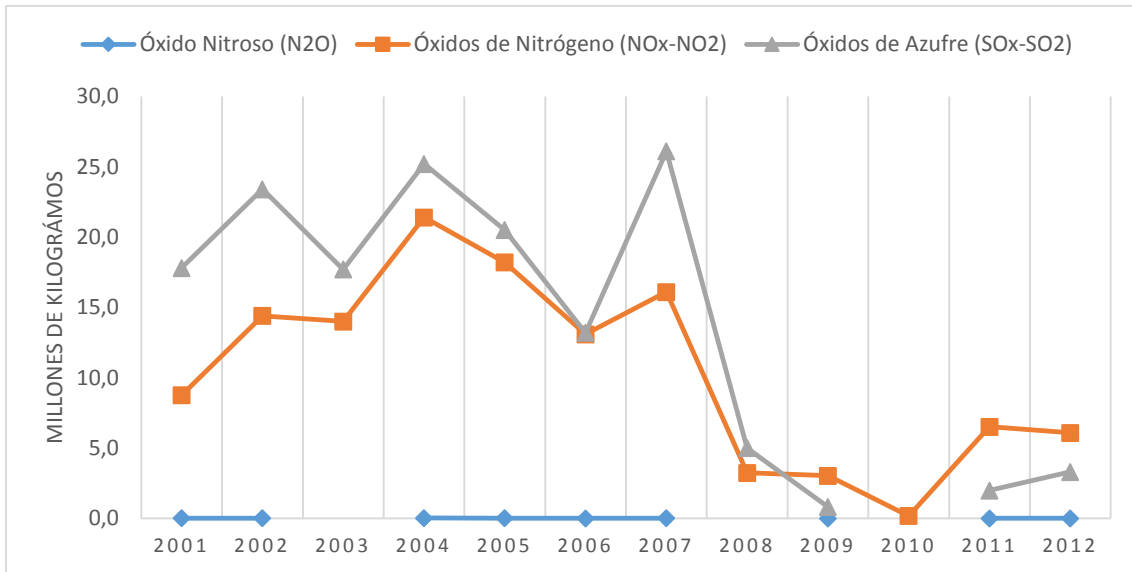


Figura 9. Emisiones a la atmosfera de óxidos. Elaboración propia.

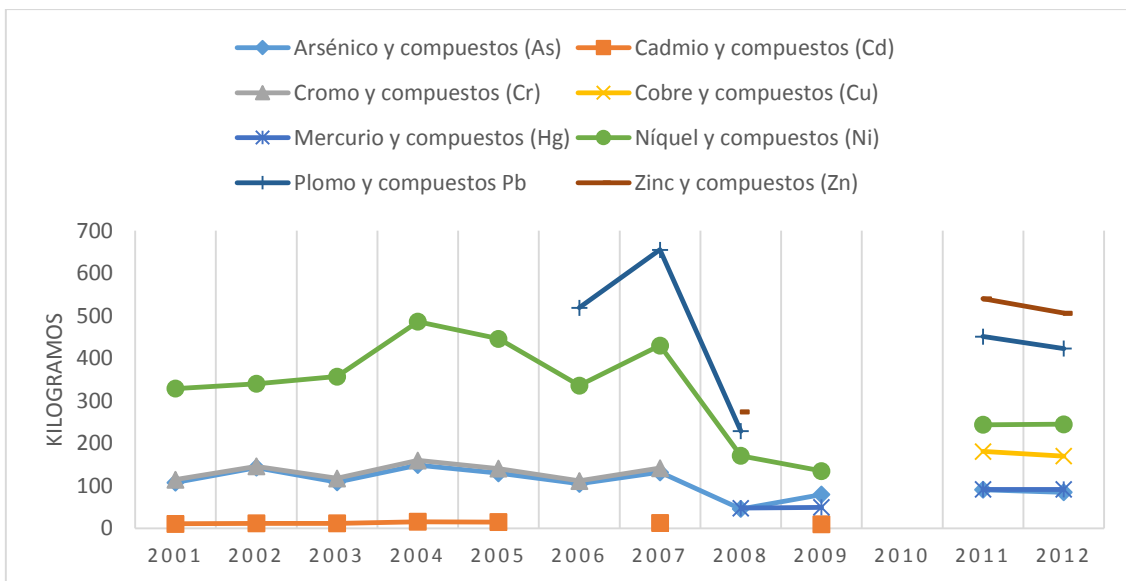


Figura 10. Emisiones a la atmosfera de metales. Elaboración propia.

Como se puede observar claramente en los gráficos, no todos los años cuentan con mediciones (o datos disponibles) de los compuestos, existiendo en el periodo 2009-2011 una ausencia total de los mismos (exceptuando los Óxidos de N). Además, metales como el zinc, plomo o cobre solo cuentan con valores un reducido número de años, lo que hace difícil indicar la tendencia que sigue su concentración.

4.2.- Método de muestreo

4.2.1.-Establecimiento de la malla de puntos y puntos de muestreo

Con el fin de distribuir el muestreo de manera uniforme y totalmente aleatoria se diseñó una circunferencia de 5 km de radio, con centro en la torre de refrigeración de la central térmica de Velilla del Río Carrión y dentro de la cual se dispuso una malla de puntos. La distancia de lado de la malla se fijó en 750 metros ya que con este valor se obtenía un número suficiente de puntos de muestreo, que surgen de la intersección entre la malla de puntos anteriormente citada con las masas de *Quercus pyrenaica*, dando un total de 67 puntos de muestreo. Con el objetivo de una mejor identificación y localización de los puntos de muestreo se asignó a cada punto un número del 1 al 67 (Mapa 2 - Distribución de los puntos de muestreo- Anexos)

Las 67 muestras son consideradas como “suficientes” ya que, otros trabajos que usan el IPA como indicador de la calidad atmosférica, Anze *et al.* (2006) y Lijteroff *et al.* (2009), aunque con metodologías de cálculo diferentes a la propuesta en este estudio (MAGRAMA, 2013), utilizan un número de puntos de muestreo muy inferior al de este estudio (veinte y treinta respectivamente).

Por otro lado, la razón de realizar todos los muestreos únicamente en las zonas forestadas con roble (*Quercus Pyrenaica*) radica en que numerosos estudios muestran efectos muy diversos de las deposiciones acidas dependiendo de la especie (Shen *et al.*, 2013) y del compartimento del ecosistema estudiado (Bini y Bresolin, 1998; Paoletti y Manes, 2003).

Conocidas las coordenadas exactas de cada punto de muestreo (herramienta “Add XY Coordinates” de ArcGis) (incluidas en Anexos) y con ayuda de un GPS, durante el 2013, se procedió a la toma de muestras en campo y su respectivo análisis de laboratorio (Facultad de Biología - Universidad de León - León) de forma propia, y que se explica de forma detallada a continuación.

4.2.2.-Determinación de la calidad del aire a través del análisis de los líquenes existentes en la corteza de *Q. pyrenaica* (biomonitorización)

Esta parte del trabajo de campo se basó en el cálculo del Índice de Pureza Atmosférica (IPA) a partir del número de especies líquénicas y la frecuencia con la que aparecen en la corteza de los robles que se encuentran en la zona de estudio.

El método IPA puede ser considerado como una herramienta fácil y económica de aplicar en la medición de la calidad del aire utilizando bioindicadores (Anze *et al.*, 2006).

Para realizar este estudio se siguió la metodología diseñada por el Programa de Cooperación Internacional de Bosques (ICP-Forest) y el Comité Permanente Forestal de la Unión Europea (metodología creada en origen para el muestreo y seguimiento de los daños en los ecosistemas forestales europeos), recogida en el Reglamento CE 1091 y plasmada en el Manual Red CE de Nivel II (Red de Parcelas Permanentes para el Seguimiento Intensivo y Continuo de los Ecosistemas Forestales) (MAGRAMA, 2013).

En cada uno de los puntos establecidos anteriormente se examinó un roble (*árbol muestra*), lo que hace un total de 67 *árboles muestra o tipo*. Estos árboles debían cumplir las siguientes características según el Manual Red CE de Nivel II (MAGRAMA, 2013):

- 1.-Es preferible que sean individuos representativos de la cobertura liquénica que existe en la zona próxima donde corresponde el punto de muestreo, sin escoger los que presentan el tronco completamente desnudo, ni los individuos con más cobertura liquénica de toda el área.
- 2.-Diámetro del tronco comprendido entre 20 y 40 cm, aproximadamente entre 60 y 120 cm de perímetro. De este modo se asegura que los individuos seleccionados pertenecen a arboles con edades parecidas.
- 3.-Inclinación del tronco menor de 20° con respecto a la vertical.
- 4.-Individuos aparentemente sanos.
- 5.-Arboles sin rebrotes en la base ni en el tronco.

Para el muestreo de las especies liquénicas existentes en cada árbol se utilizó una gradilla de 30 x 50 cm, subdividida en 10 subcuadrados iguales, que se superpone en el tronco del árbol para la realización de los inventarios. La gradilla se coloca sobre el tronco del árbol seleccionado (*árbol muestra*), en la cara del árbol con mayor cobertura liquénica. El centro de la gradilla se dispone en el punto con mayor cobertura liquénica, cuidando que la distancia al suelo sea al menos 120 cm. Se sujeta la gradilla al tronco mediante una o varias alcatayas metálicas (Figura 11).

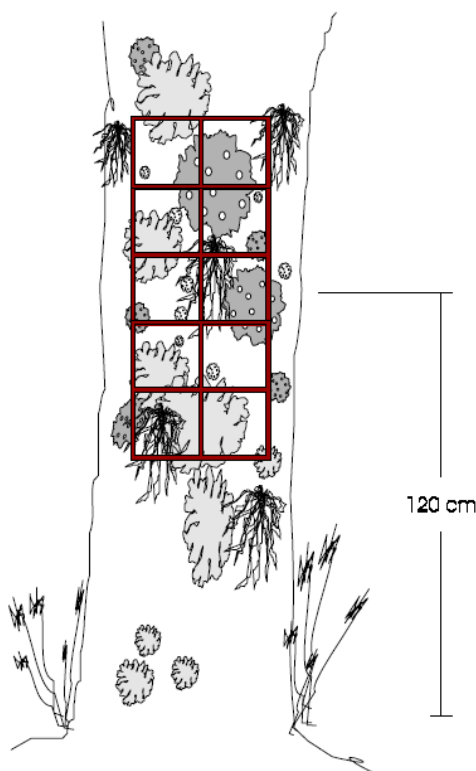


Figura 11. Ejemplo de colocación de la gradilla sobre el tronco de un árbol. Fuente: Calatayud y Sanz, 2000.

Para cada una de las especies de líquenes presentes se contó el número de subcuadrados en los que aparece al menos una vez, y este valor será su frecuencia. Los valores de frecuencia pueden oscilar desde 0 a 10 (0 si la especie no se encuentra en la gradilla y 10 si se encuentra representada en los 10 subcuadrados del área del inventario). Para la identificación de las especies de líquenes presentes se usó *Guía de líquenes epífitos* (Calatayud y Sanz, 2000).

4.2.2.1.-Cálculo del IPA

El Índice de Pureza Atmosférica (IPA) se define como el valor numérico que se obtiene a partir del sumatorio de las frecuencias de cada una de las especies de líquenes que aparecen en el inventario (Amman *et al.*, 1987).

Una vez se ha obtenido la tabla de frecuencias para las especies presentes en cada inventario se procede a calcular el valor de IPA del inventario según la siguiente fórmula:

$$IPA = \sum_{i=1}^n Fi$$

Donde:

Fi= Frecuencia absoluta de la especie “i” obtenida del conteo

n=Número de especies de líquenes del inventario

El IPA es un índice expresado en unidades arbitrarias

El valor calculado a partir de esta fórmula se corresponde con el valor de IPA para el punto de muestreo en el que se ha realizado el inventario. En la Figura 12 y la Tabla 2 se muestra un ejemplo de cálculo de este índice:

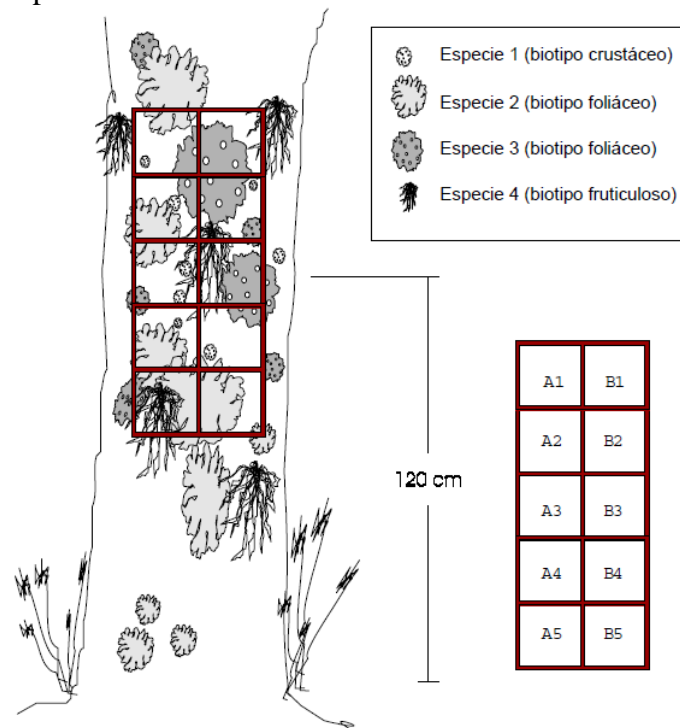


Figura 12. Ejemplo de cálculo del IPA (Fuente: Calatayud y Sanz, 2000).

Tabla 2. Ejemplo de cálculo del IPA para el punto de muestreo número 1.

| PUNTO DE MUESTREO N° 1 | | | |
|------------------------|---|---|--|
| Especie n° | Nombre de la especie (o definición en caso de no identificar la sp.) | Biotipo (crustáceo/foliáceo/fruticuloso) | Frecuencia |
| -1- | <i>Parmelia sulcata</i> | Foliáceo | 10 |
| -2- | <i>Collema furfuraceum</i> | Foliáceo | 5 |
| -3- | <i>Lepraria sp.</i> | Crustáceo | 5 |
| -4- | <i>Ramalina farinacea</i> | Fruticuloso | 3 |
| -5- | <i>Evernia prunastri</i> | Fruticuloso | 3 |
| | | | $IPA = \sum_{i=1}^n Fi$ <p style="text-align: center;">26</p> |

4.2.3.-Recogida de muestras de suelo y análisis del pH

Para la recogida de las muestras de suelo en los puntos de muestreo, en primer lugar se quitó la capa orgánica del suelo, formada principalmente por la hojarasca no descompuesta de los propios robles (Figura 13), para posteriormente y con ayuda de una pala extraer los 10-15 primeros centímetros de tierra (100-200 gramos) los cuales se introducían en una bolsa hermética debidamente identificada.



Figura 13. Toma de una muestra de suelo. Elaboración propia.

Seguidamente a la recogida de muestras, la tierra era secada al aire libre sobre papel absorbente, homogeneizado y tamizado con un tamiz de 2mm de luz de malla. En el laboratorio se determinó el pH en agua en un ratio 1:2,5, mediante un electrodo (M.A.P.A., 1994).

4.2.4.-Toma de muestras y análisis del pH las hojas de *Q. pyrenaica*

En cada punto de muestreo se recogió una muestra de hojas (entre 15 y 20 del *árbol muestra*), de las cuales, tras su congelación en bolsas herméticas (debido a que las muestras se tomaron en días diferentes) se seleccionaron 5 de un tamaño estándar dentro de cada muestra y sin problemas fitosanitarios aparentes (ataques de insectos defoliadores o presencia de hongos principalmente).

Ya que las hojas de esta especie adoptan diversas formas y tamaños, aunque siempre dentro de un mismo patrón, se procedió al pesado de cada muestra para su análisis (5 hojas utilizadas en la medición del pH) antes de ser sometidas al lixiviado, obteniéndose un valor medio de 3,09 gr/5 hojas.

El análisis consistió en la medición del pH del lixiviado de dichas hojas, ya que es conocido que estos órganos vegetales absorben a lo largo de su vida los diferentes contaminantes que se encuentran en la atmósfera y que se depositan sobre ellas (Lendzian y Unsworth, 1983).

Para la realización del lixiviado se depositaron 5 hojas (cuando aún estaban congeladas) en un frasco de plástico, junto con 500 mililitros de agua destilada (Figura 14), dejando reposar la mezcla 4 días completos (96 horas) y agitando el bote diariamente de forma manual. Al cabo de este tiempo se retiran las hojas de la muestra y se introduce la sonda de un pHmetro en la muestra, agitándose la sonda de forma constante y suave hasta que el valor de pH se estabiliza, apuntando el dato (Figura 15).



Figura 14. Imagen de la muestra 58 antes de ser analizada. Elaboración propia.

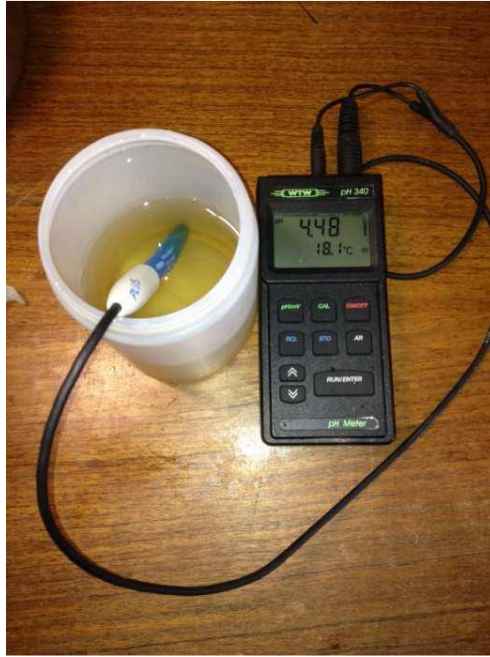


Figura 15. Imagen de la medición de pH en una muestra. Elaboración propia.

4.2.5.-Medición del pH de la corteza de árboles de *Q. pyrenaica*

La recogida de las muestras de corteza se realizó con la ayuda de una azada con el borde cortante (Figura 16). Con ella se separaba la corteza del tronco (del *árbol muestra*) de unos 400 cm², se almacenaba en bolsas herméticas debidamente identificadas y se procedía a su congelación (debido a que las muestras se tomaron en días diferentes).



Figura 16. Toma de una muestra de corteza. Elaboración propia.

La medida del pH se realizó en el lixiviado de la corteza. Para ello se separaron los líquenes de la corteza en la medida que fue posible y se desecharon de las diferentes muestras con el fin de evitar una posible variación en los resultados, debido a que no todas las muestras presentaban las mismas especies de líquenes ni en igual abundancia. A continuación, se molió la corteza (ya sin líquenes) con el fin de obtener un material homogéneo y de dimensiones semejantes con ayuda de un molinillo eléctrico. Se pesó una cantidad de 5,0 gramos de corteza molida y se vertió en un bote de plástico junto con 250 mililitros de agua destilada. Se dejó reposar la mezcla 4 días completos (96 horas), agitando el bote diariamente de forma manual. Por último, se introduce la sonda del pHmetro en la muestra y se agita de forma constante y suave hasta que el valor de pH se estabiliza, apuntando el dato.

4.2.6.-Medida de los diámetros

Se midieron los diámetros de los 15 árboles de la especie *Q. pyrenaica* más próximos al *árbol muestra* con la ayuda de una forcípula (Figura 17) en cada uno de los 67 puntos de muestreo, 1.005 árboles medidos en total.

De cada árbol se tomaban dos medidas en cruz, siendo el resultado el promedio de ambas. La forcípula medía un máximo de 65 cm. Debido a la existencia de ejemplares con un diámetro mayor a esta longitud, estos se contabilizaban como 65 cm (Figura 17).



Figura 17. Medición de diámetros. Elaboración propia.

4.2.7.-Enfermedades y daños

Cuantiosos estudios ya citados en la Introducción demuestran la relación entre la contaminación atmosférica y la aparición de enfermedades y daños en las masas forestales, es por ello que, durante las salidas al campo se fueron anotando todas las anomalías vegetales y enfermedades que presentaban los ejemplares de *Quercus pyrenaica* observadas a simple vista, con el propósito de conocer la salud que presentaban estas formaciones forestales.

4.3.- Modelo de datos SIG

El Software GIS elegido para la realización de este trabajo fue ArcGIS en su versión 10.2.2 debido a su versatilidad de herramientas (forma de mención: “herramienta”) y eficacia a la hora de ejecutar los procesos. Sin embargo, la edición gráfica de los mapas se realizó con QGIS 2.8.2, combinando así un programa SIG libre con otro de pago.

Se comenzó por construir una Geodatabase en la que albergar todos los datos del estudio, tanto geográficos como numéricos asociados y la cual se describirá posteriormente.

El Sistema de Referencia Geodésico adoptado fue el ETRS 1989 (European Terrestrial Reference System 1989) UTM Zona 30N (EPSG 25830), cumpliendo así las exigencias marcadas por el Real Decreto 1071/2007, de 27 de julio, por el que se regula el sistema geodésico de referencia oficial en España. Por otro lado, no se consideró necesario establecer un Sistema de Referencia Vertical

La coincidencia de la zona de estudio con 4 hojas del MTN50 (105, 106, 131 y 132) (Figura 18) precisó la unión entre ciertas capas como se expondrá a más adelante.

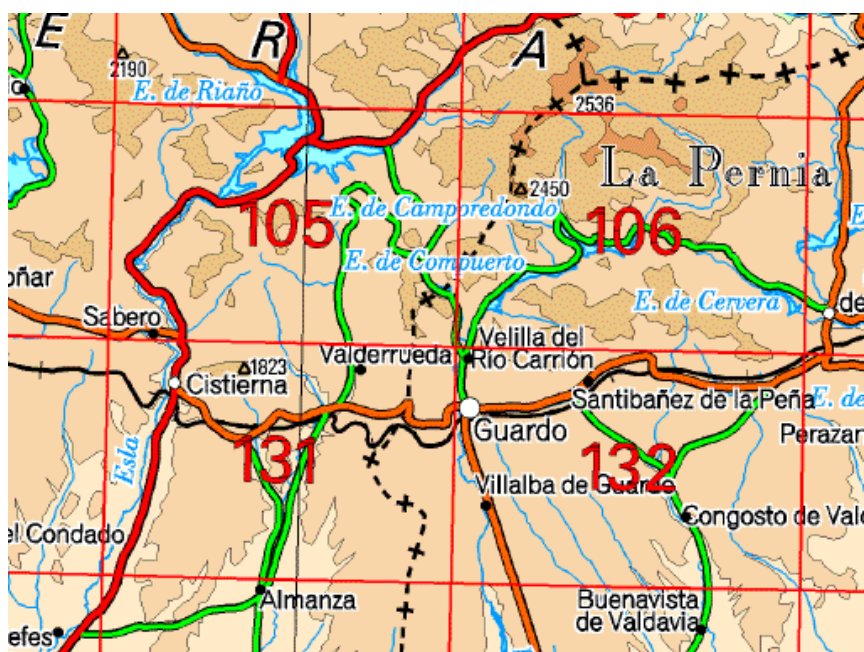


Figura 18: Detalle de las hojas coincidentes con la zona de estudio según la numeración del MTN50 (IGN).

A continuación se muestran en formato de tabla cada una de las capas que componen la Geodatabase de ArcGis así como su procedencia e información asociada:

| PNOA (Plan Nacional de Ortofotografía Aérea) |
|--|
| Nombre de los archivos: PNOA_MA_OF_ETRS89_HU30_h50_(105/106/107/108)/Tipo: Raster |
| Ortofotos del PNOA (Máxima actualidad) obtenidas de la Web del IGN, dentro del Centro de Descargas. Hojas 105, 106, 131 y 132. Empleadas como capas base para para la digitalización de diferentes elementos. |

| MDT (Modelo Digital del Terreno) |
|--|
| Nombre de los archivos: MDT05-(105/106/107/108)-H30-LIDAR Tipo: Raster |
| MDT 05 LIDAR con resolución espacial de 5 metros obtenidos de la Web del IGN, dentro del Centro de Descargas. Hojas 105, 106, 131 y 132. Empleado como capas base para para la obtención de pendientes, orientaciones, y altitudes. |

| Central Térmica | | |
|--|-------------|---|
| Nombre del archivo: Central_Termica / Tipo: Vectorial | | |
| Capa tipo punto que representa el centro de la zona de estudio, digitalizada a partir del PNOA sobre la torre de refrigeración de la central térmica de Velilla del Río Carrión. | | |
| Número de entradas (<i>rows</i>): 1 | | |
| Campos (<i>fields</i>) | | |
| Nombre | Tipo | Descripción |
| X | Double | Coordenada X del punto obtenida mediante la herramienta “Add XY Coordinates” (348.574,1689 X) |
| Y | Double | Coordenada Y del punto obtenida mediante la herramienta “Add XY Coordinates” (4.742.584,7426 Y) |

| Zona de Estudio | | |
|---|------|--|
| Nombre del archivo: Zona_Estudio / Tipo: Vectorial | | |
| Polígono de forma circular con radio de 5 kilómetros y centro en el punto central anteriormente descrito. Creada mediante la herramienta “ <i>Buffer</i> ”. | | |
| Constituye un área de 78,5 km ² “ <i>Calculate Areas</i> ”. | | |
| Número de entradas (<i>rows</i>):1 | | |
| Campos (<i>fields</i>) | | |
| Nombre | Tipo | Descripción |
| * | * | Creadas por defecto al ejecutar la herramienta |

| Malla de Puntos | | |
|--|--------|---|
| Nombre del archivo: Malla_Puntos_Intersect / Tipo: Vectorial | | |
| Malla cuadrada uniforme de puntos que de manera aleatoria reparte por la zona de estudio los posibles puntos de muestreo. | | |
| Para su elaboración se partió de las coordenadas XY de la central térmica y mediante una tabla Excel se calcularon las coordenadas del resto de puntos, que fueron visualizados gráficamente mediante “ <i>Make XY Event Layer</i> ” la cual utiliza la extensión .csv (delimitada por comas). | | |
| Por último, mediante una intersección espacial (“ <i>Intersect</i> ”) se calcularon los puntos de la malla que coincidían con la zona de estudio (Malla_Puntos →Malla_Puntos_Intersect). | | |
| Número de entradas (<i>rows</i>): 225 | | |
| Campos (<i>fields</i>) | | |
| Nombre | Tipo | Descripción |
| X | Double | Coordenadas X del punto obtenidas del archivo tipo texto (.csv) |
| Y | Double | Coordenadas Y del punto obtenidas del archivo tipo texto (.csv) |

| Robledal | | |
|---|-------------|--|
| Nombre del archivo: Robledal / Tipo: Vectorial | | |
| Área cubierta por <i>Q. Pyrenaica</i> digitalizada a partir de las ortofotos del PNOA a una escala 1:1.000, dando como resultado una precisa zonificación del robledal (30,0 km ²). | | |
| Número de entradas (<i>rows</i>):1 | | |
| Campos (<i>fields</i>) | | |
| Nombre | Tipo | Descripción |
| * | * | Creadas por defecto al digitalizar el polígono |

| Puntos de Muestreo | | |
|---|---------------|--|
| Nombre del archivo: Puntos_muestreo / Tipo: Vectorial | | |
| Esta capa fue obtenida por la intersección espacial entre el polígono que delimita el robledal (<i>Quercus pyrenaica</i>) y la malla de puntos con la herramienta “ <i>Extract by intersect</i> ”. | | |
| Mapa 2 - Distribución de los puntos de muestreo - Anexos | | |
| Tabla de datos - Anexos | | |
| Contiene toda la información empírica del estudio recogida en cada punto de muestreo. Todos los datos y sus respectivos análisis son de fuente y elaboración propia, llevándose a cabo el trabajo de campo (recogida de muestras) y laboratorio durante los años 2013 y 2014. | | |
| Número de entradas (<i>rows</i>): 67 | | |
| Campos (<i>fields</i>) | | |
| Nombre | Tipo | Descripción |
| Numero | Short Integer | Número identificador de cada uno de los 67 puntos de muestreo |
| IPA | Short Integer | Índice de Pureza Atmosférica, que determina la calidad del aire a través del análisis de líquenes (número de especies y su frecuencia) presentes en la corteza de <i>Q. Pyrenaica</i> (biomonitorización), analizando un <i>árbol muestra</i> por cada punto de muestreo |

| | | |
|------------|---------------|--|
| pHsuelo | Float | Análisis en laboratorio del Ph del suelo (capa no orgánica) |
| pHcorteza | Float | Análisis en laboratorio del pH del lixiviado de 5,0 gramos de corteza molida (sin líquenes) de <i>Q. pyrenaica</i> (árbol muestra) |
| pHhojas | Float | Análisis en laboratorio del pH del lixiviado de 5 hojas de <i>Q. pyrenaica</i> (árbol muestra) |
| Peso_hojas | Float | Peso de las 5 hojas utilizadas para el análisis del pH de las mismas |
| Diametro | Float | Media de la medida en cruz de los diámetros de los 15 árboles de la especie <i>Q. pyrenaica</i> más próximos a cada <i>árbol muestra</i> , expresando el resultado en centímetros (1.005 árboles medidos en total) |
| Enfermo | Text (Si/No) | Anomalías vegetales y enfermedades observadas en los ejemplares de <i>Quercus pyrenaica</i> a simple vista en las salidas de campo |
| Orientacio | Float | Valores puntuales de orientación en grados |
| Pendiente | Float | Valores puntuales de pendiente en porcentaje |
| Elevación | Float | Valores puntuales de altitud en metros |
| Distancia | Short Integer | Distancia a la central térmica de cada uno de los puntos en metros |

5.-RESULTADOS

La central térmica de Velilla del Rio Carrión es la única fuente de contaminación atmosférica masiva de la zona, pudiéndose atribuir, en gran medida, los resultados obtenidos a su funcionamiento.

Se descarta la influencia de la contaminación vehicular en las muestras recogidas en puntos cercanos a carreteras ya que dentro de la zona de estudio no existen vías de comunicación con una circulación de vehículos intensa.

En anexos se encuentra la tabla con la totalidad de los datos obtenidos por punto de muestreo y en cuyo examen se centra el presente apartado.

5.1.-Análisis Estadístico

Para el estudio geoestadístico se ha realizado un análisis exploratorio y un análisis estructural de los datos utilizando la extensión Geostatistical Analyst de ArcGis que permite explorar la variabilidad de datos, examinar tendencias globales e investigar la autocorrelación y la correlación entre los datos, de igual forma se pueden crear predicciones y calcular errores de predicciones.

Para el análisis de los datos del Índice de Pureza Atmosférica (IPA), pH de las hojas, corteza y suelo y diámetros se ha realizado una estadística descriptiva univariante.

Además a los valores de IPA se les aplico un análisis de la varianza de una vía, tomando como factor o variable independiente tanto la distancia a la central térmica como la dirección del viento dominante. El mismo tipo de análisis se realizó con los valores de pH (hojas, corteza y suelo) pero en este caso se tomó como factor o variable independiente las distintas fracciones o compartimentos analizados. Cuando se detectaron diferencias significativas se empleó el test de Tukey como método de control a posteriori.

También se realizaron correlaciones de Spearman con el objeto de estudiar la relación existente entre el pH de las hojas, corteza y hojarasca.

5.1.1.-Análisis de la calidad del aire mediante el uso de líquenes como bioindicadores

Tal y como afirman Fernández-Salegui y Terrón (2003), los líquenes presentan diferentes sensibilidades y tolerancias a los contaminantes atmosféricos. Los líquenes se consideran como sensibles o toxisensibles cuando desaparecen con las primeras interacciones con polutantes. Por el contrario, se consideran como tolerantes o toxitolerantes aquellas especies liquénicas que permanecen en zonas contaminadas e incluso inicialmente ven aumentada su presencia.

Se aprecia notoriamente como en los puntos cercanos a la central térmica y aquellos bajo la influencia de los vientos dominantes (como se demostrara más adelante), la frecuencia y variabilidad de las especies liquénicas es mucho menor (Figura 19).



Figura 19. Árbol muestra cercano a la central (izquierda) y alejado de la central (derecha).
Elaboración propia.

5.1.2.- Modelo de distribución del Índice de Pureza Atmosférica (IPA) en el robledal

En ningún árbol muestra se dio el caso de “desierto liquénico” (Calatayud y Sanz, 2000), en el cual desaparece toda la flora liquénica de la vegetación, es decir, el IPA=0.

Con el fin de visualizar si existe un gradiente de contaminación que pueda asociarse al funcionamiento de la central térmica, así como el modelo de distribución del IPA en los robledales, se ha llevado a cabo un modelo geoestadístico que relaciona geográficamente los valores de IPA con la ubicación de los puntos de muestreo. En concreto, el modelo aplicado fue un kriging ordinario de 2º orden.

Esta biomonitorización se encuentra en el Mapa 9 - Modelo de distribución del Índice de Pureza Atmosférica (IPA) en el robledal. Zonas de isocontaminación / isopureza del aire (Anexos)

Se puede observar que en la proximidad a la central térmica aparecen los niveles más altos de contaminación (coincidentes con IPA's bajos).

A esto hay que añadir que en la dirección del viento dominante (230º, hacia SW) también existe una peor calidad del aire, ocurriendo con mayor notoriedad a partir del kilómetro 2,5. Estos puntos que sufren mayor influencia de la contaminación toman valores de IPA entre 22 y 30.

Por otro lado, los valores de IPA más altos, los cuales nos indican zonas menos contaminadas y mayores purezas del aire, se encuentran en el Noroeste y Este de la zona de estudio, los cuales coinciden con las regiones más lejanas a la central térmica y en direcciones distintas a la del viento dominante. Estas zonas toman valores de IPA entre 30 y 45.

Por tanto, podríamos afirmar que existe una clara afectación en la calidad del aire debido a la quema del carbón por parte de la central térmica.

5.1.3.- La distancia a la central como variable de modificación del IPA

Como se ha descrito anteriormente, dentro del estudio se asumen como factores fundamentales de afección de los contaminantes la distancia de los diferentes puntos de muestreo al foco emisor de polución y las direcciones predominantes del viento (Figura 6). Por esto se realiza a continuación un análisis geoestadístico de ambos factores.

En primer lugar se realizó un análisis de regresión entre ambas variables continuas ($Y = \text{IPA}$ / $X = \text{Distancia}$) obteniendo los resultados que se muestran en la tabla 3:

Tabla 3. Resultados de la regresión

| <i>Estadísticas de la regresión</i> | | | | | |
|---|---------------------------|--------------------------|----------------------------------|-------------------|---------------------------|
| Coeficiente de correlación múltiple | 0,190966447 | | | | |
| Coeficiente de determinación R ² | 0,036468184 | | | | |
| R ² ajustado | 0,021412999 | | | | |
| Error típico | 9,362031572 | | | | |
| Análisis de la Varianza | | | | | |
| | <i>Grados de libertad</i> | <i>Suma de cuadrados</i> | <i>Promedio de los cuadrados</i> | <i>F</i> | <i>Valor crítico de F</i> |
| Regresión | 1 | 212,3089259 | 212,3089259 | 2,42230068 | 0,124550753 |
| Residuos | 64 | 5609,44865 | 87,64763515 | | |
| Total | 65 | 5821,757576 | | | |

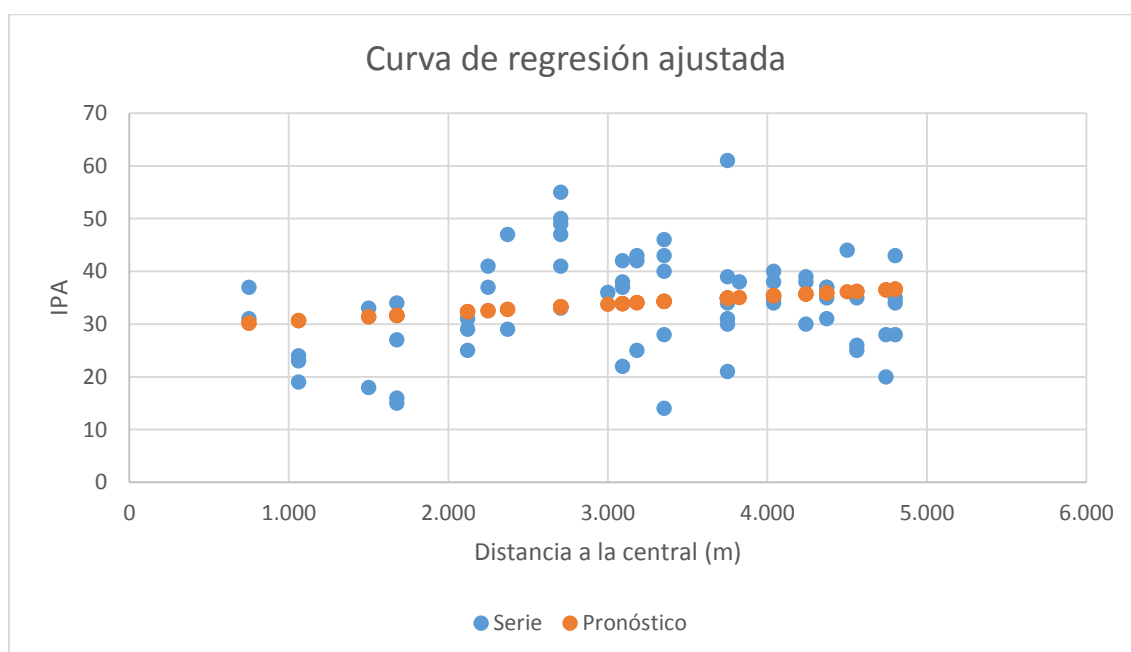


Figura 20. Gráfico de regresión al nivel de confianza del 95%

La zona de estudio abarca una circunferencia con un radio de 5 kilómetros y centro en la torre de refrigeración (chimenea) de la central térmica, pudiéndose establecer rangos de 1.000 metros dentro del radio para un análisis más preciso.

El análisis de regresión es poco concluyente ya que presenta un R² (0,036) bajo, por lo que se aplica un ANOVA para tratar de detectar diferencias.

Si se relacionan los diferentes niveles del IPA, divididos de forma análoga (1:>20 2:20-30, 3:>30) (ver apartado 5.1.6.- Clasificación de la calidad del aire según los valores de IPA) con las distancias de los puntos de muestreo a la central térmica como se expresa en el párrafo anterior, se detectan diferencias significativas (F= 3,27; P = 0,0480) en función de la distancia (Tabla 4).

Tabla 4. Resultado del ANOVA al comparar la distancia a la central térmica y el IPA

| Origen | Suma de cuadrados | Df | Media cuadrática | F-Ratio | P-Valor |
|----------------------|-------------------|----|------------------|-------------|---------------|
| Entre los grupos | 7,49178E6 | 2 | 3,74589E6 | 3,27 | 0,0480 |
| Dentro de los grupos | 7,80263E7 | 64 | 1,21916E6 | | |
| Total (Corr.) | 8,5518E7 | 66 | | | |

Por tanto, basándose en pruebas a posteriori, se podría afirmar, al nivel del 5%, que las zonas más próximas a la central presentan peor calidad atmosférica, y a medida que la distancia con la central térmica aumenta, la calidad del aire también mejora.

5.1.4.- La dirección del viento dominante como variable de modificación del IPA

El viento dominante, de dirección suroeste, sopla a 230°. Se consideran como influenciados por el viento los puntos de muestreo situados 35° a cada lado de la dirección del viento dominante, es decir, los que se hallan entre 195° y 265° (Mapa 5 - Puntos de muestreo bajo la influencia de los vientos dominantes - Anexos). Así, los puntos calificados como “influenciados por el viento” son el 24, 28, 29, 30, 31, 32, 37, 38, 39, 40, 45, 46, 47, 48, 49, 56, 57, 58, 64.

Estos puntos presentan valores de IPA comprendidos entre 14 (para el punto 30) y 55 (para el punto 21), aunque la mayoría de los puntos aparecen comprendidos en el intervalo de IPA ente 20-30 (mala calidad del aire) (ver apartado 5.1.6.- Clasificación de la calidad del aire según los valores de IPA).

En la tabla 5 se presentan los resultados del análisis de varianza para IPA y la situación de las puntos de muestreo en función de los vientos dominantes. Se detectan diferencias significativas ($F = 4,60$; $P = 0,03$) entre los valores del IPA de aquellos puntos de muestreo bajo la influencia de los vientos dominantes y los valores de IPA de los puntos situados fuera del área de influencia.

Tabla 5. Resultado del ANOVA al comparar la dirección del viento dominante y el IPA

| Origen | Sum of Squares | Df | Mean Square | F-Ratio | P-Valor |
|----------------------|----------------|----|-------------|-------------|---------------|
| Entre los grupos | 352,029 | 1 | 352,029 | 4,60 | 0,0360 |
| Dentro de los grupos | 4671,4 | 61 | 76,5803 | | |
| Total (Corr.) | 5023,43 | 62 | | | |

En la Figura 21 y en la Tabla 6 se pueden observar los valores medios del IPA para los puntos de muestreo situados en zonas de vientos dominantes (categoría Si) y los no dominantes (categoría No). Existe una diferencia significativa en los valores medios. En las parcelas expuestas a los vientos dominantes el IPA medio es 28,87 mientras que en las no expuestas a estos vientos el IPA medio es mayor (34,41).

Así atendiendo al p-valor obtenido en el análisis ANOVA, la prueba de comparación de medias de dos variables para poblaciones independientes valida la hipótesis de que la calidad media del aire es peor en las zonas bajo la influencia de vientos dominantes que en las zonas fuera de dicha influencia.

Como se puede observar en el diagrama de Box and Whisker existe una gran dispersión de los datos dentro de cada categoría.

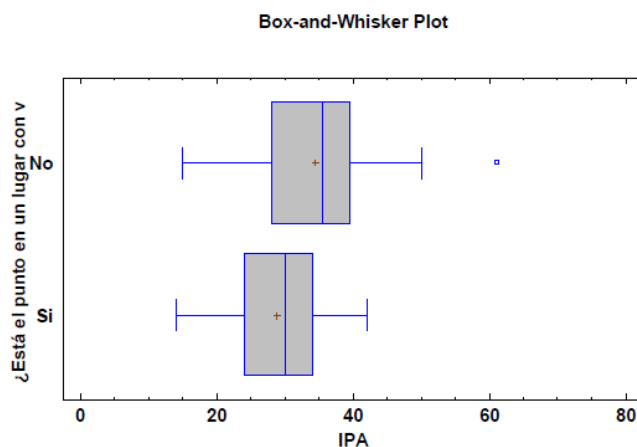


Figura 21. Diagrama Box and Whisker de los puntos incluidos o no en los vientos dominantes para las diferentes clases IPA. Elaboración propia.

Tabla 6. Separación de medias de la variable vientos dominantes.

| Influencia vientos dominantes | nº observaciones | IPA medio | Grupos homogéneos |
|-------------------------------|------------------|------------|-------------------|
| Si | 15 | 28,87 | X |
| No | 48 | 34,41 | X |
| Contraste | Sig. | Diferencia | +/- Límites |
| No - Si | * | 5,55 | 5,17621 |

* Denota una diferencia estadísticamente significativa. Método: Mínima Diferencia Significativa 95,0% LSD.

5.1.5.-Extrapolacion del IPA a la totalidad de la zona de estudio. Impacto en las localidades de Guardo y Velilla y figuras de protección

Una vez obtenida la biomonitorización de la calidad del aire para los robledales se puede generalizar el modelo de distribución a la totalidad del área de estudio (Mapa 10 - Extrapolación del IPA a la totalidad de la zona de estudio. Impacto en las localidades de Guardo y Velilla y figuras de protección - Anexos), consiguiendo estimar cual será la pureza atmosférica en otros ecosistemas así como en las localidades de Guardo y Velilla del Rio Carrión, ambas dentro de la zona de estudio.

Como ya se apuntó anteriormente, las poblaciones de Guardo y Velilla poseen 6.915 y 1.462 habitantes respectivamente. Además hay que apuntar que esta zona es claramente rural, habiendo sufrido un importantísimo éxodo poblacional en las últimas décadas. La economía se restringe a los sectores primario (ganadería / agricultura) y terciario (turismo). Así, la autovía más cercana se encuentra a 70 km de la zona de estudio, lo que nos hace discriminar el tráfico vehicular como una de las fuentes de contaminación. Además, la única industria importante en un amplio radio de distancia es la central térmica, pudiéndose atribuir por ello los resultados obtenidos a su funcionamiento.

Esta sentencia también es adoptada en otros importantes estudios a nivel nacional: “Estimation of air pollution in the area of influence of the coal power station at La Robla (León, Northwest Spain) using epiphytic lichens as bioindicators” (TERRÓN, A.; BARRENO, E) en el cual, el impacto del municipio leonés de La Robla (4.387 habitantes según el INE - 2014) se considera despreciable.

Por el contrario, los estudios de LIJTEROFF *et al.* y ANZE *et al.* sí tienen en cuenta la influencia de los núcleos urbanos, pero se trata de las ciudades de San Luis (Argentina) y La Paz (Bolivia), que cuentan con 500.000 y 800.000 habitantes respectivamente de forma aproximada.

Como se puede comprobar, el mayor impacto de las emisiones contaminantes se produce sobre las poblaciones de Guardo y Velilla del Río Carrión. Los valores de IPA más bajos corresponden con estas localidades, lo que se traduce en una mayor influencia por la contaminación atmosférica y una peor calidad del aire, destacando la importancia del estudio no solo sobre la vegetación sino también sobre la salud humana, Brunekreef y Holgate (2002) aseguran que la exposición prolongada a contaminantes se ha asociado con un aumento en la mortalidad y los ingresos hospitalarios debido a enfermedades respiratorias y cardiovasculares a corto plazo. Así mismo, existen estudios que aseguran la existencia de una relación entre la disminución de la flora líquénica y el aumento de los casos de cáncer, en el cual destaca el trabajo de Cislaghi y Nimis (1997), en el que se encuentra una relación positiva entre los líquenes y la mortandad por cáncer de pulmón de ciertas zonas en Italia.

Por otro lado, los terrenos situados al Norte y Este de la central térmica son los que presentan valores más altos de IPA y con ello una mayor pureza del aire, pudiéndose explicar estos efectos ya que dichas zonas no están expuestas a los vientos dominantes que arrastran y depositan los contaminantes atmosféricos.

Asimismo, el ecosistema de gran singularidad que representa el Pinar Autóctono de Velilla, el cual se encuentra dentro de la zona de estudio, al Noreste de la localidad de Velilla del Río Carrión presenta valores aceptables de IPA (>35), poseyendo por esto una calidad del aire aceptable.

No se puede olvidar que la franja Norte de la zona de estudio está incluida en la Red Natura 2000 así como en el Parque Natural Fuentes Carrionas y Fuente Cobre – Montana Palentina y el Parque Regional Picos de Europa en Castilla y León. Teniendo en cuenta el mapa 10 podemos asegurar que el impacto de la contaminación atmosférica sobre estas zonas es mínima, tomando valores altos de IPA (>35-40), lo que nos indica una calidad del aire de aceptable a buena.

5.1.6.-Clasificación de la calidad del aire según los valores de IPA

El modelo de cálculo del IPA establecido por el MAGRAMA (2013) y utilizado en este estudio no lleva asociados unos rangos de calificación. Sin embargo, el modelo del IPA descrito por Ammann *et al.* (1987) y las modificaciones introducidas por Bargagli *et al.* (1989) en este modelo, si llevan asociados unos rasgos diferenciadores de alteración del aire.

Por ello, se decidió elaborar una división propia de valores del IPA siguiendo el modelo establecido por Wirth (1995):

IPA <15 - Alteración muy alta. Calidad del aire muy mala

IPA 15-30 - Alteración alta. Calidad del aire mala

IPA 30-45 - Alteración media. Calidad del aire mediocre

IPA 45-60 - Naturalidad baja. Calidad del aire buena

IPA >60 - Naturalidad alta. Calidad del aire muy buena

Según esta clasificación obtenemos:

IPA <15 - 1,5% de los puntos de muestreo presentan una calidad muy mala en el aire.

IPA 15-30 - 29,9% de los puntos de muestreo presentan una calidad mala del aire.

IPA 30-45 - 58,2% de los puntos de muestreo presentan una calidad mediocre del aire.

IPA 45-60 - 8,9% de los puntos de muestreo presentan una calidad del aire buena.

IPA >60 - 1,5% de los puntos de muestreo presentan una calidad del aire muy buena.

Como se ve, casi un 90% de las muestras del IPA nos indican que la calidad del aire es entre mediocre y muy mala en los robledales muestreados y alrededor del 10% de la superficie de los robledales presentan calidades buenas o muy buenas en el aire.

El promedio del IPA de este estudio es de 33,9, encontrándose este valor en el grupo de alteración media, con calidades mediocres del aire.

5.2.-Efecto de las emisiones acidas en los ecosistemas de *Quercus pyrenaica*

Con el objeto de evaluar el impacto de las emisiones acidas en la calidad de los ecosistemas forestales de *Quercus pyrenaica*, se analizó el pH en dos fracciones vegetales: hojas y corteza y en el suelo. Los resultados permitirán determinar si dichos ecosistemas se están sufriendo procesos de acidificación como consecuencia de dichas emisiones.

5.2.1.-Análisis del pH de las hojas de *Q. pyrenaica*

En el Mapa 11 - Modelos de distribución del pH de hojas, corteza y suelo - Anexos se encuentra representada la distribución del pH de las hojas para la zona de estudio mediante kriging ordinario.

El impacto de la contaminación ácida sobre las hojas también dependerá de la especie estudiada ya que la respuesta de la especie va a depender de la distinta estructura anatómica y morfológica de la hoja (Paoletti, 1998). Así, Pena (2001) y Bárcena-Ruiz *et al.* (2006) afirman que son las coníferas las que acusan más estos efectos foliares, sin embargo los planifolios no acusan tanto esta situación, siendo más resistentes a los efectos provocados por la lluvia acida.

Tras el análisis de pH realizado en el lixiviado de hojas de roble rebollo (Figura 22), se puede observar una elevada homogeneidad entre los pH de las hojas de los diferentes puntos de muestreo.

El valor de pH más ácido es de 3,87 y pertenece al punto de muestreo número 54, mientras que el pH más elevado tuvo un valor de 5,37, correspondiendo al punto de muestreo número 40, siendo el pH medio de 4,63. Esto permite afirmar que el pH de las hojas es muy ácido en todos los casos si tenemos en cuenta que los valores habituales se aproximan a 6. Además, en los casos extremos de pH de las hojas comentados anteriormente (puntos de muestreo número 54 y 40) el IPA fue de 38 y 49 respectivamente, evidenciando en este caso que la mayor acidez en las hojas se da en puntos con valores bajos de IPA (alto grado de influencia contaminante) y la menor acidificación en las hojas se da en un punto de muestreo con una buena calidad del aire.

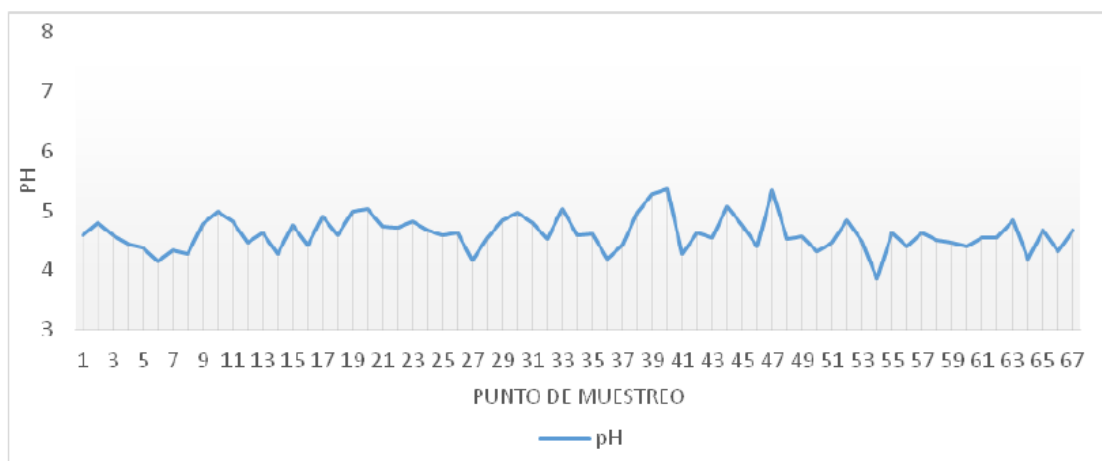


Figura 22. Valores de pH del lixiviado de las hojas recogidas en cada punto de muestreo. Elaboración propia.

5.2.2.-Análisis del pH de la corteza de *Q. pyrenaica*

En el Mapa 11 - Modelos de distribución del pH de hojas, corteza y suelo - Anexos se encuentra representada la distribución del pH de la corteza para la zona de estudio mediante kriging ordinario.

El pH de la corteza es un factor importante para el establecimiento de los líquenes, y condiciona su respuesta a los contaminantes (Calatayud y Sanz, 2000). Por esto se decidió efectuar este tipo de análisis en la corteza de los árboles muestra.

En el estudio que Lijteroff *et al.* (2009) realizaron, también llevaron a cabo el análisis de pH de la corteza de los forofitos, encontrando valores promedio entre 5,33 y 7,24. Esta variación del pH la atribuyen a las diferentes distancias entre los puntos de muestreo y el foco contaminante (el centro de la ciudad).

En la figura 23 se aprecian unas mediciones de pH que toman valores de ácidos a casi básicos. El árbol cuya corteza representa el pH más ácido es el número 14, con un pH de 4,4. Por el contrario, el roble que presenta la corteza más básica es el número 8, con un pH de 6,86 (pudiéndosele catalogar como corteza de pH neutra). El pH medio es de 5,05.

Se comprueba que en el caso de la corteza el pH es menos ácido que para las hojas, teniendo ambos valores normales de 6. Se debe especificar que ambos extremos en los valores de pH pertenecen a zonas de medio y bajo IPA, tomando valores de 34 para el punto de muestreo número 14 y 15 para el punto 8. Analizando la distancia a la central de ambos puntos vemos que el punto 8 (pH más básico) se encuentra más cerca de la central que el punto 14 (pH más ácido), además ambos puntos están fuera de la influencia de los vientos dominantes lo que afirma que no existe una clara influencia de las emisiones en la acidificación de la corteza como ya dedujeron Paoletti y Manes (2003)

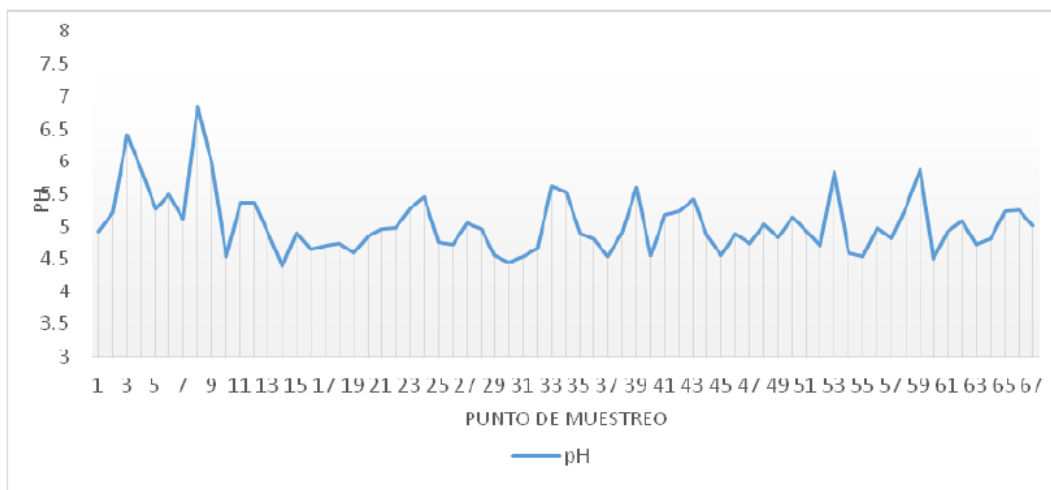


Figura 23. Valores de pH del lixiviado de la corteza por punto de muestreo. Elaboración propia.

5.2.3.-Análisis del pH del suelo

En el Mapa 11 - Modelos de distribución del pH de hojas, corteza y suelo - Anexos se encuentra representada la distribución del pH del suelo para la zona de estudio mediante kriging ordinario.

La contaminación atmosférica no solo tiene un efecto directo negativo sobre la vegetación, sino indirectos, los cuales incluyen la acidificación del suelo con la consiguiente liberación de aluminio y otros metales pesados (Lendzian y Unsworth 1983).

A diferencia del pH medido en los lixiviados de hojas y corteza, el pH del suelo muestra una mayor variabilidad entre los puntos de muestreo, lo que puede estar influido por la propia litología del terreno. El punto de muestreo más ácido corresponde con el árbol número 45 con un pH de 3,85 y el punto de muestreo más básico es el número 3 con un pH de 7,59 (Figura 24). Cabe destacar que ambos puntos se sitúan en zonas de bajo valor de IPA, sobre todo el punto número 3 situado muy cerca de la central térmica que presenta un valor de IPA de 16, y sin embargo no hay una clara influencia de las emisiones en el valor de pH del suelo.

El pH medio de todas las muestras medidas es de 5,29, pudiéndose afirmar que suelo de los robledales estudiados tiene carácter ácido.

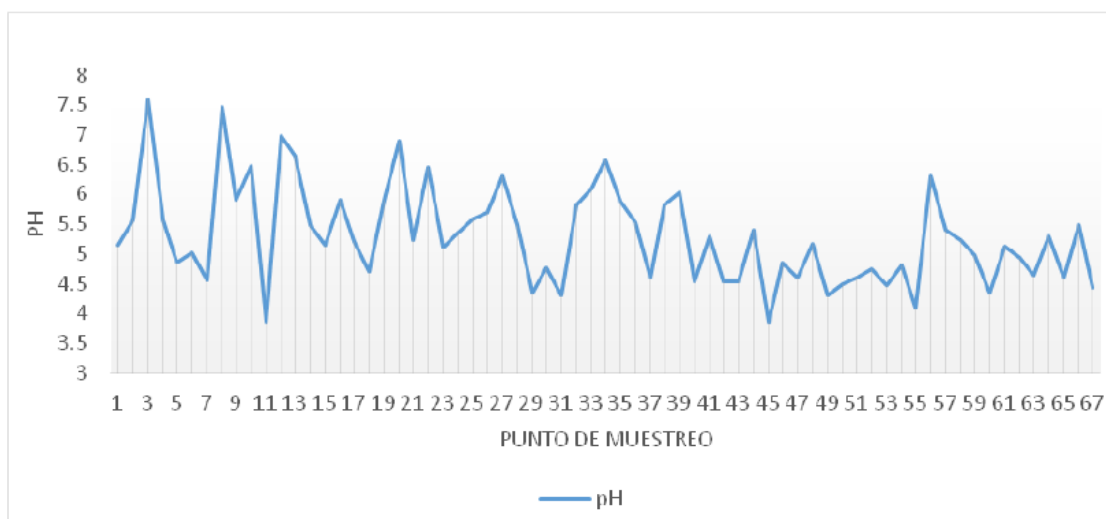


Figura 24. Valores de pH del suelo en cada punto de muestreo. Elaboración propia.

5.2.4.-Influencia de las emisiones acidas en el crecimiento del arbolado

Un aumento en la contaminación atmosférica puede provocar el debilitamiento de las masas forestales. Esta falta de vitalidad y salud se traduce en un menor crecimiento de los ejemplares. Por esta razón se analizarán los diámetros de los 15 árboles más cercanos al elegido como “árbol muestra”, (1.005 en total: 15 mediciones en cada uno de los 67 puntos de muestreo). En la Tabla de datos generales (anexos) se muestran los resultados promedio de las mediciones de diámetro por punto de muestreo, que van desde 6,2 centímetros de diámetro medio en el punto de muestreo número 63 a 38,4 centímetros de diámetro en el punto 12.

El robledal muestreado tiene una edad similar, aunque es evidente que, por cuestiones selvícolas, de gestión u otros tratamientos y causas (incendios forestales ocurridos, extracción de pies para leña, etc.), esta no es idéntica en todas las zonas, existiendo manchas más jóvenes dentro de la masa. Aun así, se supone equivalente, debido al excesivo trabajo que supondría un análisis exhaustivo de la edad en cada uno de los 67 puntos de muestreo.

Por esto, en el apartado 5.3.3 se llevará a cabo un análisis de la relación entre las diferentes variables y el diámetro medio.

5.2.5.-Enfermedades y daños

Entre los daños producidos por la contaminación atmosférica en las masas forestales, se puede destacar que los síntomas externos y generalizados en dichas masas son la pérdida del color verde de las hojas (Prin *et al.*, 1985), aspecto senil de árboles jóvenes, proliferación de brotes adventicios, fructificación intensa (Pardos, 2006), reducción del crecimiento, acusada defoliación, pérdida de estructuras reproductivas, etc. Estos daños propician un debilitamiento de los ecosistemas forestales, ocasión que aprovechan insectos y hongos oportunistas, los cuales agravan dicha situación de debilidad.

Los datos recogidos muestran que no se observó ningún indicio claro de los daños expuestos anteriormente ni otros relacionados con la lluvia ácida

No obstante se pudo apreciar como en ciertas áreas de la zona de estudio la presencia del hongo patógeno oídio era evidente y en algunos casos alarmante, como se muestra en la siguiente fotografía (Figura 25) tomada en el punto de muestreo número 34.



Figura 25. Hojas de *Quercus pyrenaica* infectadas por oídio. Elaboración propia.

Esta evidencia de ataque del hongo patógeno se constató en los puntos de muestreo número 34, 45, 48, 66 y 11 como se observa en el Mapa 8 - Enfermedades y daños

Anexos, en el que se puede percibir que la distribución del hongo es aleatoria sobre la zona de estudio, sin presentar un patrón claro de distribución.

Sin embargo, Pena (2001) detallo los daños producidos sobre las coníferas que se situaban en las cercanías de la central termoeléctrica de Andorra (Teruel), observando de forma evidente factores como decoloración de acículas, defoliación, danos sobre el tronco y estado de guía terminal, resinosis, elongación de brotes y hojas, fructificación anormal... Lo que pone en evidencia de nuevo que los bosques de coníferas son más sensibles frente a la lluvia acida que los bosques de planifolios, como así lo han demostrado también Bárcena-Ruiz *et al.* (2006).

5.3.- Correspondencia entre las diferentes variables

5.3.1.- Coeficientes de correlación y matriz de diagramas de dispersión

El primero de los análisis estadísticos llevados a cabo en este sentido fue el coeficiente de correlación entre cada una de las variables, obteniéndose el siguiente cuadro de datos:

| | Peso hojas | pH hojas | pH suelo | Diámetro | IPA | pH corteza | Distancia | Altitud | Pendiente | Orientación |
|-------------|------------|----------|----------|----------|---------|------------|-----------|---------|-----------|-------------|
| Peso hojas | 1 | | | | | | | | | |
| pH hojas | -0,4312 | 1 | | | | | | | | |
| pH suelo | 0,1850 | -0,0188 | 1 | | | | | | | |
| Diámetro | 0,0577 | 0,0908 | 0,0676 | 1 | | | | | | |
| IPA | -0,0553 | 0,1214 | -0,2666 | 0,1150 | 1 | | | | | |
| pH corteza | 0,0645 | -0,1502 | 0,4070 | -0,1101 | -0,3361 | 1 | | | | |
| Distancia | -0,1055 | -0,0377 | -0,3837 | -0,0777 | 0,1911 | -0,3215 | 1 | | | |
| Altitud | 0,1353 | -0,2656 | -0,3801 | -0,1409 | 0,2749 | 0,0407 | 0,2906 | 1 | | |
| Pendiente | 0,2856 | -0,1846 | -0,1451 | 0,0551 | 0,1985 | 0,0011 | 0,2323 | 0,2245 | 1 | |
| Orientación | -0,0324 | -0,2537 | 0,0257 | -0,2525 | -0,1572 | 0,2392 | 0,1446 | 0,2300 | -0,0527 | 1 |

En el podemos observar una baja correlación entre las variables, en muchos de los casos debido a la inexistencia lógica de analogía entre ellos.

Por otro lado, la mayor correlación entre los datos es inversa (-0,4312), y se da entre el pH de las hojas y el peso de la muestra de las mismas, deduciendo que, un mayor aporte de material vegetal en el lixiviado tiene como consecuencia una acidificación de las muestras como cabía esperar, ya que en los análisis de laboratorio mediante este método, una mayor cantidad de peso en la muestra hace descender su pH (acidificación de la misma).

En anexos se muestra la matriz de diagrama de dispersión entre todos los compartimentos analizados junto con la representación lineal de los mínimos cuadrados y gráficos de cajas.

5.3.2-Relacion del IPA con las diferentes variables medidas en los robledales

El Índice de Pureza Atmosférica obtenido a través del examen líquénico ha establecido de forma evidente el modelo de dispersión de los contaminantes atmosféricos en la zona, influenciado tanto por la distancia a la fuente de emisión como por los vientos dominantes en mayor medida.

Esta es la principal razón por la que se intentara establecer relación entre el IPA y el resto de las variables medidas en los ecosistemas y expuestas anteriormente.

5.3.2.1.-Relacion de los niveles de IPA y las distintas fracciones de pH

En este apartado se estudia en qué medida los diferentes niveles del IPA (1:<20, 2:20-30, 3:>30) guardan analogía con a acidificación de los robledales estudiados. Es decir, si existen diferencias significativas para los distintos niveles de IPA en el pH de hojas, suelo y corteza de los puntos de muestreo estudiados.

En la Tabla 7 se exponen los resultados del análisis estadístico descriptivo de los valores de pH para los diferentes niveles de IPA.

Tabla 7. Estadísticas descriptivas de los valores de pH (hojas, suelo y corteza) para los distintos niveles IPA.

| pH hojas | | | | | | | |
|----------------|-------|----------------|---------------------|---------------------------|--------|--------|-------|
| Niveles de IPA | Count | Promedio | Desviación estándar | Coefficiente de variación | Mínimo | Máximo | Rango |
| 1 (<20) | 13 | 4,69231 | 0,294538 | 6,27704% | 4,28 | 5,34 | 1,06 |
| 2 (20-30) | 25 | 4,5424 | 0,233493 | 5,1403% | 4,15 | 5,03 | 0,88 |
| 3 (>30) | 29 | 4,66966 | 0,31929 | 6,83756% | 3,87 | 5,37 | 1,5 |
| Total | 67 | 4,62657 | 0,288442 | 6,23447% | 3,87 | 5,37 | 1,5 |
| pH suelo | | | | | | | |
| Niveles de IPA | Count | Promedio | Desviación estándar | Coefficiente de variación | Mínimo | Máximo | Rango |
| 1(<20) | 13 | 5,63615 | 1,0273 | 18,2269% | 4,53 | 7,59 | 3,06 |
| 2 (20-30) | 25 | 5,2892 | 0,773536 | 14,6248% | 3,85 | 6,9 | 3,05 |
| 3 (>30) | 29 | 5,14655 | 0,76392 | 14,8433% | 3,86 | 6,97 | 3,11 |
| Total | 67 | 5,29478 | 0,830459 | 15,6845% | 3,85 | 7,59 | 3,74 |
| pH corteza | | | | | | | |
| Niveles de IPA | Count | Promedio | Desviación estándar | Coefficiente de variación | Mínimo | Máximo | Rango |
| 1(<20) | 13 | 5,37615 | 0,687611 | 12,79% | 4,46 | 6,86 | 2,4 |
| 2 (20-30) | 25 | 4,9988 | 0,391507 | 7,83202% | 4,4 | 5,87 | 1,47 |
| 3 (>30) | 29 | 4,94 | 0,346008 | 7,00421% | 4,5 | 5,96 | 1,46 |
| Total | 67 | 5,04657 | 0,468769 | 9,28886% | 4,4 | 6,86 | 2,46 |

Una vez realizado el análisis de varianza no se han encontrado diferencias significativas entre los distintos niveles de IPA y el pH de la vegetación (hojas y corteza) y el suelo.

Si se comparan los valores medios de pH para las hojas (4,63), suelo (5,3) y corteza (5,0) se pueden encontrar diferencias significativas (Tabla 8) entre ambos compartimentos, lo que indica un efecto diferente de la contaminación atmosférica sobre la acidificación de los ecosistemas forestales. Así, las hojas son las que responden de manera más positiva disminuyendo su pH.

Tabla 8. Resultados del ANOVA de una vía para el valor de pH de las diferentes fracciones analizadas.

| Efecto | Suma de cuadrados | Df | Media cuadrática | F-Ratio | P-Valor |
|--------------|-------------------|-----|------------------|----------|----------|
| Intercepción | 5003,523 | 1 | 5003,523 | 15122,41 | 0,000000 |
| Fracciones | 15,287 | 2 | 7,644 | 23,10 | 0,000000 |
| Error | 65,512 | 198 | 0,331 | | |

Por otro lado se detectó una correlación positiva y significativa ($r=0,41$) para el pH de la corteza y el suelo, aunque el pH de las hojas no se encuentra relacionado con las otras fracciones, lo que indica una respuesta semejante a la contaminación de ambas fracciones (Figura 26).

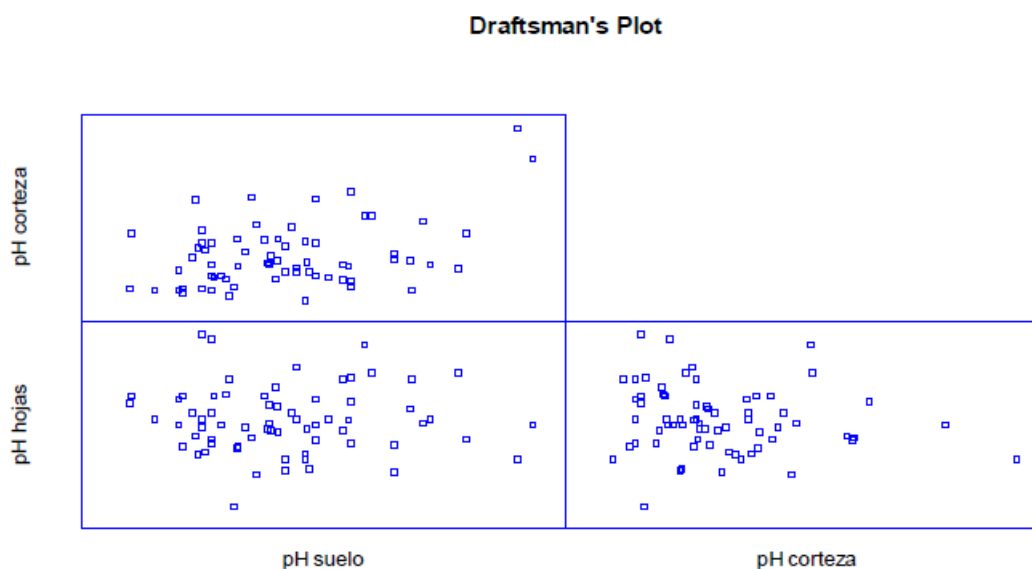


Figura 26. Diagrama Draftsman's Plot de relación entre los pH de corteza, hojas y suelo. Elaboración propia.

Como se apuntó anteriormente, en el año 2008, ajustándose a la nueva normativa de emisión de gases a la atmosfera, la central térmica de Velilla del Rio Carrión lleva a cabo la instalación de una planta de desulfuración, que teóricamente reduce un 97% las emisiones de óxido de azufre procedentes de los gases de combustión y en un 80% las

emisiones de partículas (IBERDROLA, 2014), esto puede explicar que el pH de la corteza y del suelo de la zona de estudio no presenten una relación clara con la polución, mientras que las hojas, las cuales absorben más inmediatamente los contaminantes, si presenten una clara acidificación.

Autores como Pena (2001) y Paoletti y Manes (2003) defienden que la contaminación atmosférica se ve reflejada en la acidez de las hojas ya que aumenta el contenido foliar de azufre.

Sin embargo, no se observaron evidencias claras de acidificación de los suelos en el entorno de la central térmica, y, aunque el valor medio del pH sea ácido (5,29), existe una gran variabilidad entre los resultados medidos. En el estudio de seguimiento que NOR-CONTROL (1997) llevo a cabo en los alrededores de las centrales térmicas de As Pontes y Meirama (A Coruña) también se observa este mismo comportamiento: Aunque el pH del suelo resultaba ácido en la mayoría de los casos no se pudo relacionar con la acción de los polutantes emitidos por dichas industrias.

Tampoco Bini y Bresolin (1998) encontraron acidificación de suelos forestales que habían estado expuestos a deposiciones ácidas, lo que puede ser debido a la modificación de la química del agua al atravesar la cubierta vegetal provocando un lavado de cationes y por lo tanto disminuyendo la acidez de los suelos (Draaijers *et al.*, 1996).

5.3.3.-Relacion entre las diferentes variables y el diámetro medio

Mediante el uso de la estadística descriptiva se intenta averiguar de qué manera incide la pureza atmosférica sobre el crecimiento en diámetro de los robles dentro del área muestreada. Se diferencian 3 niveles de IPA (1:<20, 2:20-30, 3:>30), analizándose de manera individual su influencia sobre la distribución de los diámetros medios (Tabla 9 y Figura 27).

En la Figura 27 y en la Tabla 9 se observa con claridad como los niveles más bajos de IPA conllevan a un menor diámetro medio. Por contraposición, cuanto mayor es la pureza atmosférica mayores son los desarrollos en diámetro de los robles.

Tabla 9. Estadísticas descriptivas del diámetro medio para las diferentes clases de IPA.

| Niveles de IPA | Count | Promedio | Desviación estandar | Coficiente de variación | Mínimo | Máximo | Rango |
|----------------|-------|----------|---------------------|-------------------------|--------|--------|-------|
| 1 (<20) | 13 | 16,4923 | 7,3951 | 44,8397% | 8,0 | 32,2 | 24,2 |
| 2 (20-30) | 25 | 17,664 | 7,70908 | 43,6429% | 7,1 | 37,9 | 30,8 |
| 3 (>30) | 29 | 18,884 | 6,41909 | 33,9922% | 6,2 | 38,4 | 32,2 |
| Total | 67 | 17,9063 | 7,09707 | 39,6344% | 6,2 | 38,4 | 32,2 |

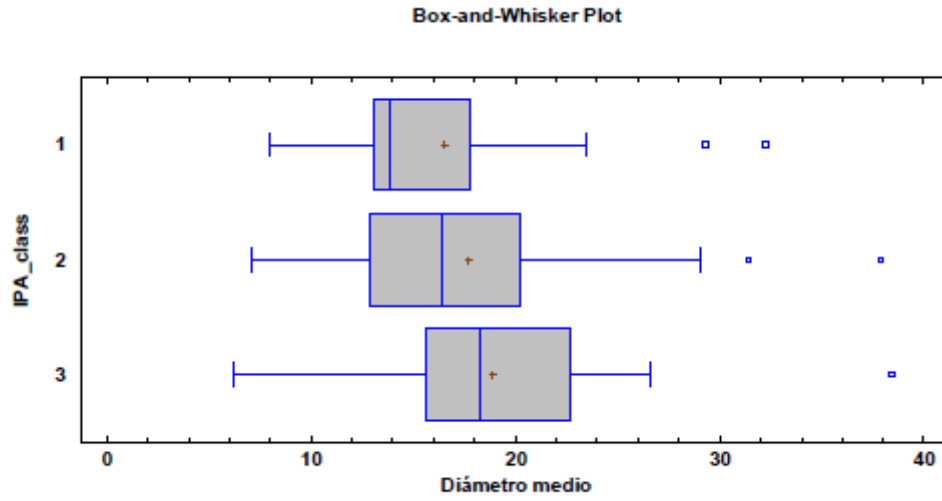


Figura 27. Diagrama Box and Whisker de los diámetros medios para las diferentes clases IPA.
Elaboración propia.

6.-CONCLUSIONES

1. El estudio de contaminación mediante bioindicadores liquénicos muestran en general una calidad del aire de mediocre a muy mala en la zona de estudio. El mayor nivel de contaminación aparece tanto en los terrenos próximos a la central térmica como a los 2,5 kilómetros en las zonas influenciadas por los vientos dominantes, notándose un evidente modelo de dispersión y gradiente de los contaminantes.
2. La distancia a la central térmica y la dirección del viento dominante son las dos variables que mejor explican la variabilidad del Índice de Pureza Atmosférica (IPA)
3. La extrapolación del modelo de distribución del IPA en los robledales a la totalidad de la zona de estudio ha permitido asegurar que la contaminación afecta de manera notoria a los núcleos de población de Guardo y Velilla del Río Carrión. Por lo tanto, la contaminación atmosférica producida en la central térmica no solo afecta al bienestar de los ecosistemas sino también a la salud humana.
4. El efecto de las emisiones acidas de la térmica es diferente según el compartimento analizado. Así, el mayor impacto de las emisiones acidas se produce sobre las hojas del roble rebollo, las cuales presentan un pH muy ácido en toda la zona de estudio. Sin embargo, tanto la corteza como el suelo presentan valores más altos de pH y no se observa un proceso claro de acidificación en los mismos.
5. El crecimiento en diámetro de los robles se relaciona con el IPA. Así, valores de IPA mas altos conllevan un mayor diámetro, pudiendo concluir que la pureza del aire es un factor decisivo en el crecimiento de los robles.
6. No se han encontrado evidencias de enfermedades y daños producidos por la contaminación atmosférica en las masas forestales estudiadas. Si se ha detectado de manera aleatoria la presencia del hongo patógeno Oidio.

7.-BIBLIOGRAFÍA

- AMMANN, K.; HERZIG, R.; LIEBENDORFER, L.; URECH, M. Multivariate correlation of deposition data o 8 different air pollutants to lichen data in a small town in Switzerland. *Advances in Aeriobiologi*. 1987, p. 401-406.
- ANZE, R.; CANSECO, A.; FRANKEN, M. Comunidades de líquenes indicadores de la calidad del aire en la ciudad de La Paz, Bolivia. Universidad Mayor de San Andrés, Unidad de Calidad Ambiental. 2006.
- BARCENA-RUIZ, M.J.; BESGA, G.; GONZÁLEZ-ARIAS, A.; MARTÍNEZ, I.; ONAINDIA, M. Origin of atmospheric deposition and canopy buffering capacity in stands of radiate pine and pedunculate oak in the Basque Country. *Landare-Biologia eta Ekologia Saila, Euskal Herriko Unibertsitatea. Bizkaia*. 2006.
- BARGAGLI, R.; BENEDET, A.; CASTELLO, M.; CICCARELLI, A.; GASPARO, D.; LAUSI, D.; LAZZARIN, G.; NIMIS, P.L.; OLIVIERI,S.; TRETACH, M. I licheni come bioindicatori di inquinamento atmosferico nel´ area di Schio - Thiene - Breganze. *Bollettino del Museo Civico di Storia Naturale di Verona. Verona (Italia)*. 1989, p. 1-154.
- BINI, C.; BRESOLIN, F. Soil acidification by acid rain in forest ecosystems: A case study in northern Italy. Department of Environmental Sciences, University of Venice. Italia. 1998.
- BRUNEKREEF, B.; HOLGATE, S. Air pollution and health. *The lancet* 360. 2002, p.1233 1242.
- CALATAYUD, V.; SANZ, M.J. Guía de líquenes epifitos en las parcelas del sistema Pan Europeo para el seguimiento intensivo y continuo de los sistemas forestales (Red CE de Nivel II) en España. Ministerio de Medio Ambiente. Dirección General de Conservación de la Naturaleza. 2000.
- CISLAGHI, C.; NIMIS, P.L. Lichens, air pollution and lung cancer. *Nature* 387. 1997, p. 463-464.
- DEFRA. The impacts of acid and nitrogen deposition on: Lowland heath. Department for Environment, Food and Rural Affairs of the UK. UKREATE (United Kingdom Research on Eutrophication and Acidification of Terrestrial Ecosystems Programme). 2008.
- DE GRAAF, M.C.C.; BOBBINK, R.; ROELOFS, J.G.M.; VERBEEK P.J.M. Differential effects of ammonium and nitrate on three heathland species. *Plant Ecology* 135. Volumen 2. 1998, p. 185-196
- DRAAIJERS, G.P.J.; ERISMAN, J.W.; SPRANGER, T.; WYERS, G.P. The application of throughfall measurements for atmospheric deposition monitoring. *Atmospheric Environment* 30. 1996, p. 3349-3361.

FERNÁNDEZ, A.; RAMÍREZ, J.; SAN ROMÁN, J.M.; BLANCO, J.; SARMIENTO, L.A.; CUEVAS, Y. El alto Bierzo: una apuesta por el desarrollo forestal sostenible. Monografías del Plan 42. Serie divulgativa. Junta de Castilla y León. 2004.

FERNÁNDEZ-SALEGUI, A.B.; TERRÓN, A. Biomonitorización de la calidad del aire en los alrededores de La Robla (León). Ecosistemas 2. 2003, no 2.

FILELLA, I.; GARCIA, C.; PENUÉLAS, J.; SABATE, S. Efectos del cambio climático sobre los ecosistemas terrestres: observación, experimentación y simulación. En: Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid. 2004, capítulo 15, p. 425-460.

FILELLA, I.; GARCÍA, C.; PEÑUELAS, J.; SABATE, S. Informe sobre el Canvi Climatic a Catalunya”, Institut d’Estudis Catalans. Departament de Medi Ambient de la Generalitat de Catalunya. 2003.

FORDHAM UNIVERSITY. [En la web] (Consulta realizada en enero de 2014) 2014. Disponible en: <http://www.fordham.edu/halsall/mod/modsbook14.asp>

GOBIERNO DE CANARIAS. [En la web] (Consulta realizada en enero de 2014) 2014. Disponible en: <http://www.gobiernodecanarias.org/educacion/3/usrn/lentiscal/1cdquimica-tic/WebQuest/WebQuestlluvia%20%C3%A1cida/WQlluviaacida.htm>

HICKS, W.K.; FLOWLER, D.; LEITH, I.D.; WOODIN, S.J. Can the foliar nitrogen concentration of upland vegetation be used for predicting atmospheric nitrogen deposition? Evidence from field surveys. Environmental Pollution. 2000, p. 367-376.

IBERDROLA. BLOG. [En la web] (Consulta realizada en enero de 2014) 2014. Disponible en: <http://www.blog.iberdrola.com/blog/innovacion-para-reducir-las-emisiones-en-centrales-electricas/>

INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA (IGME). [En la web] (Consulta realizada en junio de 2015) 2015. Disponible en:
<http://www.igme.es/internet/cartografia/cartografia/magna50.asp?hoja=105&bis=>
<http://www.igme.es/internet/cartografia/cartografia/magna50.asp?hoja=106&bis=>
<http://www.igme.es/internet/cartografia/cartografia/magna50.asp?hoja=131&bis=>
<http://www.igme.es/internet/cartografia/cartografia/magna50.asp?hoja=132&bis=>

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA. [En la web] (Consulta realizada en enero de 2014) 2014. Disponible en: <http://www.ine.es/>

INTERNATIONAL CO-OPERATIVE PROGRAMME ON ASSESSMENT AND MONITORING OF AIR POLLUTION EFFECTS ON FOREST (ICP-FORESTS). [En la web] (Consulta realizada en octubre de 2013) 2013. Disponible en: <http://icp-forests.net/>

IPCC. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE. [En la web] (Consulta realizada en enero de 2013) 2013. Disponible en: <http://www.ipcc.ch/>

KRAUSE, G.H.M.; ARNDT, U.; BRANDT, J.; BUCHER, G.; KENK, G.; MATZNER, E. Forest decline in Europe: Development and possible causes. Water Air Soil Pollution. 1986, p. 647-668.

LENDZIAN, K.J.; UNSWORTH M.S. Ecophysiological effects of atmospheric pollutant. En: PIRSON, A.; ZIMMERMANN, M.H. Encyclopedia of Plant Physiology, Physiological Plant Ecology. 1983, Tomo IV, p. 412-502.

LIJTEROFF, R.; LIMA, L.; PRIERI, B. Uso de líquenes como bioindicadores de contaminación atmosférica en la ciudad de San Luis, Argentina. Universidad Nacional de San Luis. 2009.

MAGRAMA. ATMÓSFERA Y CALIDAD DEL AIRE. [En la web] (Consulta realizada en junio de 2015) 2015. Disponible en:
<http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/>

MAGRAMA. RED EUROPEA DE DAÑOS. [En la web] (Consulta realizada en enero de 2014) 2014. Disponible en:
http://www.magrama.gob.es/es/biodiversidad/temas/sanidad-forestal/redes-deseguimiento-de-los-bosques/red_nivel_1_danos.aspx

MAGRAMA, SPCAN (Servicio de Protección de los Montes Contra Agentes Nocivos). Manual Red CE de Nivel II, Parte VI: Medidores Pasivos de Contaminantes y Parte VII: Inventario de Líquenes Epifitos. 2013.

M.A.P.A. Métodos oficiales de análisis. Servicio de Publicaciones del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid. 1994, Tomo III, p. 223-225.

MATAMALA, R.; PEÑUELAS, J. Changes in N and S leaf content, stomatal density and specific leaf area of 14 plant species during the last three centuries of CO₂ increase. Journal of Experimental Botany 41. 1990, p. 1119-1124.

NILSSON, J.; GRENNFELT, P. Critical loads for sulphur and nitrogen. Miljorapport 1988: 15. Copenhagen Nordic Council of Ministers. 1988, p. 418.

NOR-CONTROL. Estudio de Seguimiento de la Caracterización Ecológica del Entorno de las CC.TT. de As Pontes y Meirama. 1997.

PAOLETTI, E. UV-B and acid rain effects on beech (*Fagus sylvatica* L.) and holm oak (*Quercus ilex* L.) leaves. Chemosphere 36. 1998, p. 835-840.

PAOLETTI, E.; MANES, F. Effects of elevated carbon dioxide and acid rain on the growth of holm oak. Development in Environmental Science. 2003, p. 375-389.

PARDOS, J.A. La contaminación atmosférica y los ecosistemas forestales. Investigaciones Agrarias: Sistemas y Recursos Forestales. ETS de Ingenieros de Montes. Universidad Politécnica de Madrid. 2006, p. 55-70.

PENA, J.M. El Estudio de la Contaminación Atmosférica en los Bosques. DGCONA. 2001, p. 1-425.

PERCY, K. Is air pollution an important factor in forest health? En: NATO SCIENCE SERIES. Effects of air pollution on forest health and biodiversity in forest of the Carpathian Mountains. 2002, Serie I, p. 23-42.

PRIN, B.; KRAUSE G.H.M.; JUNG K.D. Development and cause of novel forest decline in Germany. En: Nato Asi Series, Ecological sciences 16. Effects of atmospheric pollutants on forest, wetlands and agricultural ecosystem. 1985, p. 1-24.

REGISTRO ESTATAL DE EMISIONES Y FUENTES CONTAMINANTES. [En la web] (Consulta realizada en enero de 2014) 2014. Disponible en: http://www.prtres.es/informes/fichacomplejo.aspx?id_complejo=3240

RODRIGUEZ-LADO, L.; MACÍAS, F.; Calculation and mapping of critical loads of Sulphur and nitrogen for forest in Galicia NW Spain. Science of the Total Environment 366. 2006, p.760-771.

ROWE E.C.; EMMETT, B.A.; EVANS, C.D.; KENNEDY, V.H.; SMART, S.M. Nitrogen deposition increases the acquisition of phosphorous and potassium by heather *Calluna vulgaris*. Environmental Pollution. 2008, p. 201-207.

SHEN, W.; REN, H.; DARREL-JENERETTE, G.; HUI, D.; REN, H. Atmospheric deposition and canopy exchange of anions and cations in two plantation forests under acid rain influence. Atmospheric Environment 64. 2013, p. 242-250.

SMITH, T.M.; SMITH, R.L. Ecología. 4ª Edición. Madrid. 2001, p. 664.

SMITH, T.M.; SMITH, R.L. Ecología. 6ª Edición. Madrid. 2007, p. 776.

SMITH, U.M.; TILMAN, G.D.; NEOKOLE, J.C. Eutrophication: Impacts of excess nutrient inputs on freshwater manure, and terrestrial ecosystem. Environmental Pollution 100. 1999, p. 179-196

SPITTLEHOUSE, D.L. Climate change: impacts and adaptation in forestry. En: Proceedings of the 29th meeting of the Canadian Tree Improvement Association. 2005, p. 43-48.

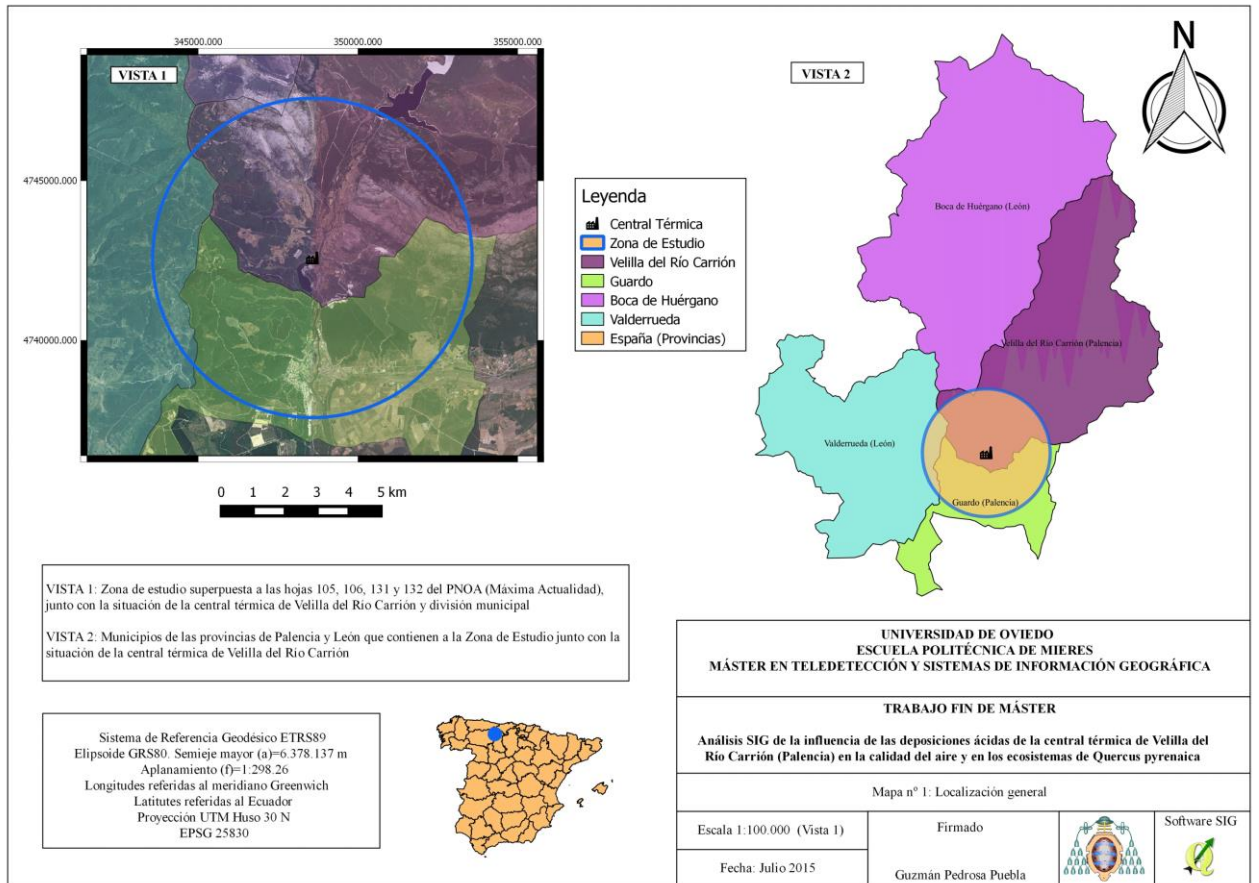
TERRÓN, A.; BARRENO, E. Estimation of air pollution in the area of influence of the coal power station at La Robla (León, Northwest Spain) using epiphytic lichens as bioindicators. Bryol. Lichenol 15 (2). 1994, p. 135-151.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. [En la web] (Consulta realizada en enero de 2014) 2014. Disponible en: <http://www.epa.gov/acidrain>

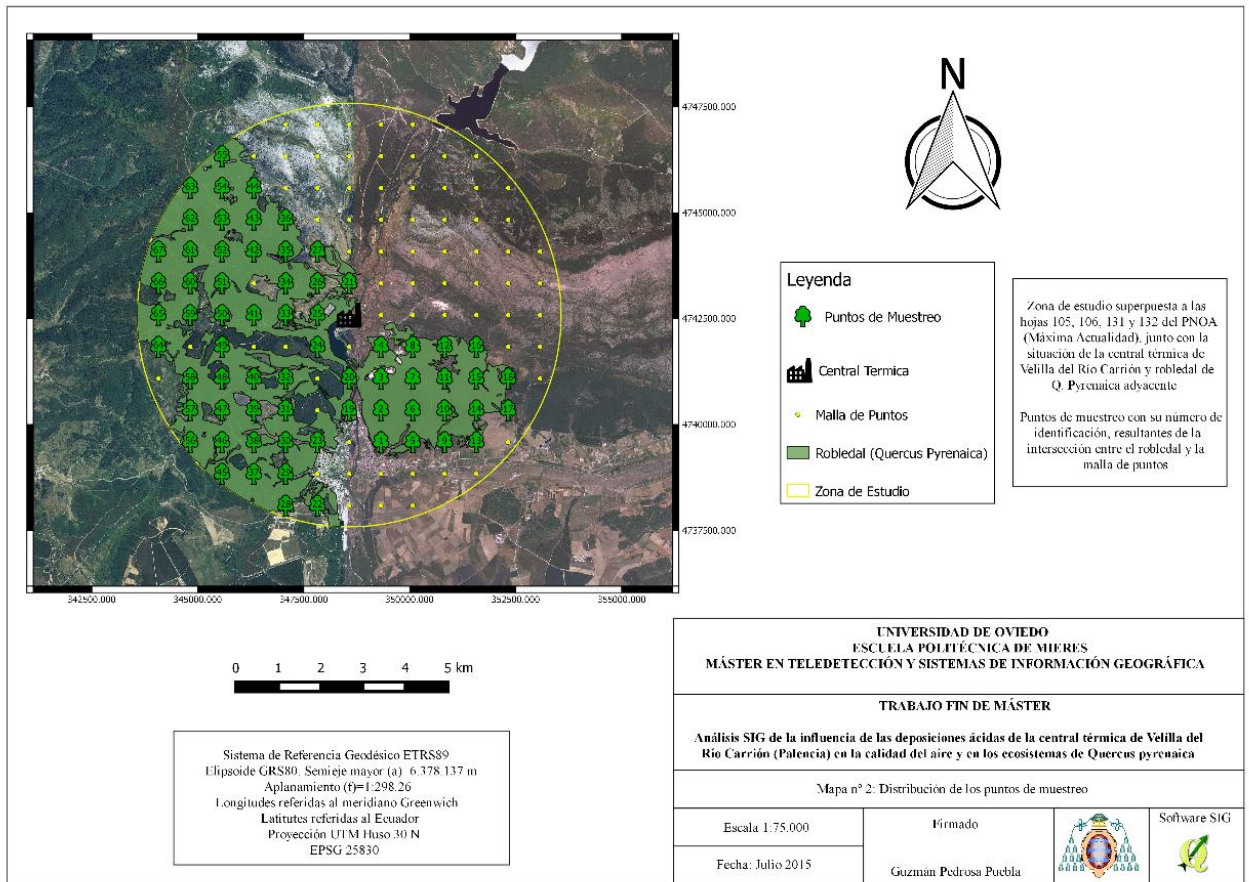
WIRTH, V. Die Flechten Baden-Wurttembergs Teil 1 & 2. Ulmer, Stuttgart, Germany. 1995.

ANEXOS

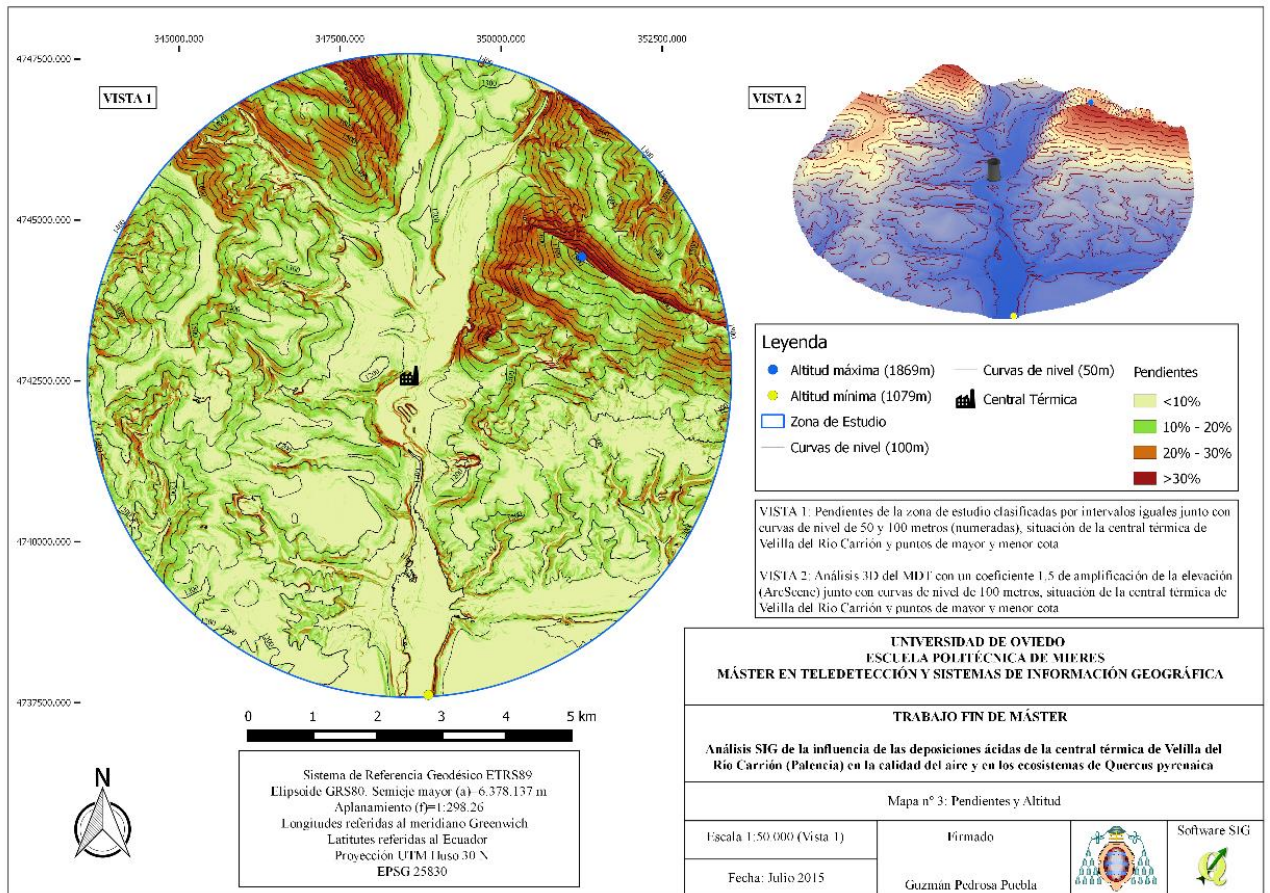
Mapa 1 - Localización general



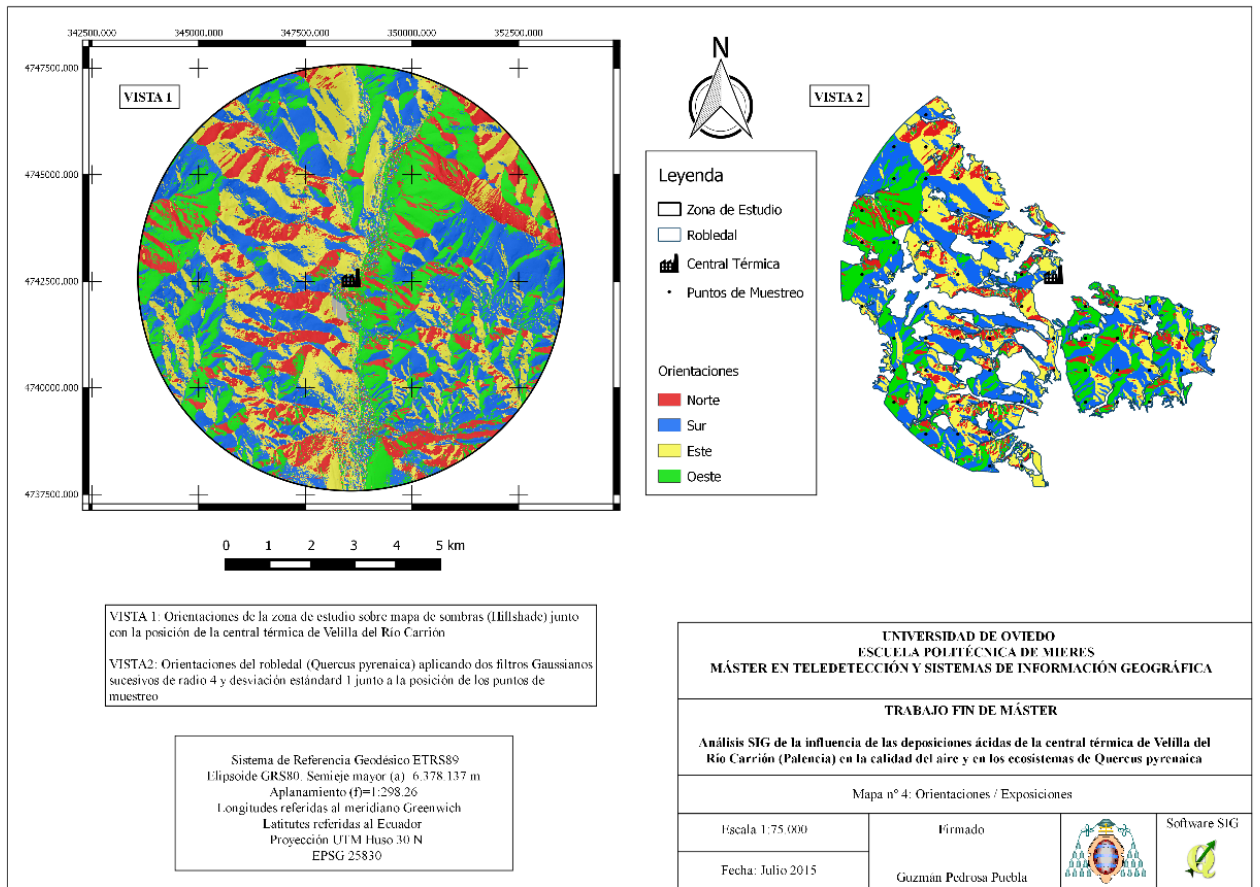
Mapa 2 - Distribución de los puntos de muestreo



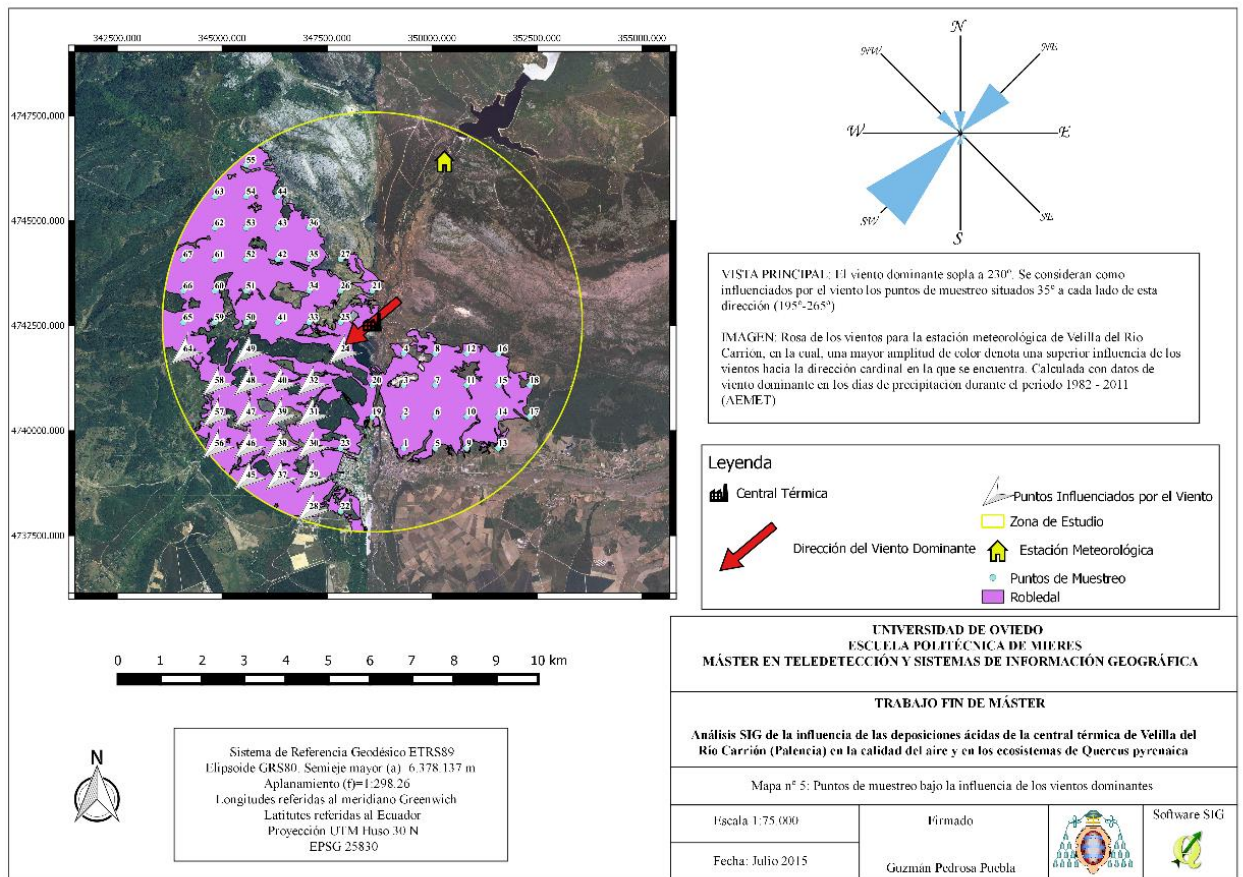
Mapa 3 - Pendientes y Altitud



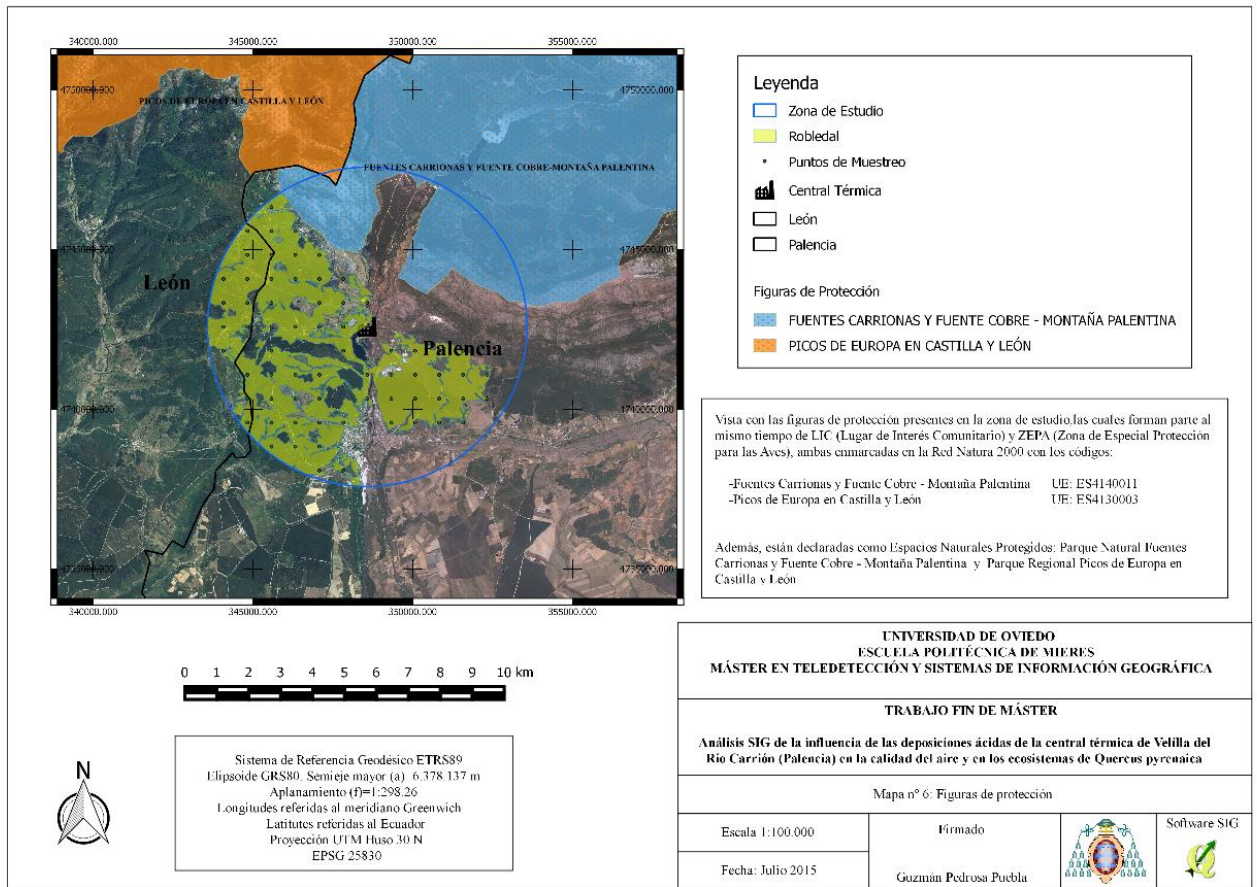
Mapa 4 - Orientaciones Exposiciones



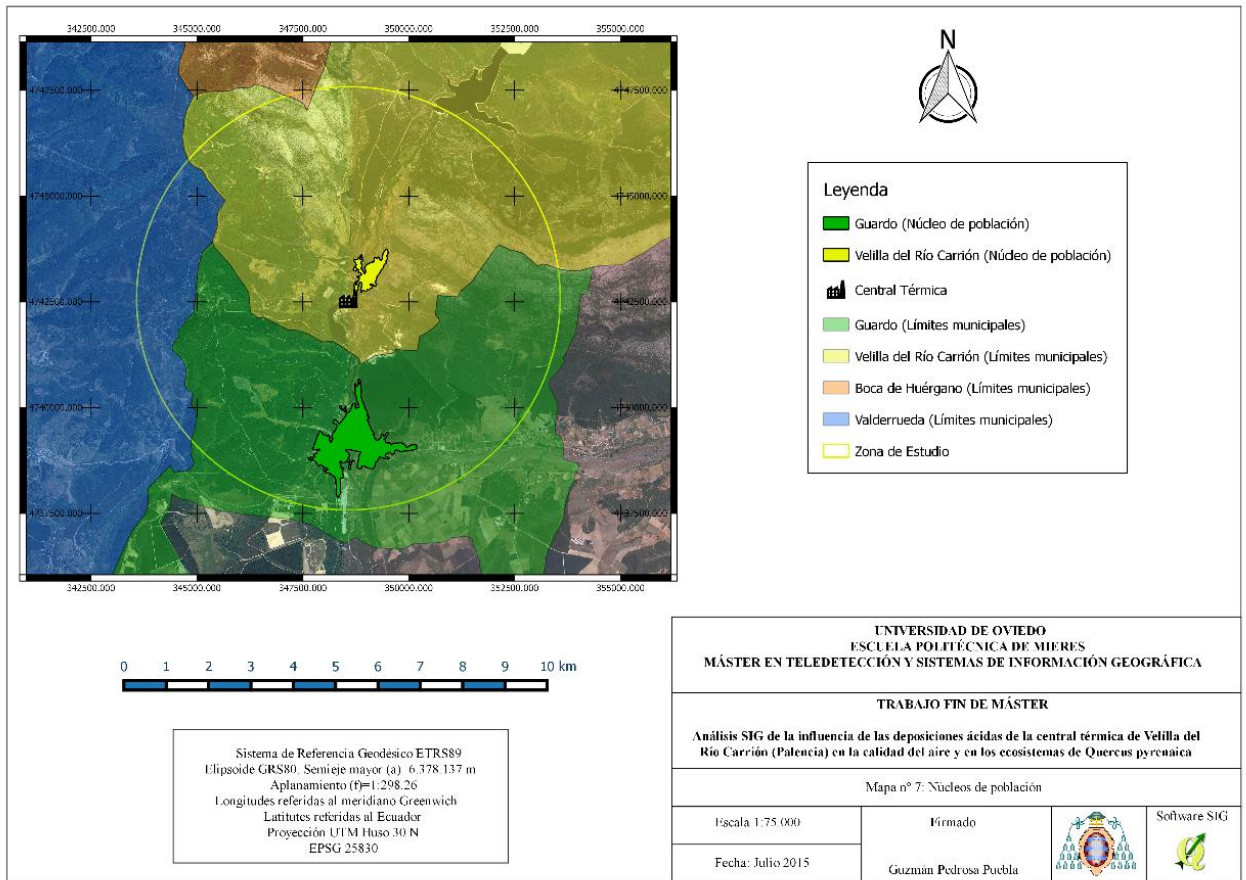
Mapa 5 - Puntos de muestreo bajo la influencia de los vientos dominantes



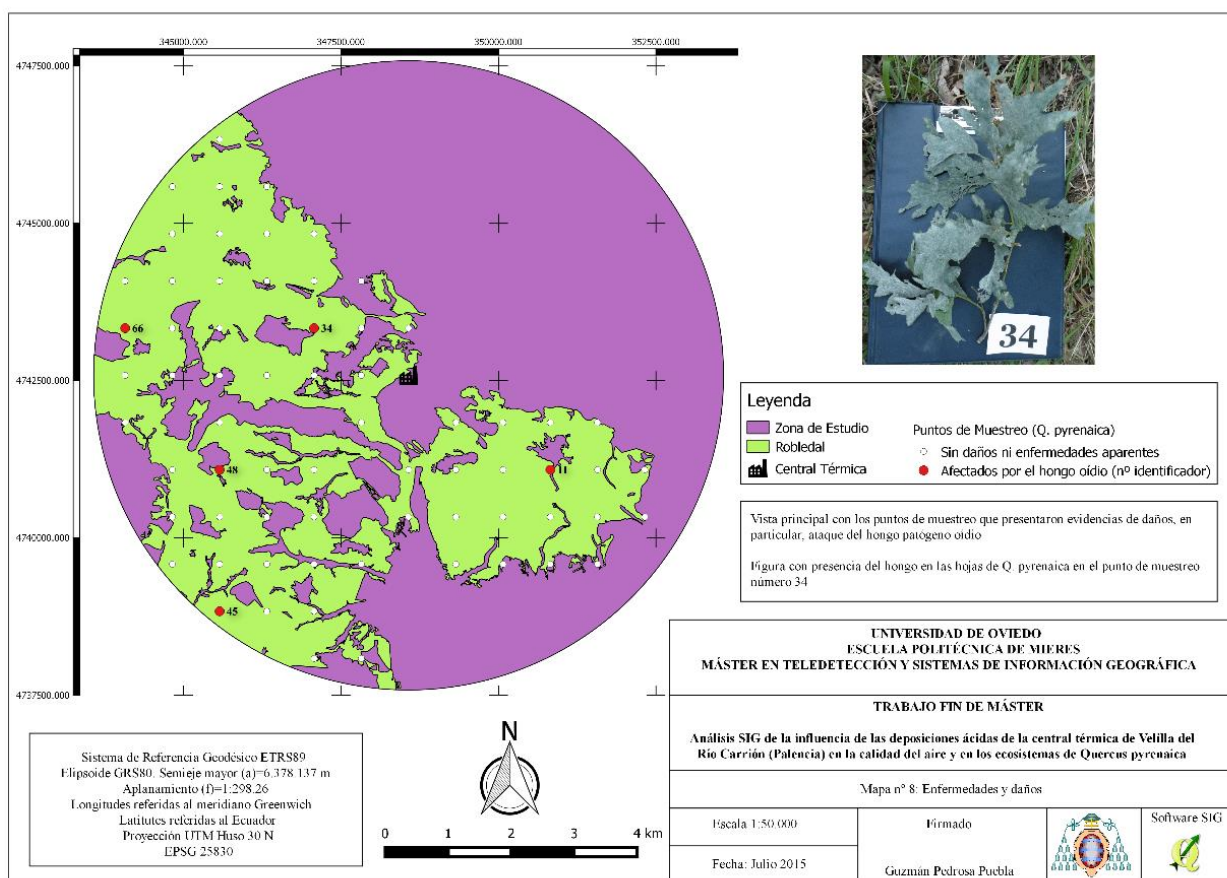
Mapa 6 - Figuras de protección



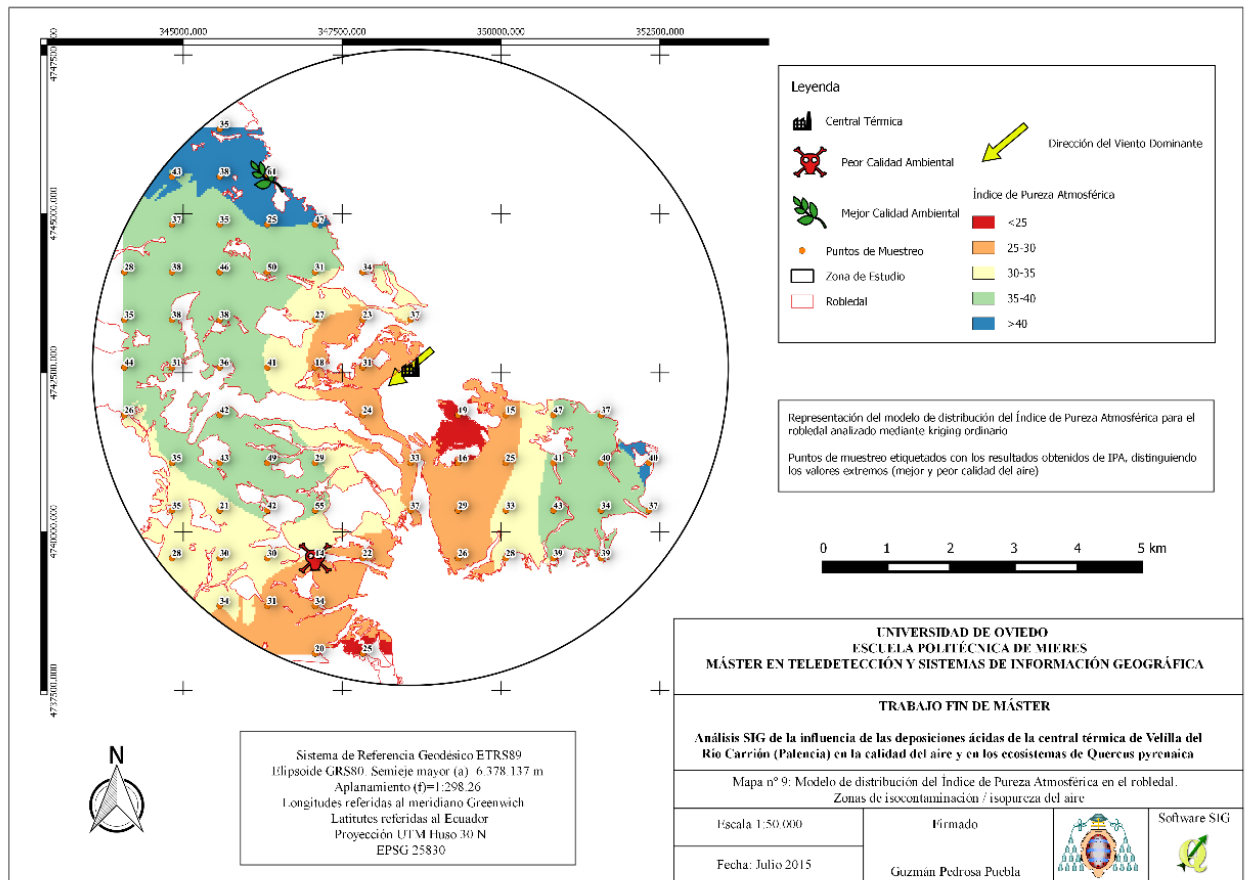
Mapa 7 - Núcleos de población



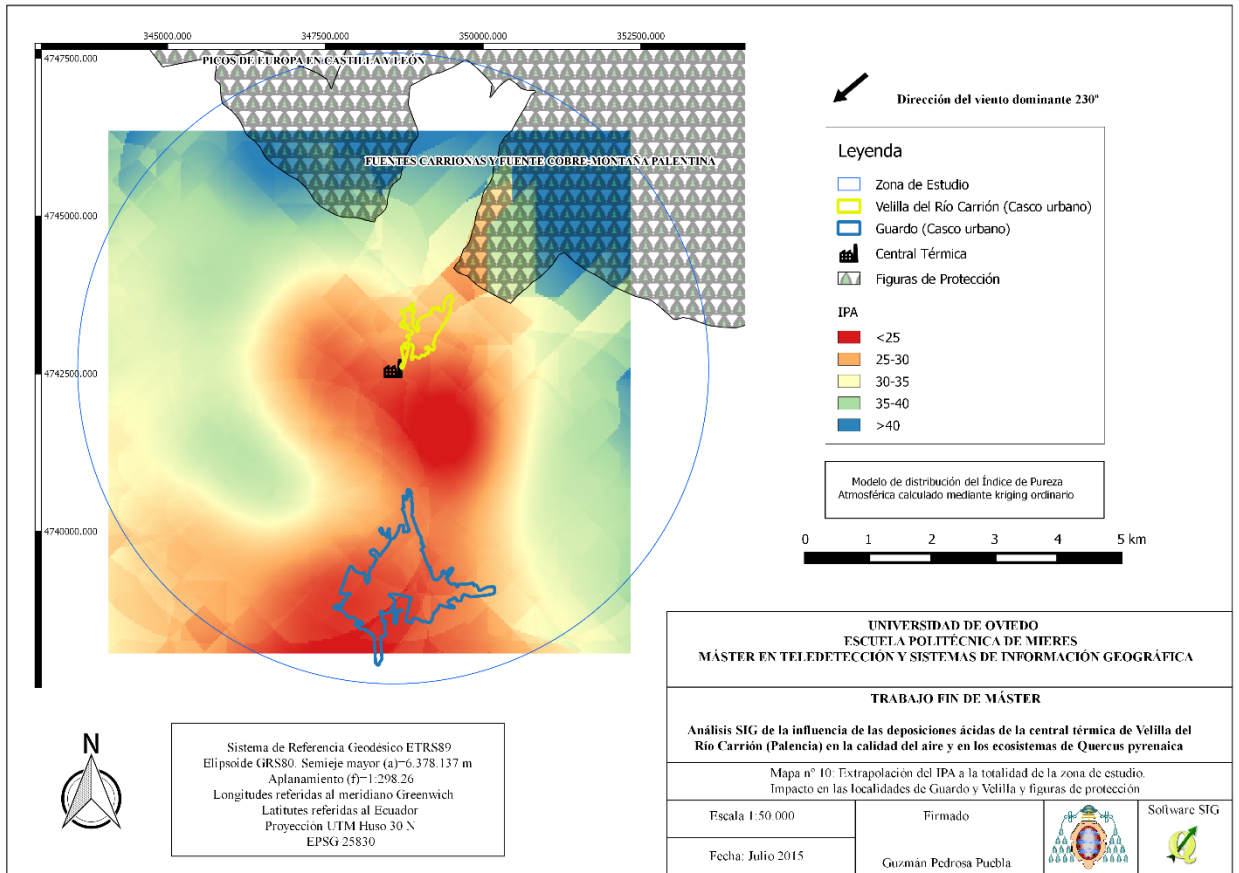
Mapa 8 - Enfermedades y daños



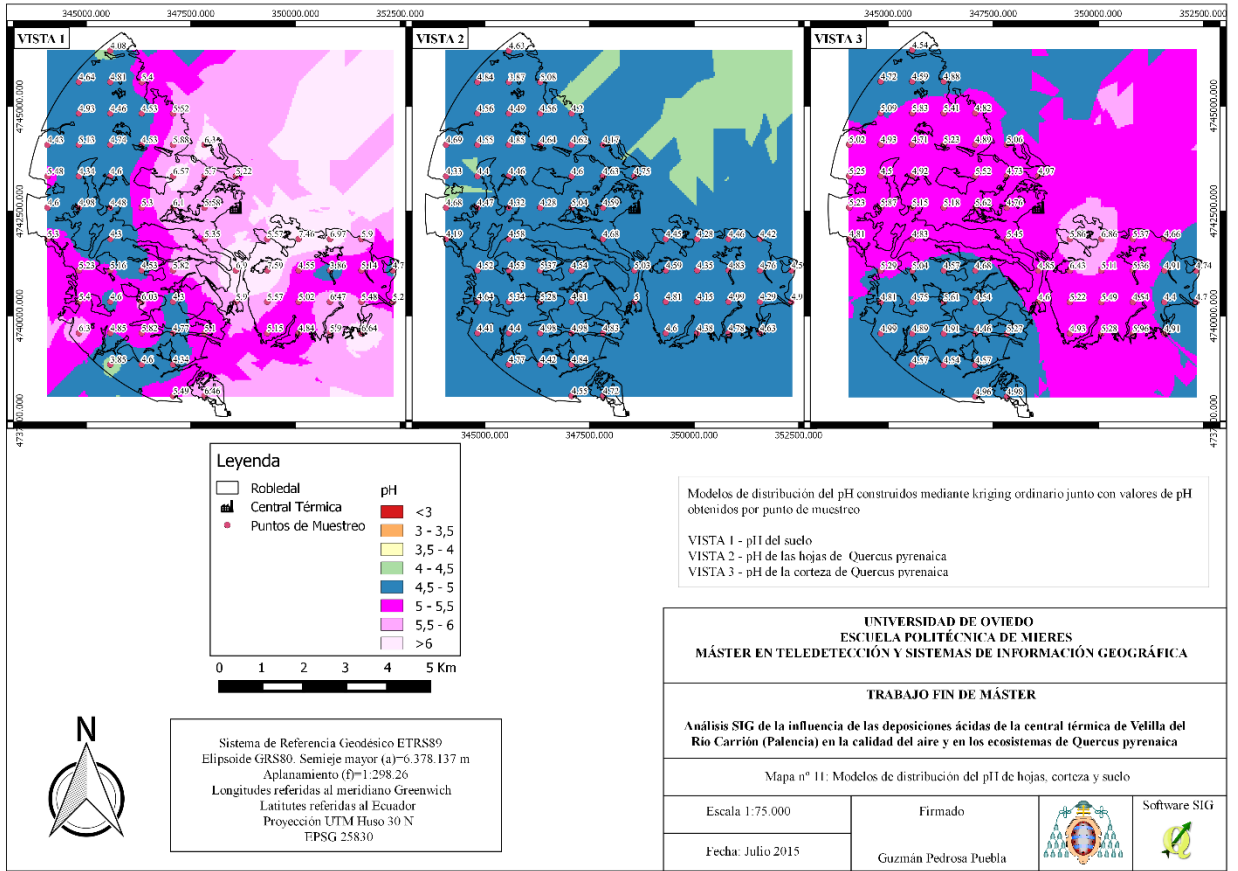
Mapa 9 - Modelo de distribución del Índice de Pureza Atmosférica en el robledal. Zonas de isocontaminación isopureza del aire



Mapa 10 -Extrapolación del IPA a la totalidad de la zona de estudio. Impacto en las localidades de Guardo y Velilla y figuras de protección



Mapa 11 - Modelos de distribución del pH de hojas, corteza y suelo



Coordenadas XY (ETRS89) de los puntos de muestreo

| Numero identificador del punto de muestreo | X | Y |
|--|-------------|--------------|
| 1 | 349324,1689 | 4739584,7426 |
| 2 | 349324,1689 | 4740334,7426 |
| 3 | 349324,1689 | 4741084,7426 |
| 4 | 349324,1689 | 4741834,7426 |
| 5 | 350074,1689 | 4739584,7426 |
| 6 | 350074,1689 | 4740334,7426 |
| 7 | 350074,1689 | 4741084,7426 |
| 8 | 350074,1689 | 4741834,7426 |
| 9 | 350824,1689 | 4739584,7426 |
| 10 | 350824,1689 | 4740334,7426 |
| 11 | 350824,1689 | 4741084,7426 |
| 12 | 350824,1689 | 4741834,7426 |
| 13 | 351574,1689 | 4739584,7426 |
| 14 | 351574,1689 | 4740334,7426 |
| 15 | 351574,1689 | 4741084,7426 |
| 16 | 351574,1689 | 4741834,7426 |
| 17 | 352324,1689 | 4740334,7426 |
| 18 | 352324,1689 | 4741084,7426 |
| 19 | 348574,1689 | 4740334,7426 |
| 20 | 348574,1689 | 4741084,7426 |
| 21 | 348574,1689 | 4743334,7426 |
| 22 | 347824,1689 | 4738084,7426 |
| 23 | 347824,1689 | 4739584,7426 |
| 24 | 347824,1689 | 4741834,7426 |
| 25 | 347824,1689 | 4742584,7426 |
| 26 | 347824,1689 | 4743334,7426 |
| 27 | 347824,1689 | 4744084,7426 |
| 28 | 347074,1689 | 4738084,7426 |
| 29 | 347074,1689 | 4738834,7426 |
| 30 | 347074,1689 | 4739584,7426 |
| 31 | 347074,1689 | 4740334,7426 |
| 32 | 347074,1689 | 4741084,7426 |
| 33 | 347074,1689 | 4742584,7426 |
| 34 | 347074,1689 | 4743334,7426 |
| 35 | 347074,1689 | 4744084,7426 |
| 36 | 347074,1689 | 4744834,7426 |
| 37 | 346324,1689 | 4738834,7426 |
| 38 | 346324,1689 | 4739584,7426 |
| 39 | 346324,1689 | 4740334,7426 |
| 40 | 346324,1689 | 4741084,7426 |

| Numero identificador del punto de muestreo | X | Y |
|--|-------------|--------------|
| 41 | 346324,1689 | 4742584,7426 |
| 42 | 346324,1689 | 4744084,7426 |
| 43 | 346324,1689 | 4744834,7426 |
| 44 | 346324,1689 | 4745584,7426 |
| 45 | 345574,1689 | 4738834,7426 |
| 46 | 345574,1689 | 4739584,7426 |
| 47 | 345574,1689 | 4740334,7426 |
| 48 | 345574,1689 | 4741084,7426 |
| 49 | 345574,1689 | 4741834,7426 |
| 50 | 345574,1689 | 4742584,7426 |
| 51 | 345574,1689 | 4743334,7426 |
| 52 | 345574,1689 | 4744084,7426 |
| 53 | 345574,1689 | 4744834,7426 |
| 54 | 345574,1689 | 4745584,7426 |
| 55 | 345574,1689 | 4746334,7426 |
| 56 | 344824,1689 | 4739584,7426 |
| 57 | 344824,1689 | 4740334,7426 |
| 58 | 344824,1689 | 4741084,7426 |
| 59 | 344824,1689 | 4742584,7426 |
| 60 | 344824,1689 | 4743334,7426 |
| 61 | 344824,1689 | 4744084,7426 |
| 62 | 344824,1689 | 4744834,7426 |
| 63 | 344824,1689 | 4745584,7426 |
| 64 | 344074,1689 | 4741834,7426 |
| 65 | 344074,1689 | 4742584,7426 |
| 66 | 344074,1689 | 4743334,7426 |
| 67 | 344074,1689 | 4744084,7426 |

Matriz de diagramas de dispersión, líneas de mínimos cuadrados y diagramas de caja

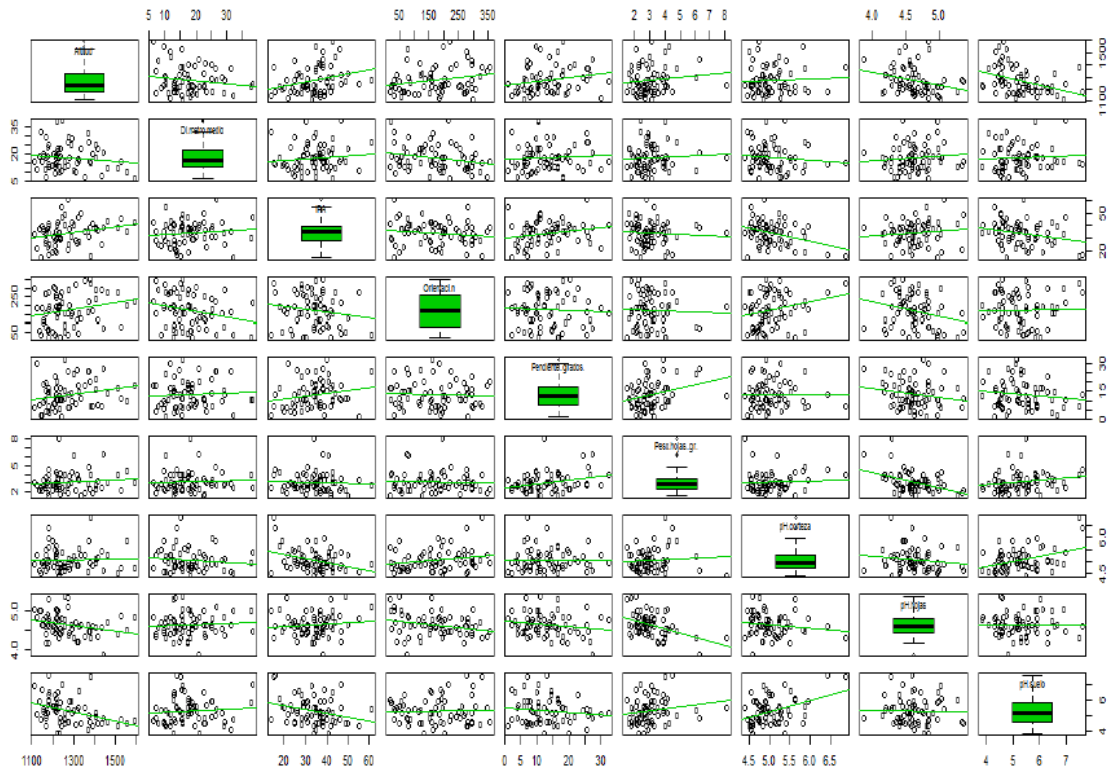
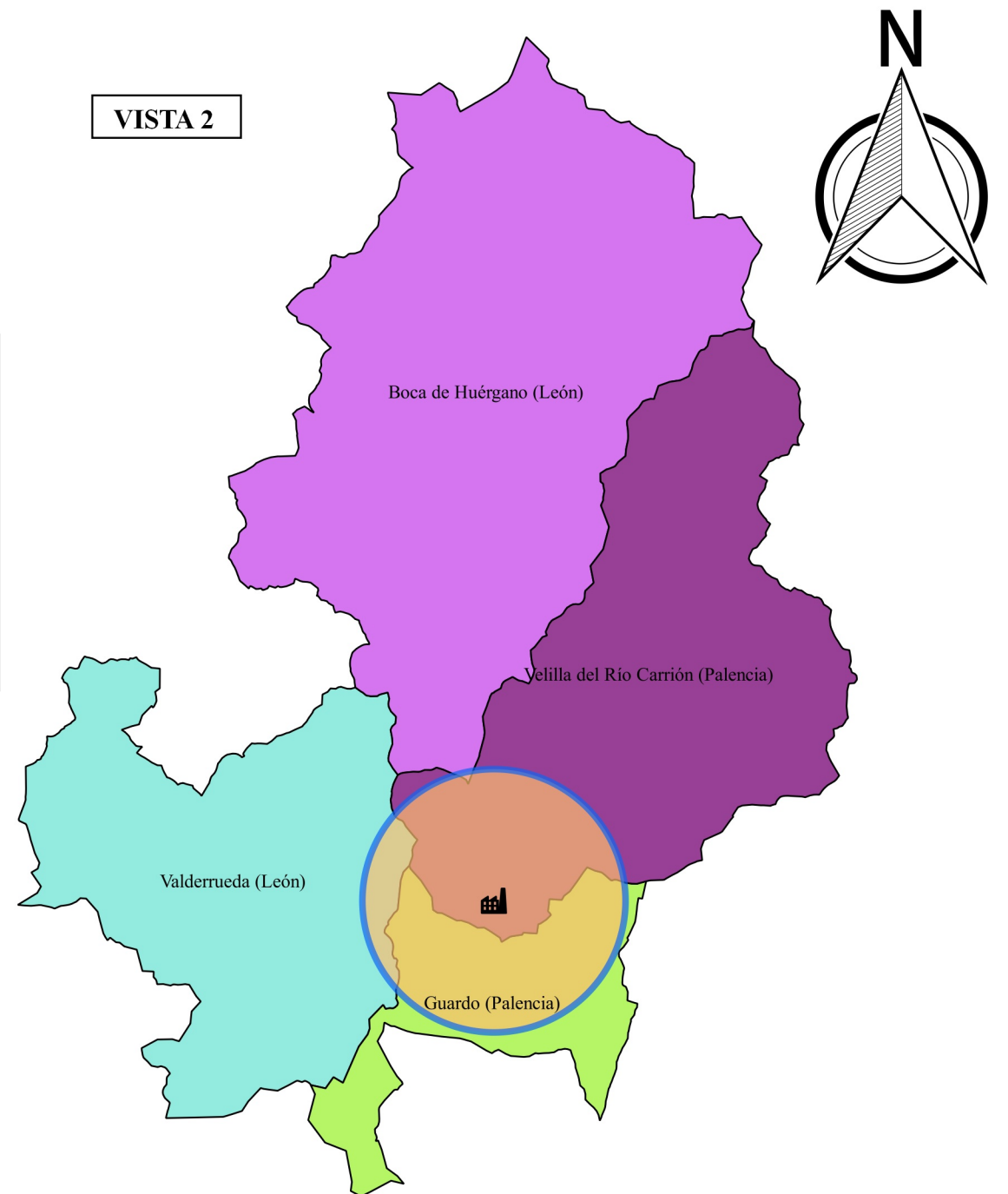
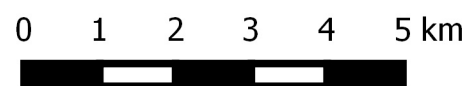
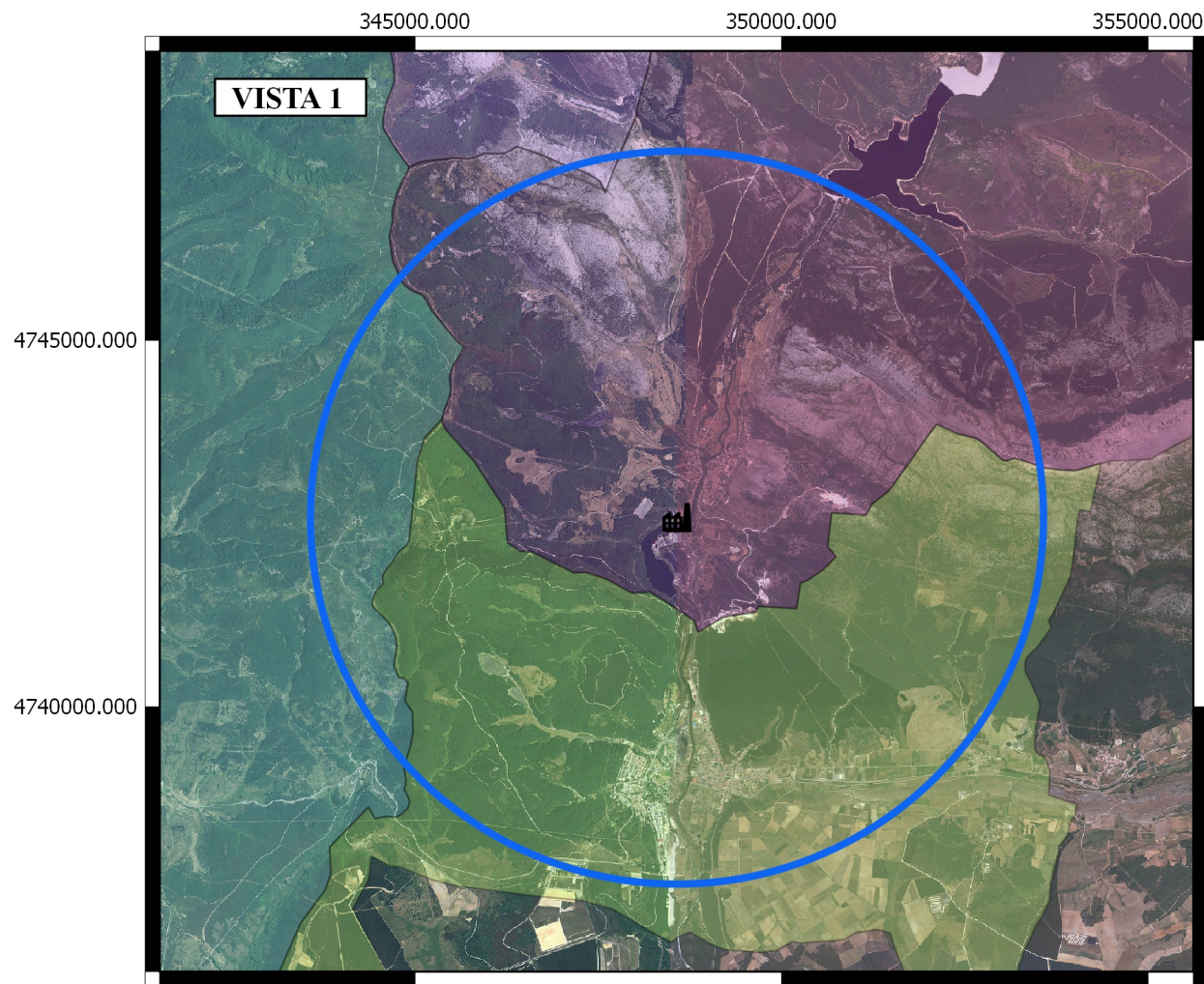


Tabla de datos

| Punto de muestreo n° | Peso hojas (gr) | pH hojas | pH suelo | Diámetro medio | IPA | pH corteza | Distancia punto-central (m) | Altitud | Pendiente (grados) | Orientación | Enfermo |
|----------------------|-----------------|----------|----------|----------------|-----|------------|-----------------------------|---------|--------------------|-------------|---------|
| 1 | 2,4 | 4,6 | 5,15 | 11,2 | 26 | 4,93 | 3.092 | 1163,41 | 10,18 | 271,10 | No |
| 2 | 2,6 | 4,81 | 5,57 | 19,4 | 29 | 5,22 | 2.372 | 1215,48 | 10,58 | 261,84 | No |
| 3 | 4,5 | 4,59 | 7,59 | 14,0 | 16 | 6,43 | 1.677 | 1180,57 | 13,19 | 278,35 | No |
| 4 | 2,1 | 4,45 | 5,57 | 13,6 | 19 | 5,86 | 1.061 | 1198,13 | 6,06 | 50,01 | No |
| 5 | 2,7 | 4,38 | 4,84 | 7,2 | 28 | 5,28 | 3.354 | 1165,78 | 3,87 | 152,84 | No |
| 6 | 3,6 | 4,15 | 5,02 | 17,5 | 33 | 5,49 | 2.704 | 1168,81 | 19,50 | 268,72 | No |
| 7 | 2,9 | 4,35 | 4,55 | 29,3 | 25 | 5,11 | 2.121 | 1277,58 | 13,05 | 293,71 | No |
| 8 | 4 | 4,28 | 7,46 | 15,2 | 15 | 6,86 | 1.677 | 1381,46 | 6,95 | 328,58 | No |
| 9 | 3,3 | 4,78 | 5,9 | 25,3 | 39 | 5,96 | 3.750 | 1179,72 | 7,04 | 181,01 | No |
| 10 | 3,5 | 4,99 | 6,47 | 22,7 | 43 | 4,54 | 3.182 | 1224,70 | 10,07 | 156,15 | No |
| 11 | 2,3 | 4,83 | 3,86 | 21,2 | 41 | 5,36 | 2.704 | 1221,71 | 20,16 | 131,01 | Si |
| 12 | 2,4 | 4,46 | 6,97 | 38,4 | 47 | 5,37 | 2.372 | 1245,71 | 10,54 | 213,96 | No |
| 13 | 2,1 | 4,63 | 6,64 | 15,6 | 39 | 4,91 | 4.243 | 1146,30 | 2,01 | 188,77 | No |
| 14 | 8,1 | 4,29 | 5,48 | 18,1 | 34 | 4,4 | 3.750 | 1227,36 | 12,45 | 194,04 | No |
| 15 | 3,9 | 4,76 | 5,14 | 15,8 | 40 | 4,91 | 3.354 | 1258,39 | 32,41 | 159,01 | No |
| 16 | 3,8 | 4,42 | 5,9 | 17,8 | 37 | 4,66 | 3.092 | 1282,44 | 5,92 | 204,39 | No |
| 17 | 1,9 | 4,91 | 5,2 | 18,6 | 37 | 4,7 | 4.373 | 1175,41 | 14,85 | 56,78 | No |
| 18 | 2,2 | 4,59 | 4,71 | 13,1 | 40 | 4,74 | 4.039 | 1257,25 | 15,52 | 86,45 | No |
| 19 | 2,2 | 5 | 5,9 | 18,3 | 37 | 4,6 | 2.250 | 1134,19 | 7,87 | 55,60 | No |
| 20 | 3,1 | 5,03 | 6,9 | 15,9 | 33 | 4,85 | 1.500 | 1111,73 | 6,03 | 298,69 | No |
| 21 | 3,3 | 4,75 | 5,22 | 20,3 | 37 | 4,97 | 750 | 1154,53 | 8,75 | 114,65 | No |
| 22 | 2,7 | 4,72 | 6,46 | 13,0 | 25 | 4,98 | 4.562 | 1182,60 | 3,15 | 195,39 | No |
| 23 | 2,7 | 4,83 | 5,1 | 11,6 | 22 | 5,27 | 3.092 | 1123,36 | 30,03 | 182,02 | No |
| 24 | 2,9 | 4,68 | 5,35 | 9,1 | 24 | 5,45 | 1.061 | 1211,83 | 8,13 | 33,78 | No |
| 25 | 2,8 | 4,59 | 5,58 | 20,2 | 31 | 4,76 | 750 | 1202,49 | 7,97 | 307,48 | No |
| 26 | 3,1 | 4,63 | 5,7 | 23,4 | 23 | 4,73 | 1.061 | 1175,79 | 4,26 | 62,82 | No |
| 27 | 3,9 | 4,17 | 6,3 | 12,8 | 34 | 5,06 | 1.677 | 1181,21 | 14,58 | 66,62 | No |
| 28 | 2,6 | 4,55 | 5,49 | 13,9 | 20 | 4,96 | 4.743 | 1212,61 | 3,98 | 171,95 | No |
| 29 | 2,8 | 4,84 | 4,34 | 29,0 | 34 | 4,57 | 4.039 | 1168,33 | 15,37 | 79,01 | No |
| 30 | 2,4 | 4,98 | 4,77 | 32,2 | 14 | 4,46 | 3.354 | 1142,87 | 2,00 | 31,46 | No |
| 31 | 3,3 | 4,81 | 4,3 | 10,3 | 55 | 4,54 | 2.704 | 1240,91 | 1,03 | 279,75 | No |
| 32 | 4,1 | 4,54 | 5,82 | 18,8 | 29 | 4,68 | 2.121 | 1235,05 | 16,91 | 22,83 | No |
| 33 | 4,2 | 5,04 | 6,1 | 17,8 | 18 | 5,62 | 1.500 | 1216,83 | 16,68 | 192,11 | No |
| 34 | 3,3 | 4,6 | 6,57 | 16,4 | 27 | 5,52 | 1.677 | 1324,74 | 14,42 | 155,59 | Si |
| 35 | 3,1 | 4,62 | 5,88 | 25,0 | 31 | 4,89 | 2.121 | 1288,65 | 14,04 | 136,78 | No |
| 36 | 3,5 | 4,2 | 5,52 | 17,4 | 47 | 4,82 | 2.704 | 1321,62 | 17,89 | 40,25 | No |
| 37 | 2,3 | 4,42 | 4,6 | 9,9 | 31 | 4,54 | 4.373 | 1233,82 | 5,54 | 189,26 | No |
| 38 | 4 | 4,98 | 5,82 | 37,9 | 30 | 4,91 | 3.750 | 1218,49 | 10,41 | 19,99 | No |
| 39 | 1,5 | 5,28 | 6,03 | 12,9 | 42 | 5,61 | 3.182 | 1180,29 | 16,54 | 16,70 | No |
| 40 | 2,1 | 5,37 | 4,53 | 15,7 | 49 | 4,57 | 2.704 | 1257,55 | 11,10 | 48,53 | No |
| 41 | 6,1 | 4,28 | 5,3 | 10,4 | 41 | 5,18 | 2.250 | 1299,20 | 24,59 | 80,40 | No |

| Punto de muestreo n° | Peso hojas (gr) | pH hojas | pH suelo | Diámetro medio | IPA | pH corteza | Distancia punto-central (m) | Altitud | Pendiente (grados) | Orientación | Enfermo |
|----------------------|-----------------|----------|----------|----------------|-----|------------|-----------------------------|---------|--------------------|-------------|---------|
| 42 | 1,6 | 4,64 | 4,53 | 22,7 | 50 | 5,23 | 2.704 | 1331,49 | 11,09 | 125,44 | No |
| 43 | 2,5 | 4,56 | 4,53 | 8,0 | 25 | 5,41 | 3.182 | 1434,28 | 6,92 | 294,12 | No |
| 44 | 2,8 | 5,08 | 5,4 | 26,6 | 61 | 4,88 | 3.750 | 1272,32 | 25,54 | 32,47 | No |
| 45 | 2,6 | 4,77 | 3,85 | 12,8 | 34 | 4,57 | 4.802 | 1232,14 | 12,28 | 203,30 | Si |
| 46 | 1,7 | 4,4 | 4,85 | 22,9 | 30 | 4,89 | 4.243 | 1235,83 | 10,44 | 253,94 | No |
| 47 | 1,8 | 5,34 | 4,6 | 13,3 | 21 | 4,75 | 3.750 | 1274,07 | 6,41 | 157,33 | No |
| 48 | 4,2 | 4,53 | 5,16 | 28,6 | 43 | 5,04 | 3.354 | 1290,96 | 9,65 | 154,31 | Si |
| 49 | 1,8 | 4,58 | 4,3 | 19,7 | 42 | 4,83 | 3.092 | 1391,15 | 6,65 | 171,91 | No |
| 50 | 3,2 | 4,32 | 4,48 | 23,2 | 36 | 5,15 | 3.000 | 1413,35 | 7,93 | 118,84 | No |
| 51 | 2,3 | 4,46 | 4,6 | 15,7 | 38 | 4,92 | 3.092 | 1378,17 | 20,38 | 355,38 | No |
| 52 | 2,1 | 4,85 | 4,74 | 15,6 | 46 | 4,71 | 3.354 | 1528,58 | 11,09 | 76,93 | No |
| 53 | 4,3 | 4,49 | 4,46 | 9,8 | 35 | 5,83 | 3.750 | 1555,60 | 9,57 | 198,41 | No |
| 54 | 6,3 | 3,87 | 4,81 | 20,9 | 38 | 4,59 | 4.243 | 1443,68 | 27,37 | 75,75 | No |
| 55 | 2,9 | 4,63 | 4,08 | 31,4 | 35 | 4,54 | 4.802 | 1368,65 | 25,60 | 164,28 | No |
| 56 | 2,9 | 4,41 | 6,3 | 13,1 | 28 | 4,99 | 4.802 | 1212,78 | 22,92 | 295,39 | No |
| 57 | 2,7 | 4,64 | 5,4 | 18,8 | 35 | 4,81 | 4.373 | 1153,59 | 18,99 | 100,01 | No |
| 58 | 3 | 4,52 | 5,23 | 15,1 | 35 | 5,29 | 4.039 | 1215,56 | 13,27 | 248,69 | No |
| 59 | 4,8 | 4,47 | 4,98 | 26,4 | 31 | 5,87 | 3.750 | 1374,08 | 26,10 | 224,08 | No |
| 60 | 4 | 4,4 | 4,34 | 11,8 | 38 | 4,5 | 3.824 | 1512,36 | 16,55 | 278,40 | No |
| 61 | 2,3 | 4,55 | 5,13 | 17,8 | 38 | 4,93 | 4.039 | 1404,77 | 16,15 | 293,59 | No |
| 62 | 2,8 | 4,56 | 4,93 | 25,0 | 37 | 5,09 | 4.373 | 1404,83 | 21,93 | 240,64 | No |
| 63 | 3,1 | 4,84 | 4,64 | 6,2 | 43 | 4,72 | 4.802 | 1591,14 | 18,17 | 220,54 | No |
| 64 | 3,9 | 4,19 | 5,3 | 14,8 | 26 | 4,81 | 4.562 | 1317,05 | 26,77 | 119,20 | No |
| 65 | 3 | 4,68 | 4,6 | 12,0 | 44 | 5,23 | 4.500 | 1461,12 | 14,02 | 279,17 | No |
| 66 | 1,8 | 4,33 | 5,48 | 7,1 | 35 | 5,25 | 4.562 | 1351,86 | 18,29 | 345,34 | Si |
| 67 | 2,2 | 4,69 | 4,43 | 10,1 | 28 | 5,02 | 4.743 | 1308,82 | 8,48 | 323,51 | No |



VISTA 1: Zona de estudio superpuesta a las hojas 105, 106, 131 y 132 del PNOA (Máxima Actualidad), junto con la situación de la central térmica de Velilla del Río Carrión y división municipal

VISTA 2: Municipios de las provincias de Palencia y León que contienen a la Zona de Estudio junto con la situación de la central térmica de Velilla del Río Carrión

Sistema de Referencia Geodésico ETRS89
 Elipsoide GRS80. Semieje mayor (a)=6.378.137 m
 Aplanamiento (f)=1:298.26
 Longitudes referidas al meridiano Greenwich
 Latitudes referidas al Ecuador
 Proyección UTM Huso 30 N
 EPSG 25830



UNIVERSIDAD DE OVIEDO
ESCUELA POLITÉCNICA DE MIERES
MÁSTER EN TELEDETECCIÓN Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Análisis SIG de la influencia de las deposiciones ácidas de la central térmica de Velilla del Río Carrión (Palencia) en la calidad del aire y en los ecosistemas de Quercus pyrenaica

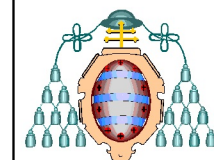
Mapa nº 1: Localización general

Escala 1:100.000 (Vista 1)

Firmado

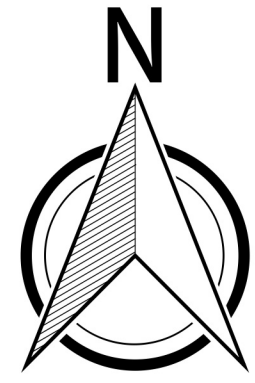
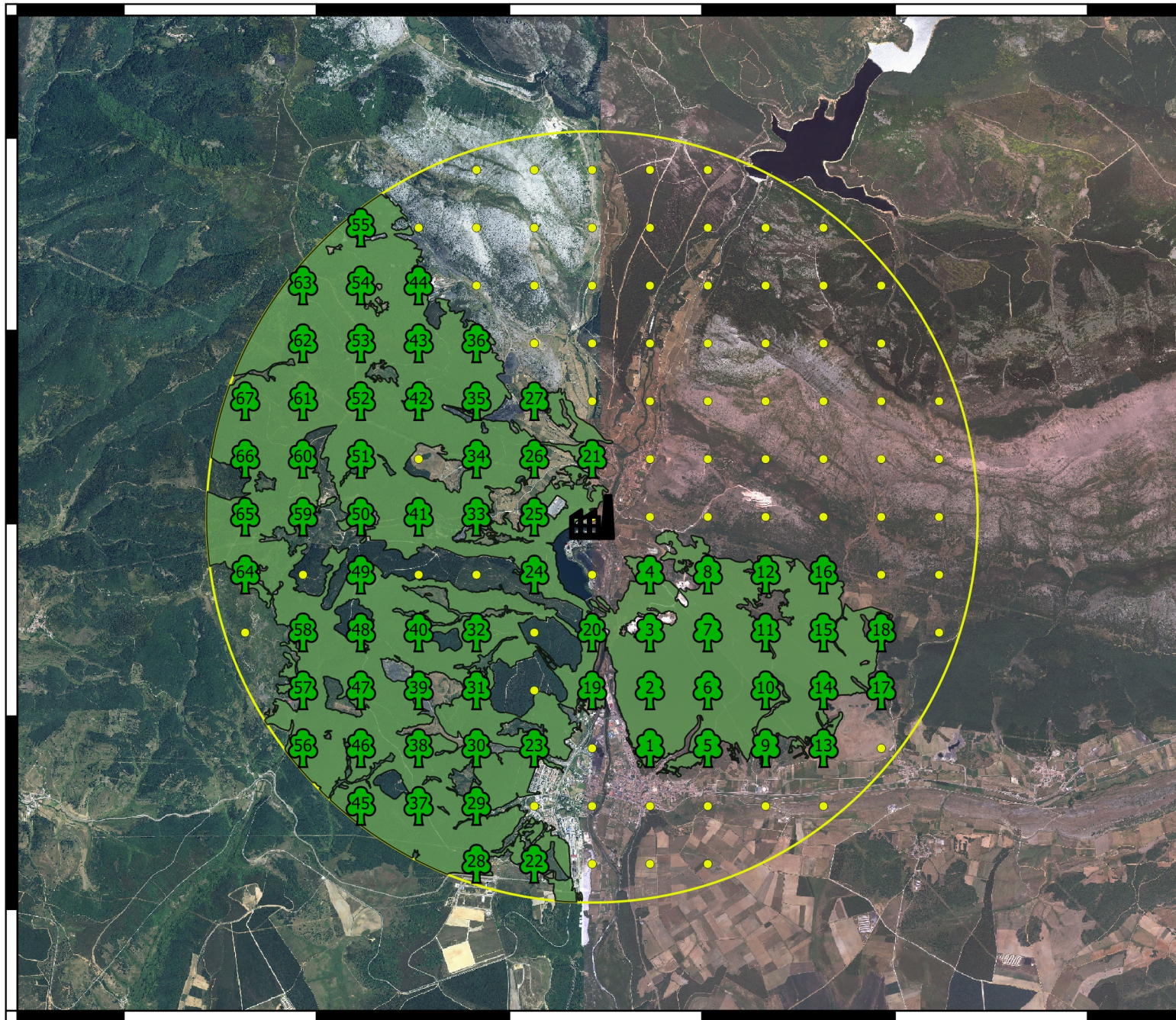
Fecha: Julio 2015

Guzmán Pedrosa Puebla








Software SIG





Leyenda

-  Puntos de Muestreo
-  Central Termica
-  Malla de Puntos
-  Robledal (Quercus Pyrenaica)
-  Zona de Estudio

Zona de estudio superpuesta a las hojas 105, 106, 131 y 132 del PNOA (Máxima Actualidad), junto con la situación de la central térmica de Velilla del Río Carrión y robledal de Q. Pyrenaica adyacente

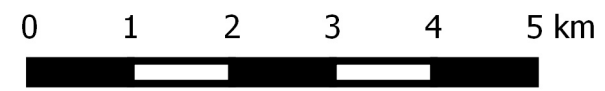
Puntos de muestreo con su número de identificación, resultantes de la intersección entre el robledal y la malla de puntos

342500.000 345000.000 347500.000 350000.000 352500.000 355000.000

UNIVERSIDAD DE OVIEDO
ESCUELA POLITÉCNICA DE MIERES
MÁSTER EN TELEDETECCIÓN Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

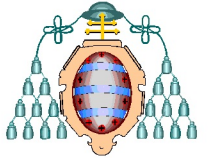

TRABAJO FIN DE MÁSTER

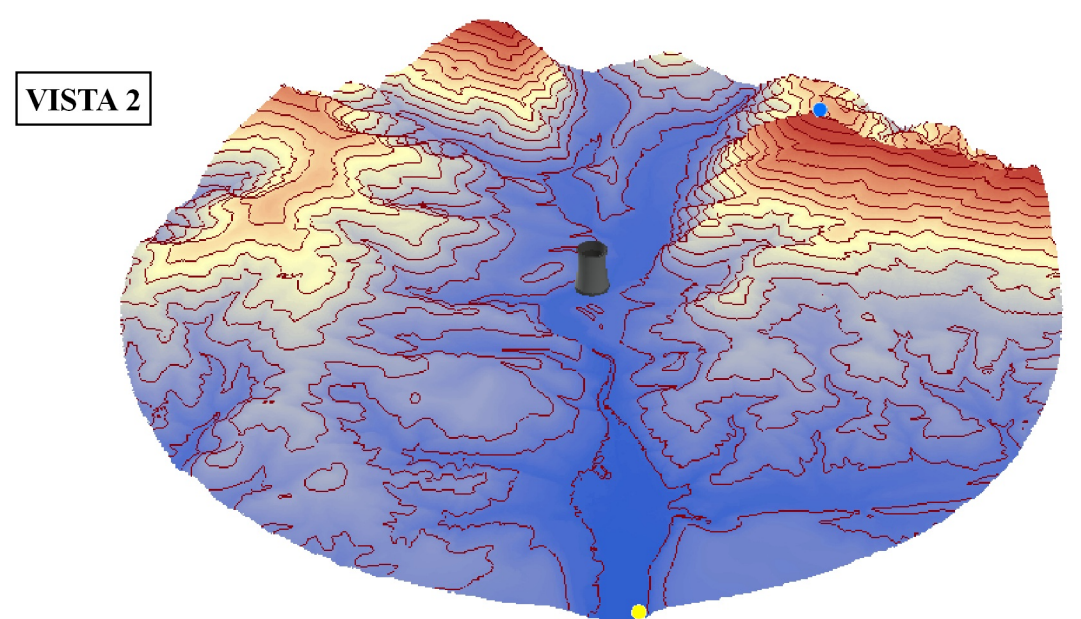
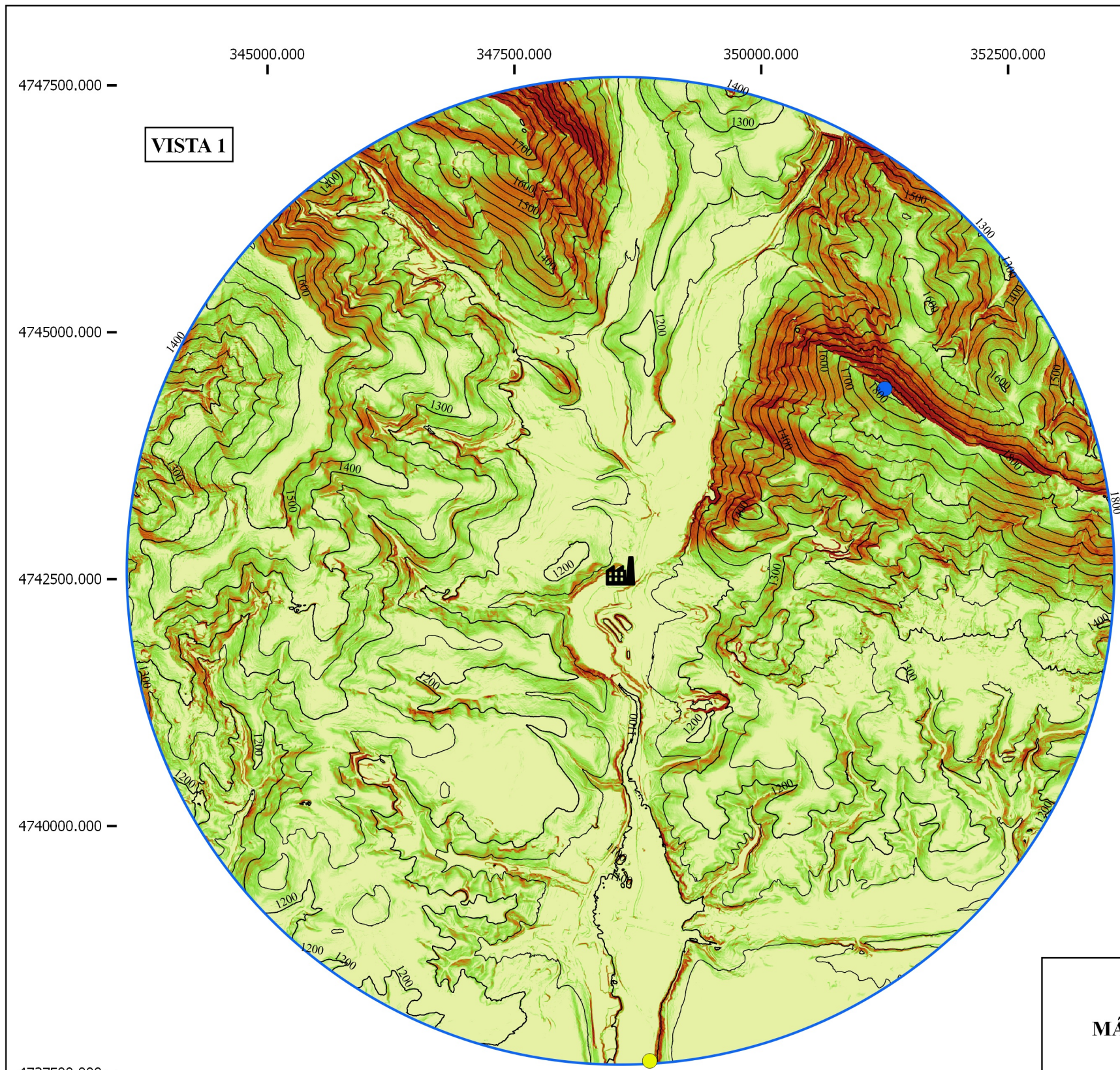
Análisis SIG de la influencia de las deposiciones ácidas de la central térmica de Velilla del Río Carrión (Palencia) en la calidad del aire y en los ecosistemas de Quercus pyrenaica



Sistema de Referencia Geodésico ETRS89
 Elipsoide GRS80. Semieje mayor (a)=6.378.137 m
 Aplanamiento (f)=1:298.26
 Longitudes referidas al meridiano Greenwich
 Latitudes referidas al Ecuador
 Proyección UTM Huso 30 N
 EPSG 25830

Mapa nº 2: Distribución de los puntos de muestreo

| | | | |
|-------------------|-----------------------|---|---|
| Escala 1:75.000 | Firmado |  | Software SIG  |
| Fecha: Julio 2015 | Guzmán Pedrosa Puebla | | |



Leyenda

- Altitud máxima (1869m)
- Altitud mínima (1079m)
- Zona de Estudio
- Curvas de nivel (100m)
- Curvas de nivel (50m)
- Central Térmica

Pendientes

- <10%
- 10% - 20%
- 20% - 30%
- >30%

VISTA 1: Pendientes de la zona de estudio clasificadas por intervalos iguales junto con curvas de nivel de 50 y 100 metros (numeradas), situación de la central térmica de Velilla del Río Carrión y puntos de mayor y menor cota

VISTA 2: Análisis 3D del MDT con un coeficiente 1,5 de amplificación de la elevación (ArcScene) junto con curvas de nivel de 100 metros, situación de la central térmica de Velilla del Río Carrión y puntos de mayor y menor cota



Sistema de Referencia Geodésico ETRS89
 Elipsoide GRS80. Semieje mayor (a)=6.378.137 m
 Aplanamiento (f)=1:298.26
 Longitudes referidas al meridiano Greenwich
 Latitudes referidas al Ecuador
 Proyección UTM Huso 30 N
 EPSG 25830

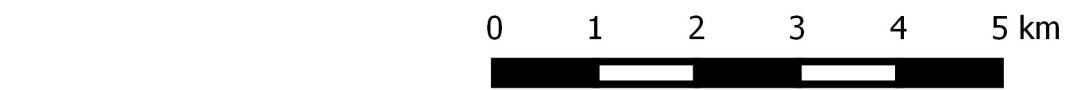
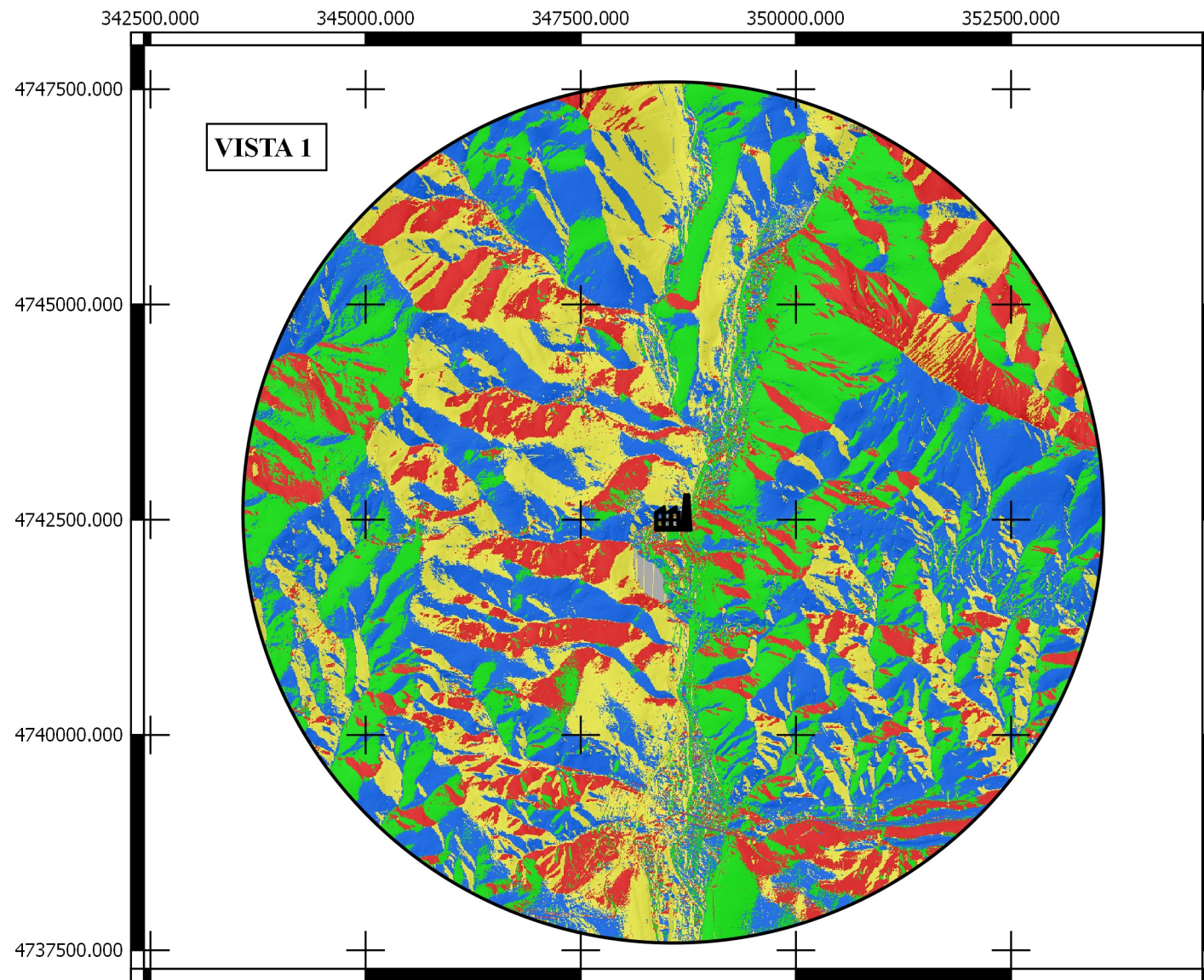
UNIVERSIDAD DE OVIEDO
ESCUELA POLITÉCNICA DE MIERES
MÁSTER EN TELEDETECCIÓN Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

TRABAJO FIN DE MÁSTER

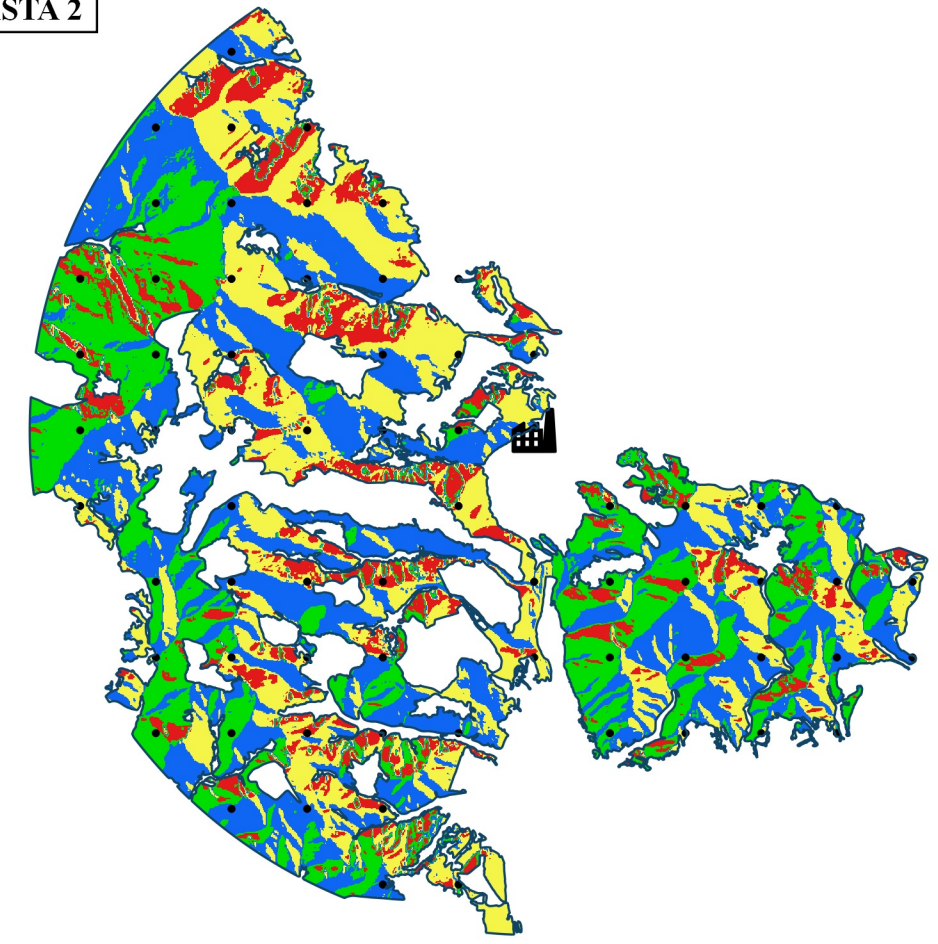
Análisis SIG de la influencia de las deposiciones ácidas de la central térmica de Velilla del Río Carrión (Palencia) en la calidad del aire y en los ecosistemas de Quercus pyrenaica

Mapa nº 3: Pendientes y Altitud

| | | | |
|---------------------------|-----------------------|--|--------------|
| Escala 1:50.000 (Vista 1) | Firmado | | Software SIG |
| Fecha: Julio 2015 | Guzmán Pedrosa Puebla | | |



VISTA 2



Leyenda

- Zona de Estudio
- Robledal
- Central Térmica
- Puntos de Muestreo

Orientaciones

- Norte
- Sur
- Este
- Oeste

VISTA 1: Orientaciones de la zona de estudio sobre mapa de sombras (Hillshade) junto con la posición de la central térmica de Velilla del Río Carrión

VISTA2: Orientaciones del robledal (*Quercus pyrenaica*) aplicando dos filtros Gaussianos sucesivos de radio 4 y desviación estándar 1 junto a la posición de los puntos de muestreo

Sistema de Referencia Geodésico ETRS89
 Elipsoide GRS80. Semieje mayor (a)=6.378.137 m
 Aplanamiento (f)=1:298.26
 Longitudes referidas al meridiano Greenwich
 Latitudes referidas al Ecuador
 Proyección UTM Huso 30 N
 EPSG 25830

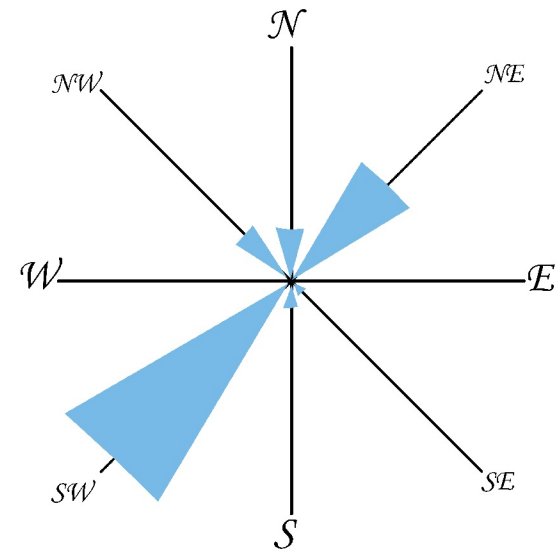
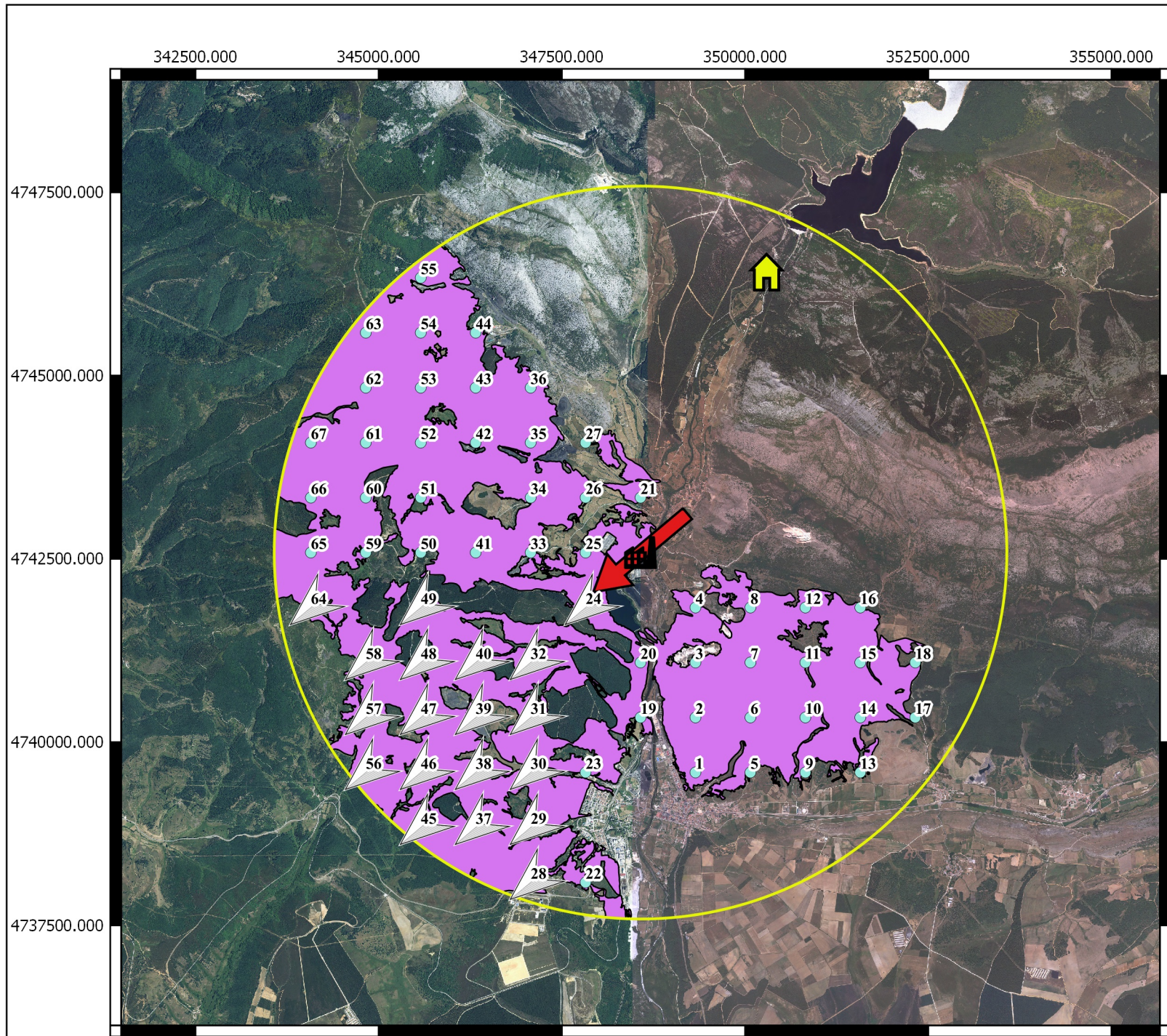
UNIVERSIDAD DE OVIEDO
ESCUELA POLITÉCNICA DE MIERES
MÁSTER EN TELEDETECCIÓN Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Análisis SIG de la influencia de las deposiciones ácidas de la central térmica de Velilla del Río Carrión (Palencia) en la calidad del aire y en los ecosistemas de *Quercus pyrenaica*

Mapa nº 4: Orientaciones / Exposiciones

| | | | |
|-------------------|-----------------------|--|--------------|
| Escala 1:75.000 | Firmado | | Software SIG |
| Fecha: Julio 2015 | Guzmán Pedrosa Puebla | | |

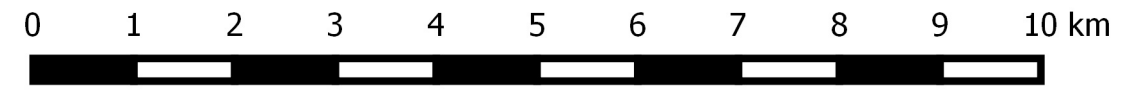


VISTA PRINCIPAL: El viento dominante sopla a 230°. Se consideran como influenciados por el viento los puntos de muestreo situados 35° a cada lado de esta dirección (195°-265°)

IMAGEN: Rosa de los vientos para la estación meteorológica de Velilla del Río Carrión, en la cual, una mayor amplitud de color denota una superior influencia de los vientos hacia la dirección cardinal en la que se encuentra. Calculada con datos de viento dominante en los días de precipitación durante el periodo 1982 - 2011 (AEMET)

Leyenda

- Central Térmica
- Zona de Estudio
- Dirección del Viento Dominante
- Puntos Influenciados por el Viento
- Estación Meteorológica
- Puntos de Muestreo
- Robledal



Sistema de Referencia Geodésico ETRS89
 Elipsoide GRS80. Semieje mayor (a)=6.378.137 m
 Aplanamiento (f)=1:298.26
 Longitudes referidas al meridiano Greenwich
 Latitudes referidas al Ecuador
 Proyección UTM Huso 30 N
 EPSG 25830

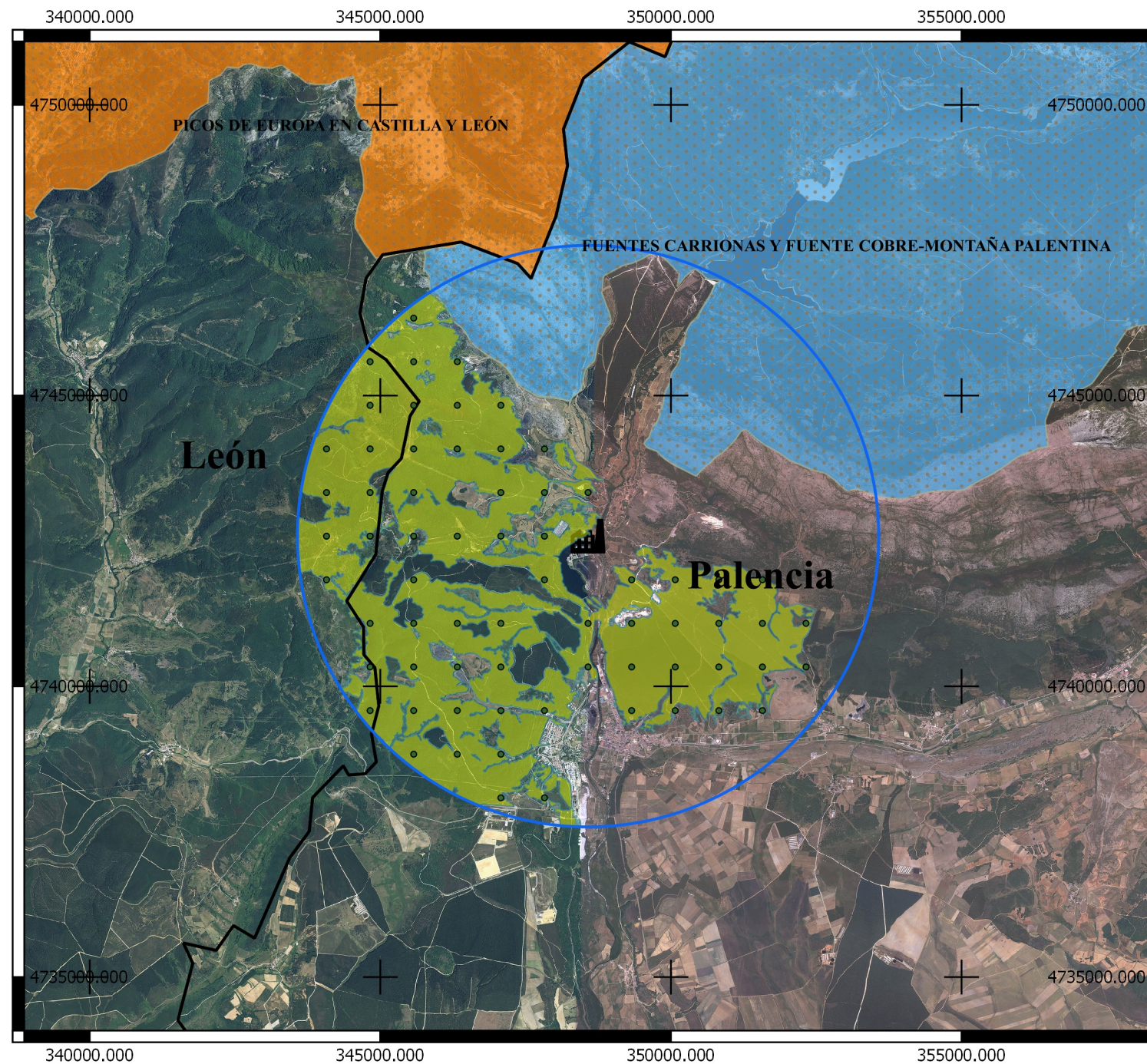
UNIVERSIDAD DE OVIEDO
ESCUELA POLITÉCNICA DE MIERES
MÁSTER EN TELEDETECCIÓN Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Análisis SIG de la influencia de las deposiciones ácidas de la central térmica de Velilla del Río Carrión (Palencia) en la calidad del aire y en los ecosistemas de Quercus pyrenaica

Mapa nº 5: Puntos de muestreo bajo la influencia de los vientos dominantes

| | | | |
|-------------------|-----------------------|--|--------------|
| Escala 1:75.000 | Firmado | | Software SIG |
| Fecha: Julio 2015 | Guzmán Pedrosa Puebla | | |



Leyenda

- Zona de Estudio
- Robledal
- Puntos de Muestreo
- Central Térmica
- León
- Palencia

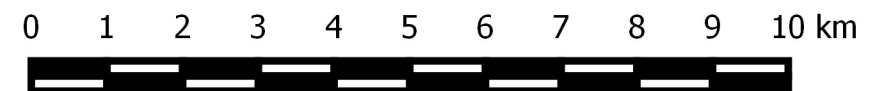
Figuras de Protección

- FUENTES CARRIONAS Y FUENTE COBRE - MONTAÑA PALENTINA
- PICOS DE EUROPA EN CASTILLA Y LEÓN

Vista con las figuras de protección presentes en la zona de estudio, las cuales forman parte al mismo tiempo de LIC (Lugar de Interés Comunitario) y ZEPa (Zona de Especial Protección para las Aves), ambas enmarcadas en la Red Natura 2000 con los códigos:

- Fuentes Carrionas y Fuente Cobre - Montaña Palentina UE: ES4140011
- Picos de Europa en Castilla y León UE: ES4130003

Además, están declaradas como Espacios Naturales Protegidos: Parque Natural Fuentes Carrionas y Fuente Cobre - Montaña Palentina y Parque Regional Picos de Europa en Castilla y León



Sistema de Referencia Geodésico ETRS89
 Elipsoide GRS80. Semieje mayor (a)=6.378.137 m
 Aplanamiento (f)=1:298.26
 Longitudes referidas al meridiano Greenwich
 Latitudes referidas al Ecuador
 Proyección UTM Huso 30 N
 EPSG 25830

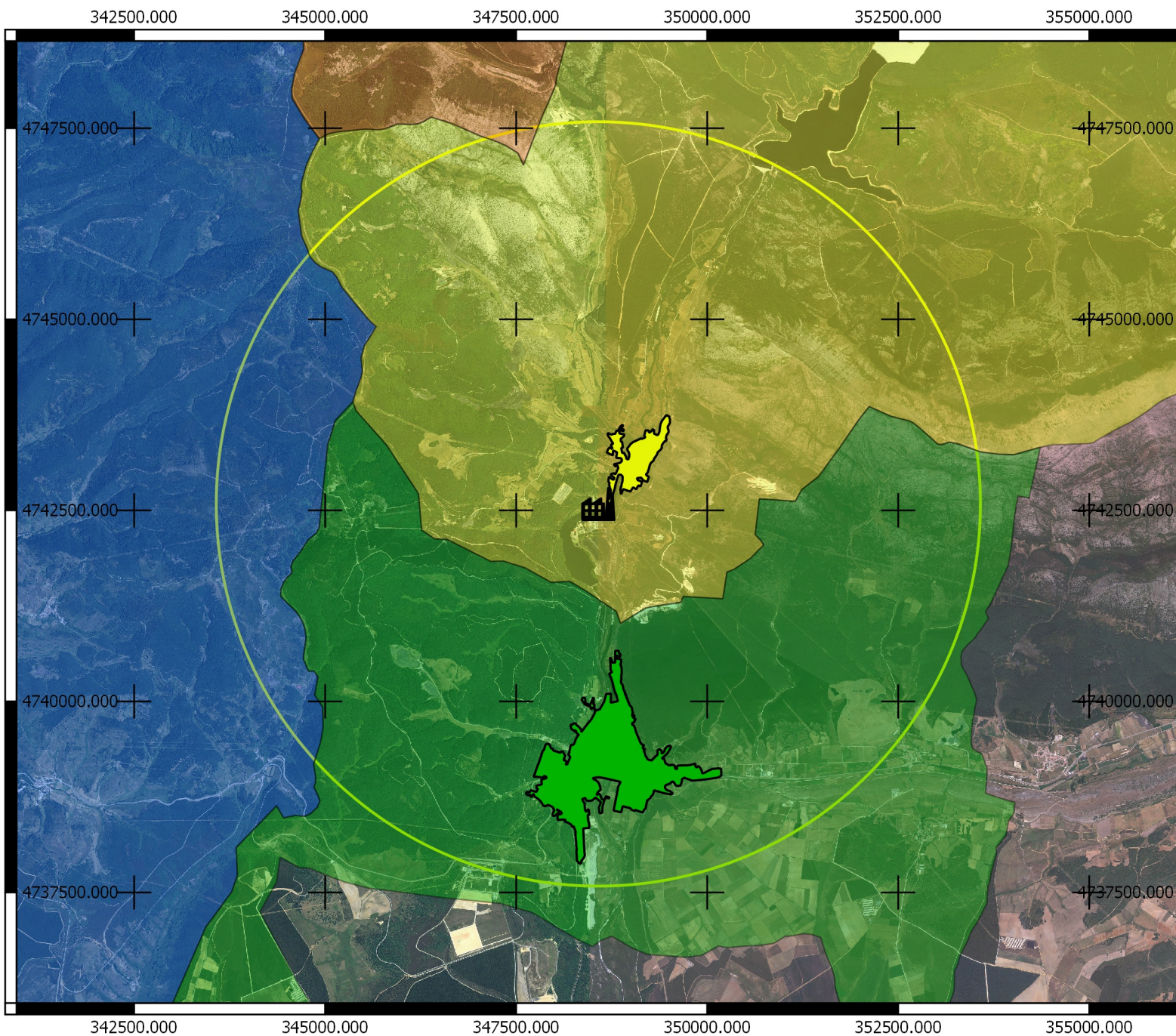
UNIVERSIDAD DE OVIEDO
ESCUELA POLITÉCNICA DE MIERES
MÁSTER EN TELEDETECCIÓN Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Análisis SIG de la influencia de las deposiciones ácidas de la central térmica de Velilla del Río Carrión (Palencia) en la calidad del aire y en los ecosistemas de Quercus pyrenaica

Mapa nº 6: Figuras de protección

| | | | |
|-------------------|-----------------------|--|--------------|
| Escala 1:100.000 | Firmado | | Software SIG |
| Fecha: Julio 2015 | Guzmán Pedrosa Puebla | | |



Leyenda

- Guardo (Núcleo de población)
- Velilla del Río Carrión (Núcleo de población)
- Central Térmica
- Guardo (Límites municipales)
- Velilla del Río Carrión (Límites municipales)
- Boca de Huérgano (Límites municipales)
- Valderrueda (Límites municipales)
- Zona de Estudio



Sistema de Referencia Geodésico ETRS89
 Elipsoide GRS80. Semieje mayor (a)=6.378.137 m
 Aplanamiento (f)=1:298.26
 Longitudes referidas al meridiano Greenwich
 Latitudes referidas al Ecuador
 Proyección UTM Huso 30 N
 EPSG 25830

UNIVERSIDAD DE OVIEDO
ESCUELA POLITÉCNICA DE MIERES
MÁSTER EN TELEDETECCIÓN Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Análisis SIG de la influencia de las deposiciones ácidas de la central térmica de Velilla del Río Carrión (Palencia) en la calidad del aire y en los ecosistemas de Quercus pyrenaica

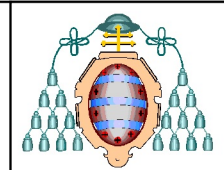
Mapa nº 7: Núcleos de población

Escala 1:75.000

Firmado

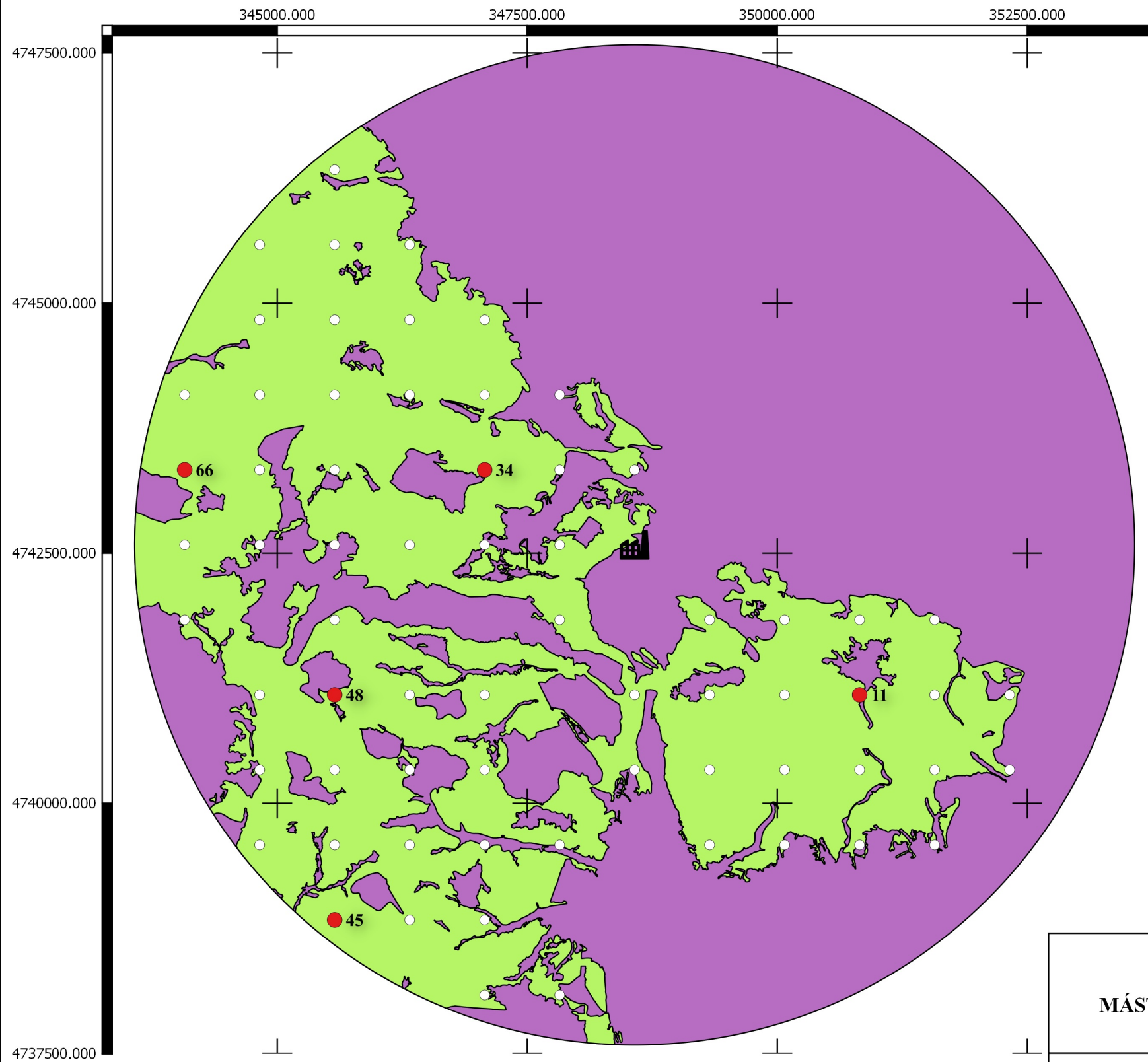
Fecha: Julio 2015

Guzmán Pedrosa Puebla



Software SIG





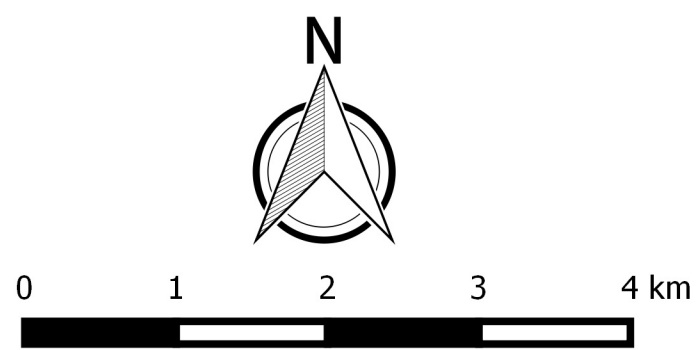
Leyenda

| | |
|-----------------|---|
| Zona de Estudio | Puntos de Muestreo (Q. pyrenaica) |
| Robledal | Sin daños ni enfermedades aparentes |
| Central Térmica | Afectados por el hongo oídio (nº identificador) |

Vista principal con los puntos de muestreo que presentaron evidencias de daños, en particular, ataque del hongo patógeno oídio

Figura con presencia del hongo en las hojas de Q. pyrenaica en el punto de muestreo número 34

Sistema de Referencia Geodésico ETRS89
 Elipsoide GRS80. Semieje mayor (a)=6.378.137 m
 Aplanamiento (f)=1:298.26
 Longitudes referidas al meridiano Greenwich
 Latitudes referidas al Ecuador
 Proyección UTM Huso 30 N
 EPSG 25830



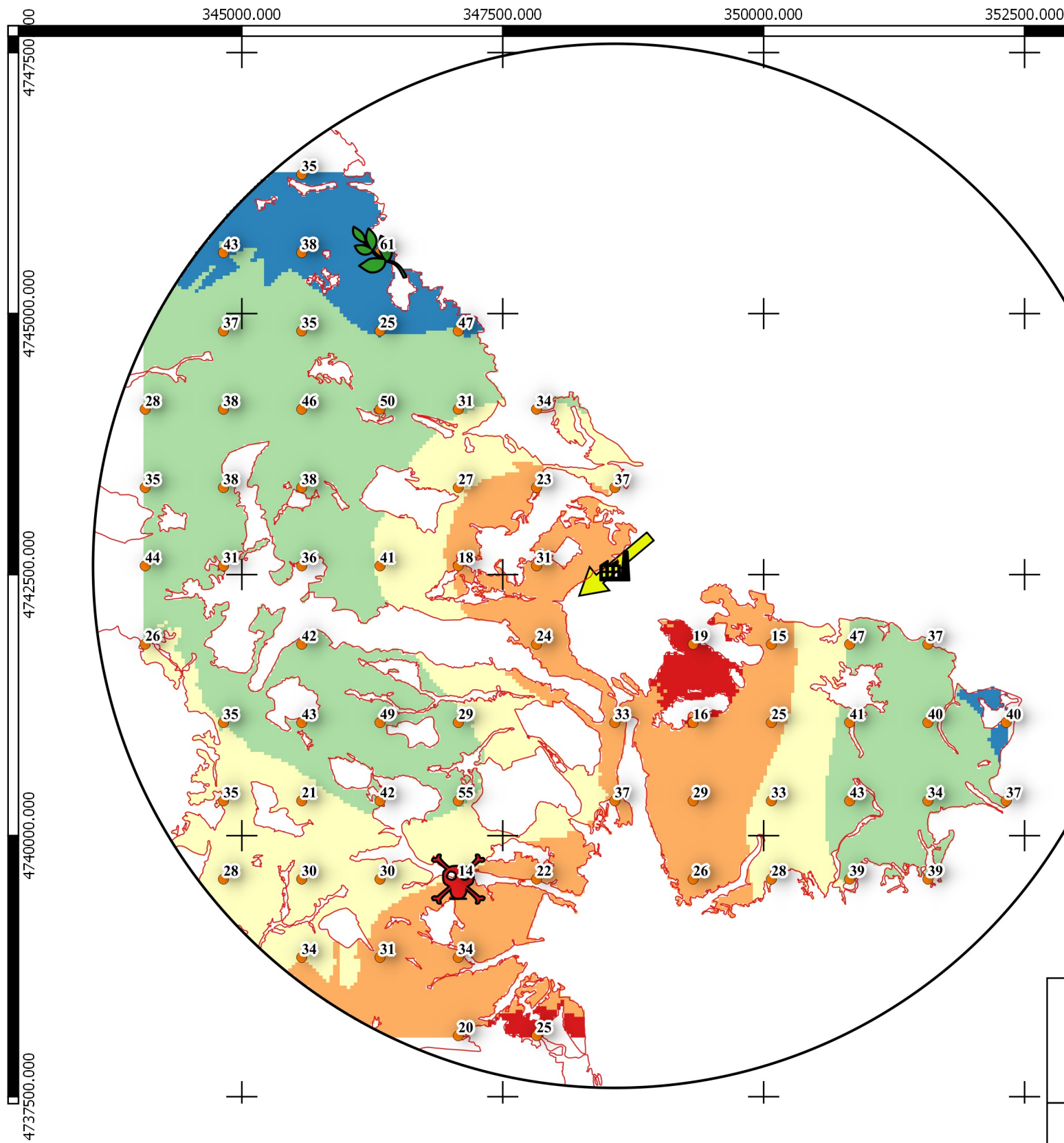
UNIVERSIDAD DE OVIEDO
ESCUELA POLITÉCNICA DE MIERES
MÁSTER EN TELEDETECCIÓN Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Análisis SIG de la influencia de las deposiciones ácidas de la central térmica de Velilla del Río Carrión (Palencia) en la calidad del aire y en los ecosistemas de Quercus pyrenaica

Mapa nº 8: Enfermedades y daños

| | | | |
|-------------------|-----------------------|--|--------------|
| Escala 1:50.000 | Firmado | | Software SIG |
| Fecha: Julio 2015 | Guzmán Pedrosa Puebla | | |



Leyenda

- Central Térmica
- Peor Calidad Ambiental
- Mejor Calidad Ambiental
- Puntos de Muestreo
- Zona de Estudio
- Robledal

Índice de Pureza Atmosférica

- <25
- 25-30
- 30-35
- 35-40
- >40

Dirección del Viento Dominante

Representación del modelo de distribución del Índice de Pureza Atmosférica para el robledal analizado mediante kriging ordinario

Puntos de muestreo etiquetados con los resultados obtenidos de IPA, distinguiendo los valores extremos (mejor y peor calidad del aire)



Sistema de Referencia Geodésico ETRS89
 Elipsoide GRS80. Semieje mayor (a)=6.378.137 m
 Aplanamiento (f)=1:298.26
 Longitudes referidas al meridiano Greenwich
 Latitudes referidas al Ecuador
 Proyección UTM Huso 30 N
 EPSG 25830

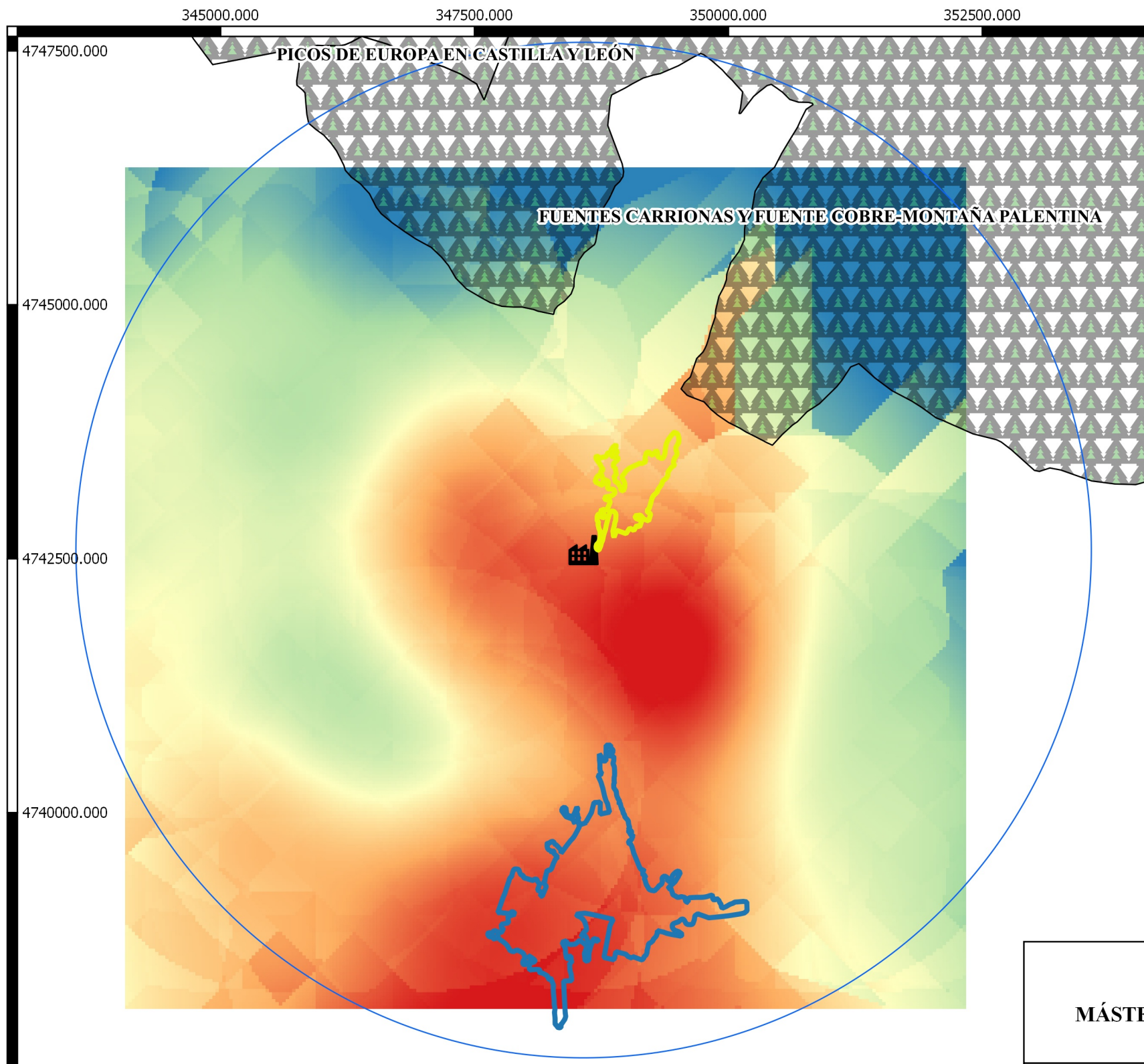
UNIVERSIDAD DE OVIEDO
ESCUELA POLITÉCNICA DE MIERES
MÁSTER EN TELEDETECCIÓN Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Análisis SIG de la influencia de las deposiciones ácidas de la central térmica de Velilla del Río Carrión (Palencia) en la calidad del aire y en los ecosistemas de Quercus pyrenaica

Mapa nº 9: Modelo de distribución del Índice de Pureza Atmosférica en el robledal.
 Zonas de isocontaminación / isopureza del aire

| | | | |
|-------------------|-----------------------|--|--------------|
| Escala 1:50.000 | Firmado | | Software SIG |
| Fecha: Julio 2015 | Guzmán Pedrosa Puebla | | |



↙ Dirección del viento dominante 230°

Leyenda

- Zona de Estudio
- Velilla del Río Carrión (Casco urbano)
- Guardo (Casco urbano)
- Central Térmica
- Figuras de Protección

IPA

- <25
- 25-30
- 30-35
- 35-40
- >40

Modelo de distribución del Índice de Pureza Atmosférica calculado mediante kriging ordinario



Sistema de Referencia Geodésico ETRS89
 Elipsoide GRS80. Semieje mayor (a)=6.378.137 m
 Aplanamiento (f)=1:298.26
 Longitudes referidas al meridiano Greenwich
 Latitudes referidas al Ecuador
 Proyección UTM Huso 30 N
 EPSG 25830

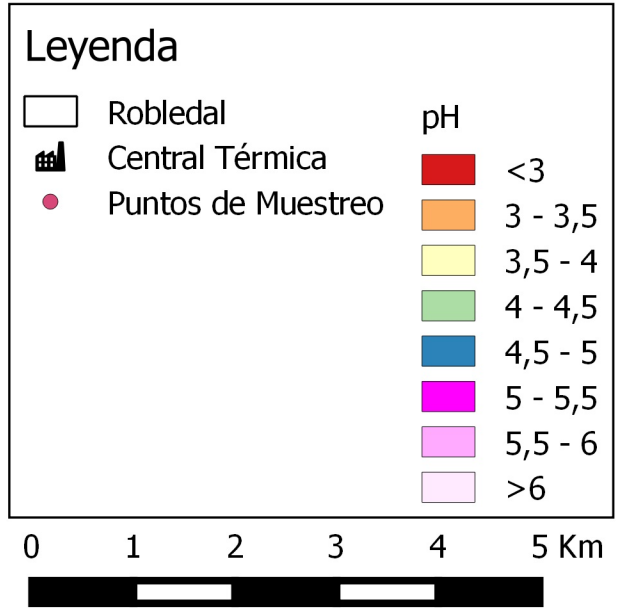
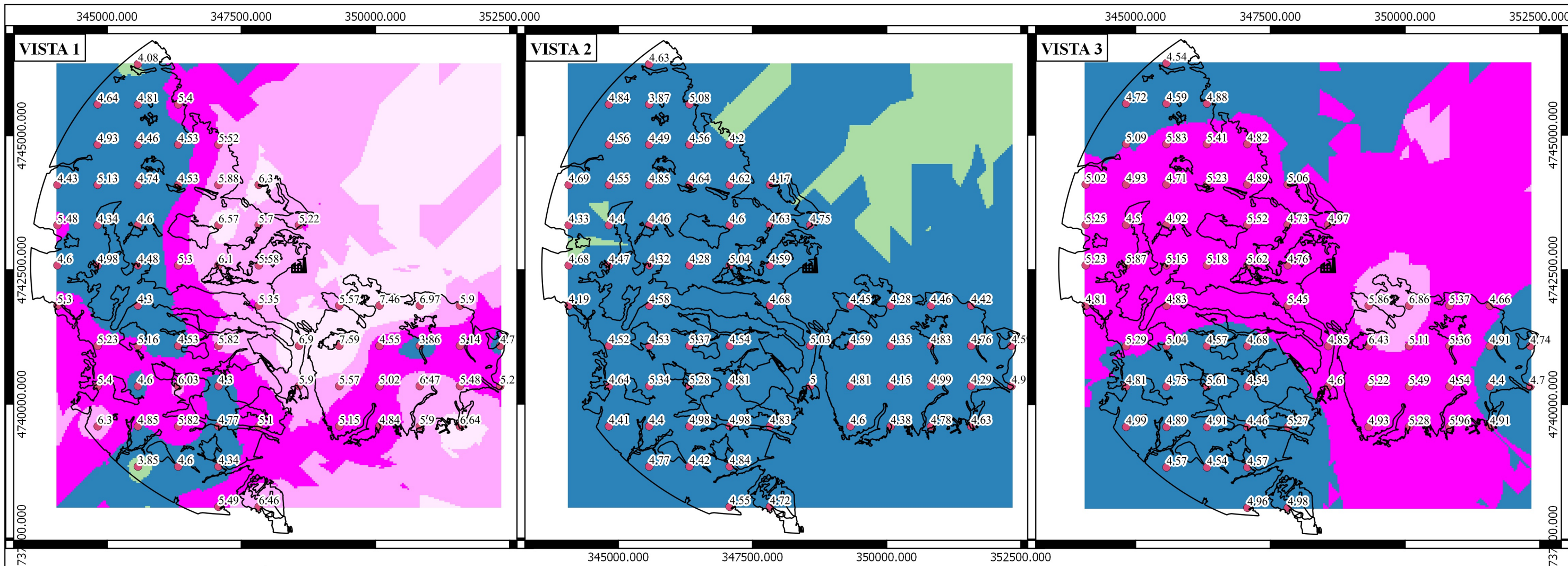
UNIVERSIDAD DE OVIEDO
ESCUELA POLITÉCNICA DE MIERES
MÁSTER EN TELEDETECCIÓN Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Análisis SIG de la influencia de las deposiciones ácidas de la central térmica de Velilla del Río Carrión (Palencia) en la calidad del aire y en los ecosistemas de Quercus pyrenaica

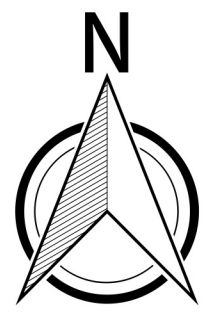
Mapa nº 10: Extrapolación del IPA a la totalidad de la zona de estudio.
 Impacto en las localidades de Guardo y Velilla y figuras de protección

| | | | |
|-------------------|-----------------------|--|--------------|
| Escala 1:50.000 | Firmado | | Software SIG |
| Fecha: Julio 2015 | Guzmán Pedrosa Puebla | | |



Modelos de distribución del pH contruidos mediante kriging ordinario junto con valores de pH obtenidos por punto de muestreo

VISTA 1 - pH del suelo
 VISTA 2 - pH de las hojas de Quercus pyrenaica
 VISTA 3 - pH de la corteza de Quercus pyrenaica



Sistema de Referencia Geodésico ETRS89
 Elipsoide GRS80. Semieje mayor (a)=6.378.137 m
 Aplanamiento (f)=1:298.26
 Longitudes referidas al meridiano Greenwich
 Latitudes referidas al Ecuador
 Proyección UTM Huso 30 N
 EPSG 25830

UNIVERSIDAD DE OVIEDO
ESCUELA POLITÉCNICA DE MIERES
MÁSTER EN TELEDETECCIÓN Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Análisis SIG de la influencia de las deposiciones ácidas de la central térmica de Velilla del Río Carrión (Palencia) en la calidad del aire y en los ecosistemas de Quercus pyrenaica

Mapa nº 11: Modelos de distribución del pH de hojas, corteza y suelo

| | | | |
|-------------------|-----------------------|--|--------------|
| Escala 1:75.000 | Firmado | | Software SIG |
| Fecha: Julio 2015 | Guzmán Pedrosa Puebla | | |