



Universidad de Oviedo

ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DE LOS NIVELES GEOGÉNICOS DE METALES PESADOS EN SUELOS DE ASTURIAS

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Autor: Álvaro Domínguez López

Tutor: Celestino Ordóñez Galán

Fecha: 7/2015

Álvaro Domínguez López
ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DE LOS NIVELES GEOGÉNICOS DE METALES PESADOS EN SUELOS
DE ASTURIAS

*"Para tener éxito, la planificación sola es
insuficiente. Uno debe improvisar
también".*

Isaac Asimov (1920-1992)

Álvaro Domínguez López
ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DE LOS NIVELES GEOGÉNICOS DE METALES PESADOS EN SUELOS
DE ASTURIAS

ÍNDICE

1	Resumen.....	5
2	Abstract.....	5
3	Introducción.....	6
3.1	Área de estudio.....	8
3.2	Geología y suelos.....	10
3.3	Metales pesados estudiados.....	12
4	Legislación.....	20
4.1	R.D. 9/2005.....	21
4.2	Ley 22/2011.....	22
4.3	BOPA NÚM. 91 21-VI-2014.....	22
5	Objetivos.....	23
6	Procedimiento.....	24
6.1	Datos de inicio y obtención de datos.....	24
6.2	Software empleado.....	25
6.3	Establecimiento del proyecto y preparación de los datos.....	26
6.4	Metodología del análisis.....	28
6.4.1	Análisis exploratorio preliminar de los datos.....	28
6.4.2	Análisis espacial exploratorio de los datos (ESDA).....	29
6.4.3	Krigado o Predicción de Kolmogorov Wiener.....	30
6.5	Comprobación de los Niveles Genéricos de Referencia.....	31
7	Resultados.....	31
7.1	Muestras en ladera vs muestras en vegas.....	31
7.2	Metales pesados.....	34
7.2.1	Manganeso.....	34
7.2.2	Zinc.....	35
7.2.3	Cromo.....	36
7.2.4	Plomo.....	37
7.2.5	Bario.....	39
7.2.6	Vanadio.....	40
7.2.7	Cobalto.....	41
7.2.8	Níquel.....	42
7.2.9	Cobre.....	43
7.2.10	Talio.....	44

Álvaro Domínguez López
ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DE LOS NIVELES GEOGÉNICOS DE METALES PESADOS EN SUELOS
DE ASTURIAS

7.2.11	Arsénico	45
7.2.12	Molibdeno	46
7.2.13	Plata.....	47
7.2.14	Cadmio	48
7.2.15	Antimonio	48
7.2.16	Mercurio	49
8	Conclusiones.....	50
9	Bibliografía.....	52

Álvaro Domínguez López
ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DE LOS NIVELES GEOGÉNICOS DE METALES PESADOS EN SUELOS
DE ASTURIAS

1 Resumen

La contaminación de suelos por metales pesados es un grave problema medioambiental asociado a una gran cantidad de factores, por lo que su gestión y análisis resulta muy complejo. La aplicación de sistemas de información geográfica permite un mejor tratamiento y análisis de los datos lo que ayuda a llevar a cabo una correcta evaluación de la problemática. Tomando como punto de partida los datos resultantes de los análisis realizados a 334 muestras recogidas a lo largo del territorio del Principado de Asturias en lugares de muy baja contaminación antropogénica se ha realizado un análisis geoestadístico, con la finalidad de comprender mejor el comportamiento y la distribución de los metales pesados en la comunidad autónoma.

Los resultados obtenidos han sido comparados con los niveles genéricos de referencia establecidos por la normativa vigente para comprobar cómo se ajustan y sacar las conclusiones pertinentes

Palabras Clave: Suelos, Contaminación, Niveles Genéricos de Referencia, Metales Pesados, Krigeado.

2 Abstract

Soil contamination by heavy metals is a serious environmental problem associated with a lot of factors, so their management and analysis is very complex. The application of GIS allows a better processing and data analysis which helps to carry out a proper assessment of the problem.

Taking as its starting point the data resulting from the analysis performed to 334 samples collected throughout the territory of the Principality of Asturias in places very low anthropogenic pollution has made a geostatistical analysis in order to better understand the behavior and distribution of heavy metals in the autonomous community.

The results have been compared with the generic reference levels established by current legislation to see how they fit and draw the relevant conclusions

Keywords: Soils, Contamination, Risk Based Concentrations, Heavy Metals, Kriging.

3 Introducción

Según el real decreto 9/2005, de 14 de enero, un suelo se define como:

“Capa superior de la superficie terrestre, situada entre el lecho rocoso y la superficie, compuesto por partículas minerales, materia orgánica, agua, aire y organismos vivos y que constituye la interfaz entre la tierra, el aire y el agua, lo que le confiere capacidad de desempeñar tanto funciones naturales como de uso. No tendrán la consideración aquellos permanentemente cubiertos por una lámina de agua superficial”.

En ocasiones los suelos pueden presentar concentraciones anómalas (anomalías positivas) en ciertos elementos y compuestos que producen la degradación y contaminación de los mismos. Esta contaminación puede tener dos orígenes muy distintos:

- Geogénico: Cuando la anomalía es generada por la roca madre a partir de la cual se formó el suelo o por otras actividades asociadas como pueden ser la lixiviación o el vulcanismo.
- Antropogénico: Cuando la anomalía es generada por la actividad humana (minería, agricultura, industria,...). Legalmente solo la contaminación antropogénica es considerada como “verdadera” contaminación.

Por tanto la presencia de niveles anormales de un determinado metal pesado no tiene por qué estar directamente relacionado con la acción humana sino que en ocasiones se debe a la geología de la zona.

Los metales pesados presentan en algunos casos una elevada toxicidad¹ como el mercurio (Hg), el plomo (Pb), el cadmio (Cd) y el Arsénico (As). Estos contaminantes pueden abandonar el suelo mediante diferentes procesos como la disolución, la volatilización, la erosión o la lixiviación y presentan una capacidad variable para ser absorbidos por el organismo (denominada biodisponibilidad) y de acumularse (bioacumulación) poniendo en serio peligro la salud de los seres vivos.

La dinámica seguida por los metales pesados en un suelo depende de distintos factores:

¹ Capacidad que tiene una sustancia de producir efectos adversos sobre un ser vivo al entrar en contacto con él.

Álvaro Domínguez López
ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DE LOS NIVELES GEOGÉNICOS DE METALES PESADOS EN SUELOS
DE ASTURIAS

- Características edáficas del suelo: pH, potencial redox, composición iónica del suelo, capacidad de cambio, presencia de materia orgánica, carbonatos, textura,...
- Condiciones ambientales: variación de temperatura y humedad, variaciones en las condiciones redox, acidificación,...
- Naturaleza de la contaminación: origen de los metales y forma de deposición.

Por ejemplo si nos centramos en la textura nos encontramos con que las arcillas poseen una buena capacidad de absorber metales (y otros cationes). Pero no todas las arcillas tienen la misma capacidad. La CIC² (capacidad de intercambio de cationes) es mínima en los minerales del grupo de la caolinita, baja en el de las micas, alta en el de las esmectitas y máxima en el caso de las vermiculitas. Por lo general mayores tamaños de grano implican un menor CIC.

La estructura del suelo es otro factor determinante también ya que los suelos bien estructurados facilitan la conductividad hidráulica propiciando la movilización en mayor medida que un suelo pobremente estructurado y compacto.

Por último cabe destacar la gran importancia del pH y el potencial REDOX. El pH es un factor dominante que será tratado con posterioridad y que define la movilidad del catión. Los pH ácidos inducen la solubilización de la gran mayoría de los metales, con pH moderadamente elevados tiene lugar la precipitación como hidróxidos mientras que en el caso de pH alcalinos se produce la de hidroxicomplejos. El potencial REDOX, por otro lado, es muy importante en el caso de cationes con distintos estados de oxidación (como por ejemplo el Mn) ya que en condiciones reductoras se ganan electrones lo que implica el paso a formas con menor estado de oxidación.

² Cantidad de moles de cationes que pueden ser intercambiados por unidad de masa.

3.1 Área de estudio

El estudio tiene como área objetivo la comunidad autónoma del Principado de Asturias, situada en el noroeste de la Península Ibérica y con una superficie de 10603,57 km². Limita al norte con el mar Cantábrico, al sur con la provincia de León, al este con Cantabria y al oeste con la provincia de Lugo.

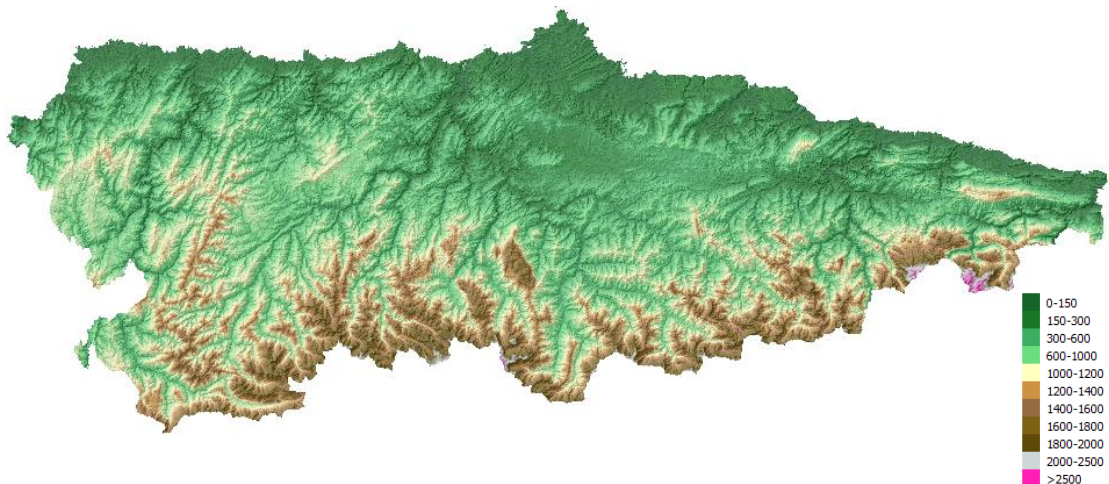


Figura 1 MDE del Principado de Asturias superpuesto a su hillshade.

Presenta, por lo general, un relieve bastante accidentado encontrándose situada al sur la Cordillera Cantábrica que llega a alcanzar alturas de en torno a los 2600 m lo que contrasta con la rasa litoral, de extensas planicies.

La parte occidental se caracteriza por presentar valles y sierras con orientación norte-sur mientras que en la zona oriental tienen una orientación preferente este-oeste. En la zona central del territorio se sitúa la cuenca central también denominada como cuenca minera, una estructura de elevada complejidad en la cual abunda el material lutítico.

Geológicamente hablando existen dos conjuntos de rocas que se diferencian por su edad y modo de afloramiento³. El más antiguo está formado por rocas paleozoicas pre-pérmicas y en menor medida por rocas precámbricas. El segundo grupo está compuesto por rocas más modernas: pérmicas, mesozoicas y terciarias y su extensión está limitada únicamente al norte de la zona central del principado.

³ Carlos Aramburu, Fernando Bastida et al. "Geología de Asturias" Ediciones Trea S.L. 1ª edición pág. 27

Álvaro Domínguez López
ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DE LOS NIVELES GEOGÉNICOS DE METALES PESADOS EN SUELOS
DE ASTURIAS

Por otro lado, las rocas paleozoicas se dividen en dos sectores: Zona Asturoccidental-Leonesa (ZAOL) y Zona Cantábrica (ZC). La ZAOL se caracteriza porque las rocas del Paleozoico inferior, de naturaleza esencialmente siliciclástica, presentan un gran espesor y además presentan una fuerte deformación interna que lleva asociada un desarrollo generalizado de foliaciones tectónicas. En la ZC se encuentra una serie bastante completa del paleozoico consistente en una sucesión de formaciones siliciclásticas y carbonatadas, predominando estas últimas.

El clima es lluvioso con predominancia de los vientos del oeste y con unas temperaturas medias bastante suaves. Además presenta la particularidad de que debido a las elevadas alturas de la cordillera cantábrica se produce el denominado “efecto barrera” que hace que el sur de la región tenga un clima aún más lluvioso.

Desde el punto de vista industrial, de gran interés para el estudio, el Principado de Asturias tradicionalmente fue una importante región minera. Desde el auge de la minería en la región, durante el siglo XIX, se produjo una importante proliferación industrial de diversa índole destacando la metalúrgica y la energética concentrada principalmente en las denominadas como cuencas mineras y en el eje Oviedo-Gijón-Avilés. Actualmente y a pesar de la caída de la minería en la región aún están presentes importantes compañías como Hunosa, Alcoa, ArcelorMittal, Asturiana de Zinc, Duro Felguera, Hidroeléctrica del Cantábrico, Hulleras del Norte o Bayer.

3.2 Geología y suelos

Desde el punto de vista geológico el suelo es considerado como “una interfase, causada por la interacción prolongada entre la litosfera y la biosfera bajo la acción de un clima” (Margalef, 1974), es decir, los suelos son originados por la degradación de las rocas bajo la actividad de organismos vivos y del clima.

Clásicamente, los suelos son divididos en 4 horizontes:

- Horizonte A: Es el horizonte superior también denominado en ocasiones como zona de lavado vertical. Suele presentar elevadas cantidades de materia orgánica lo que le confiere una coloración oscura. En este horizonte se producen procesos de lixiviación⁴ que arrastran parte del material a horizontes más profundos.
- Horizonte B: Se encuentra debajo del horizonte A y en ocasiones recibe el nombre de zona de precipitado. Presenta una coloración más clara debido a que posee bajas cantidades de materia orgánica y en él encontramos los materiales lixiviados en el horizonte A.
- Horizonte C: Es la zona de transición entre el suelo y la roca madre. Está compuesto por la roca madre alterada. Las muestras utilizadas en el desarrollo del trabajo han sido recogidas en este horizonte.
- Horizonte D: Roca madre sana.

⁴ Proceso por el cual al pasar un disolvente líquido a través de un sólido disuelve los componentes solubles de este último.

Álvaro Domínguez López
ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DE LOS NIVELES GEOGÉNICOS DE METALES PESADOS EN SUELOS
DE ASTURIAS



Figura 2 Imagen esquemática de los distintos horizontes en que se divide un suelo. Fuente: www.fullciencia.com

El sustrato geológico es el factor más influyente en la formación de los suelos, y aún en mayor medida en zonas restringidas como en el caso del Principado de Asturias (Gutián et al., 1985). Por tanto los suelos siempre mantienen una estrecha relación con la roca madre.

Uno de los aspectos más importantes de un suelo y que está dominado por la litología a partir de la cual se formó es la acidez o alcalinidad del suelo (pH). Por lo general, la capacidad de retención de metales pesados o traza de un suelo aumenta con el pH siendo las excepciones As, Mo, Se, V y Cr que resultan más móviles en condiciones de alcalinidad.

Si se atiende en particular a los suelos del Principado de Asturias nos encontramos con lo siguiente:

- En la zona occidental del principado predominan las areniscas, cuarcitas y pizarras metamórficas lo que da lugar a suelos ácidos.
- En la zona oriental, en cambio, predominan las rocas calcáreas, lo que hace que los suelos sean mucho más básicos.
- Por último en la zona central nos encontramos con una predominancia de las pizarras y las areniscas con algunos niveles calcáreos por lo que los suelos suelen ser ácidos.

Además es de gran importancia la situación de los yacimientos minerales ya que las anomalías geoquímicas positivas generadas en las mismas influyen directamente en la composición de los suelos adyacentes.

En el Principado de Asturias, región históricamente minera, existen gran cantidad de yacimientos minerales metálicos. La mayoría de ellos no se encuentran en explotación actualmente pero dejan “su huella” en los suelos del entorno.

Durante el transcurso del trabajo se irán viendo los distintos yacimientos del territorio y quedará patente su gran importancia en este ámbito

3.3 Metales pesados⁵ estudiados

A continuación se realizará una breve descripción de cada uno de los contaminantes estudiados destacándose sus usos, sus riesgos para la salud humana y el modo en que se presentan en el medio ambiente:

- Manganeseo (Mn): Es el elemento con número atómico 25 y se trata de un metal de transición de color blanco grisáceo parecido al hierro.
Es comúnmente utilizado en la industria del metal para alear junto con hierro para crear el denominado acero Hadfield⁶, además también se emplea en combustibles, cosméticos y abonos. Exposiciones altas y prolongadas ya sea de manera inalada u oral provoca problemas en el sistema nervioso y respiratorio. El manganeseo puede ser liberado durante su uso tanto al agua, al aire o al suelo y no es degradado en el ambiente sino que tiende a adherirse a partículas, depositarse en el suelo y movilizarse a través de él.
El manganeseo se encuentra en la corteza terrestre en un contenido medio de 1000 ppm (Bowen, 1979), apareciendo tanto en rocas sedimentarias, como ígneas y metamórficas sustituyendo al magnesio y al calcio. El contenido normal

⁵ El término metal pesado es un término confuso ya que si nos aferramos estrictamente a la definición incluiría exclusivamente a los metales con una densidad mayor a cinco veces la densidad del agua. Sin embargo, en medio ambiente se emplea este término para designar a cualquier metal o metaloide que implica un riesgo medioambiental.

⁶ También denominado acero austenítico al manganeseo. Fue desarrollado por primera vez en el año 1882 por Sir Robert Hadfield.

en suelos tiene un valor medio de 1000 ppm (con un rango que oscila entre los 20 y los 10000 ppm).

- Cinc (Zn): Es el elemento con número atómico 30 y se trata de un metal brillante blanco-azulado muy abundante en la corteza terrestre.

Es utilizado en minería, industria metalúrgica (aceros, latón, bronce⁷, galvanizados), combustión de petróleo, incineración de basura, pinturas, preservativos para madera, etc. La exposición elevada a este elemento en los casos más severos puede derivar en anemia, problemas de esterilidad, letargo, ataxia⁸ o incluso la muerte.

Cuando el cinc es liberado al medio ambiente se adhiere a suelos y partículas de polvo en el aire y en algunos casos es transportado por aguas subterráneas y ríos.

Aparece en la corteza terrestre en un contenido medio de aproximadamente 70 ppm (Krauskopf, 1979). Aparece principalmente asociado a minerales formadores de rocas ricas en hierro (como la magnetita, la biotita, el granate, los piroxenos y los anfíboles) concentrándose por tanto en rocas ígneas y metamórficas. Los suelos formados a partir de rocas básicas presentan un contenido superior en Zn que las rocas ácidas siendo la media general de entorno a las 40 ppm (Berrow and Reaves, 1984)

- Cromo (Cr): Es el elemento con número atómico 24 y se trata de un metal de transición de elevada dureza y de color gris brillante.

Se emplea principalmente en metalurgia (cromados, acero inoxidable), curtido de cuero, pigmentos y catalizador. El cromo (IV) resulta mucho más tóxico que el cromo (III) y exposiciones prolongadas puede derivar en bronquitis y cáncer de pulmón.

El cromo se encuentra principalmente en suelos y aguas y pasa de una forma a otra al verse modificadas las condiciones del medio en que se encuentre. Es muy abundante en la corteza terrestre apareciendo en una cantidad media de 100 ppm. En suelos aparece en cantidades muy variables, alcanzando en algunos casos el 5,23% (NAS, 1974) en suelos derivados de serpentinitas. También

⁷ A pesar de que el bronce es la aleación de cobre y estaño, en la actualidad se utiliza cobre y estaño+cinc por lo que la diferencia entre bronce y latón es bastante difusa.

⁸ Barceloux G., Donald y Barceloux Donald. "Zinc". *Clinical Toxicology*, 1999, Vol. 37, No. 2, páginas 279-292.

aparece en gran cantidad en rocas ígneas ultramáficas, lutitas y arcillas. Existen grandes discrepancias sobre los niveles genéricos de referencia de este metal pesado.

- Plomo (Pb): Es el elemento con número atómico 82 y se presenta principalmente como sulfuro (Galena), tiene una elevada densidad y un color plateado/azulado mate.

Es utilizado principalmente en aleaciones, combustibles fósiles y en la industria armamentística. Es extremadamente tóxico y antiguamente era empleado en pinturas, cerámica y tuberías pero en la actualidad su utilización en estos productos ha disminuido drásticamente. Al introducirse en el organismo el Plomo puede causar graves problemas: daño cerebral, daño hepático, daños en el sistema nervioso, disminución de la fertilidad, perturbaciones psicológicas. La intoxicación por plomo se denomina Saturnismo⁹.

Al ser liberado el plomo se adhiere fuertemente al suelo permaneciendo en la parte superior del mismo, razón por la cual los niveles de fondo de este metal son muy elevados¹⁰ en muchos territorios.

Es el metal pesado más abundante en la corteza terrestre estando su contenido medio comprendido en un rango de entre 13 y 16 ppm (Swaine, 1978). El mayor contenido en este metal pesado lo encontramos en carbones y lutitas siendo los suelos con alto contenido en materia orgánica aquellos que presentan mayores cantidades de este elemento. En suelos alejados de la actividad humana se han reportado medias de entre 10 a 30 ppm (Alloway, 1990), pero en zonas con mayor actividad las cantidades pueden ser mucho mayores.

- Bario (Ba): Es el elemento con número atómico 56 y se trata de un metal blanco-plateado que adquiere un tono amarillento al ser expuesto al aire.

Presenta muchos usos importantes, es usado en la industria metalúrgica, fabricación de lodos de perforación, pinturas, cerámicas, caucho, vidrio, insecticidas, tratamiento de combustibles, manufacturación de papel, refinado de azúcar y aceites, y como tratamiento para proteger del deterioro a objetos de caliza. Los compuestos de Bario solubles en agua son muy tóxicos y pueden

⁹ Debe este nombre a que antiguamente las sales de plomo recibían el nombre de "sales de Saturno".

¹⁰ Antiguamente la gasolina contenía plomo por lo que este elemento fue liberado al medio ambiente de forma masiva.

causar debilidad, temblores, ansiedad, disnea, parálisis y ceguera. Además el Bario en forma de polvo es extremadamente bioacumulativo y provoca una neumoconiosis¹¹ denominada como baritosis.

En el medio ambiente el Bario se encuentra principalmente en forma de sulfatos y carbonatos combinándose con partículas de suelo y tendiendo a permanecer en el ambiente durante largos periodos de tiempo.

Aparece en la corteza terrestre en una cantidad media que varía entre las 300 y las 500 ppm (Krauskopf, 1979). El contenido de Ba de un suelo en ocasiones está directamente relacionado con la presencia de óxidos de Mn presentándose en otras ocasiones en feldespatos y micas sustituyendo al K.

- Vanadio (V): Es el elemento con número atómico 23 y se trata de un metal de transición de color blanco brillante que generalmente se encuentra en forma de cristales.

Se emplea en la industria metalúrgica (especialmente en aceros), como catalizador, en imanes superconductores y cerámica. La exposición a niveles altos de Vanadio puede causar daño pulmonar y efectos neurológicos.

El vanadio se disuelve bastante mal en el agua por lo que tiende a adherirse a sedimentos y en algunos casos llega a acumularse en plantas.

Es moderadamente abundante en la corteza terrestre apareciendo en una concentración media aproximada de 110 ppm (Krauskopf, 1979). En suelos aparece principalmente en aquellos formados a partir de lutitas, arcillas y algunas rocas ígneas, siendo bastante menor su cantidad en los derivados de areniscas.

- Cobalto (Co): Es el elemento con número atómico 27 y se trata de un metal ferromagnético y de color blanco con algunos tonos azulados.

Es empleado en superaleaciones empleadas en aviación, imanes, pigmentos, herramientas de corte y trituración y articulaciones artificiales. Exposiciones altas y prolongadas pueden producir problemas pulmonares y cardiacos.

Cuando el cobalto entra en el ambiente puede aparecer adherido en suelos o disuelto en agua, no puede ser destruido en el ambiente sino que cambia su forma.

¹¹ Enfermedades pulmonares provocadas por la inhalación de polvo y su deposición en pulmones, bronquios y ganglios.

La cantidad en la corteza terrestre de este metal pesado están en torno a las 20 ppm (Bowen, 1979). Aparece en grandes cantidades en rocas ultrabásicas apareciendo en grandes cantidades en suelos derivados de rocas ígneas básicas y suelos arcillosos siendo las cantidades mucho menores en suelos derivados de areniscas, calizas y rocas ígneas ácidas.

- Níquel (Ni): Es el elemento con número 28 y se trata de un metal de transición de color blanco plateado con brillos dorados muy dúctil y maleable.

Es muy abundante y es empleado en combinación con otros metales como hierro, cromo, cobre, titanio y cinc en aleaciones como por ejemplo el Mu-Metal¹², en la elaboración de monedas, oro blanco e imanes. El efecto adverso más común por Níquel es la reacción alérgica sin embargo en casos extremos puede llegar a causar bronquitis crónica y otros problemas pulmonares.

El níquel en el medio ambiente aparece habitualmente adherido a partículas de hierro o manganeso en los suelos y sedimentos.

El níquel constituye aproximadamente 80 ppm de la corteza terrestre apareciendo principalmente en rocas ígneas, los mayores contenidos están presentes en rocas ígneas ultrabásicas (en torno a 2000 ppm) siendo especialmente bajos en areniscas. En suelos los contenidos se encuentran entre las 5 y las 500 ppm (Swaine, 1955) siendo los suelos más ricos en ese metal pesado aquellos derivados de rocas ultrabásicas, básicas y sedimentos arcillosos.

- Cobre (Cu): Es el elemento con número atómico 29 y se trata de un metal de transición de color rojizo y brillo metálico de elevada ductilidad y maleabilidad.

Es ampliamente utilizado tanto solo como en aleaciones en la fabricación de alambre, láminas de metal, cañerías, como preservativo para maderas, telas y cueros y en el tratamiento de aguas. La exposición prolongada a polvos de cobre o cobre en disolución puede causar efectos indeseables como vómitos, irritación, calambres, diarrea e incluso daño en el riñón o el hígado pudiendo derivar incluso en la muerte.

Al ser liberado al medio ambiente el cobre se adhiere a partículas de materia orgánica, arenas, arcillas y otros componentes pudiendo ser transportado tanto

¹² Aleación de aproximadamente un 77% de níquel, un 16% de hierro, un 5% de cobre y un 25 de cromo o molibdeno con una permeabilidad magnética muy alta.

en disolución en el agua como, más habitualmente, en suspensión. En algunos casos el transporte también se realiza por medio eólico.

El contenido medio en la corteza terrestre está en torno a las 50 ppm (Bowen, 1979) apareciendo en la naturaleza en forma de sulfitos, sulfatos, carbonatos, sulfosales o como metal nativo. En suelos aparece en una cantidad media de 30 ppm (Adriano, 1986) variando las cantidades dependiendo de la zona climática (Aubert and Pinta, 1977) estando presentes las mayores en zonas con climas tropicales húmedos.

- Talio (Tl): Es el elemento con número atómico 81 y se trata de un metal de color blanco azulado muy blando y maleable que se encuentra en pequeñas cantidades en la superficie terrestre.

Se utiliza principalmente en la fabricación de componentes electrónicos (industria de los semiconductores) y en la fabricación de vidrios especiales, antiguamente también era utilizado en veneno para ratas. Estar expuesto a altos niveles de Talio puede provocar daños en los pulmones, corazón, riñones e hígado, y en casos extremos la muerte.

El talio permanece largos periodos de tiempo en agua, suelo y aire sin degradarse, es absorbido por peces, mariscos y plantas entrando así en la cadena alimentaria siendo esta la principal fuente de riesgo.

El contenido medio de este metal pesado en la corteza terrestre está en torno a las 0,80 ppm (Nriagu, 1998) mientras que en suelos la cantidad media es de 0.20 ppm (con un rango de entre 0.10 y 0,80 ppm).

- Arsénico (As): Es el elemento con número atómico 33 y se trata de un metaloide que puede presentarse en tres estados distintos: arsénico α (gris metálico), arsénico γ (amarillo) y arsénico β (negro).

Se utiliza como preservativo de madera e insecticida. Es extremadamente tóxico (especialmente el Arsénico inorgánico) y puede ser fatal. La exposición a niveles bajos lleva asociados vómitos, ritmo cardiaco anormal, hormigueo y caída del cabello.

La gran mayoría de los compuestos de arsénico pueden disolverse en agua estado en el cual experimentan su transporte para posteriormente incorporarse a sedimentos o eventualmente ser absorbidos por organismos.

Aparece en la corteza terrestre en un contenido medio de entre 1,5 y 2 ppm estando los mayores contenidos en rocas sedimentarias. En suelos aparece

principalmente en aquellos derivados de depósitos de sulfuros en concentraciones de varias ppm.

- Molibdeno (Mo): Es el elemento con número atómico 42 y se trata de un metal de transición de color blanco plateado de gran dureza y con un punto de fusión muy elevado (2623° C).

Es empleado principalmente en aleaciones, pero también se utiliza como catalizador para eliminación de azufre, en electrónica y para la fabricación de lubricantes. La exposición crónica puede causar irritación de piel, fatiga, dolores en las articulaciones y dolores de cabeza.

Tiende a concentrarse en la parte superior del suelo aumentando con la concentración de materia orgánica pudiendo ser absorbido por animales (en muchos casos bovinos) y plantas.

La concentración en la corteza terrestre tiene un valor medio que oscila entre la 1,0 y las 2,3 ppm (Krauskopf, 1979). Las mayores concentraciones se dan en fosforitas y lutitas, y en mayor proporción en calizas y areniscas. Los suelos con mayores cantidades de ese metal pesado son aquellos ricos en materia orgánica especialmente aquellos derivados de lutitas (Swaine y Mitchell, 1960).

- Plata (Ag): Es el elemento con número atómico 47 y se trata de un metal muy escaso en la naturaleza, de color plateado y con un brillo blanco brillante que presenta como principales características su elevada maleabilidad y ductilidad. Se emplea en equipos electrónicos, joyas, cubiertos, materiales fotográficos, armas y como catalizador en reacciones de oxidación. La exposición a niveles altos de compuestos de Plata puede provocar problemas respiratorios y pulmonares. En casos extremos puede desencadenar una enfermedad denominada como argiria¹³.

Al ser un elemento tan escaso la plata se encuentra en muy pequeñas cantidades tanto en el agua, como en el aire y en los suelos siendo arrastrado en muchos casos por la lluvia alcanzando aguas subterráneas.

Aparece en la corteza terrestre en una concentración de en torno a las 0,10 ppm (Pucell y Peters, 1998). Los suelos más ricos en este metal pesado son aquellos

¹³ Condición por la cual algunas partes del cuerpo se tiñen de color gris o gris azulado debido a la ingestión o inhalación prolongada de Plata y sus compuestos.

derivados de lutitas y aquellos ricos en materia orgánica, siendo las cantidades mucho menores en aquellos derivados de areniscas y calizas.

- Cadmio (Cd): Es el elemento con número atómico 48 y se trata de un metal blanco, blando, maleable y dúctil, con brillos azulados.

Tiene muchos usos como son las baterías, revestimiento de metales, plásticos y pigmentos. Se trata de uno de los metales más tóxicos que existen. Una exposición elevada puede producir daños pulmonares, renales y en el sistema nervioso, fragilidad en los huesos, desórdenes psicológicos y cáncer.

El cadmio en el ambiente puede ser transportado largas distancias por el viento para posteriormente adherirse al suelo o disolverse en agua experimentando cambios en su forma.

El contenido medio en la corteza terrestre de este metal pesado esta en torno a las 0,15 y las 0,20 ppm. Las rocas con mayor contenido en cadmio son las lutitas carbonosas formadas bajo condiciones reductoras. El contenido en Cd está directamente relacionado geoquímicamente con el contenido en Zn. Los suelos con mayor concentración de este elemento son aquellos derivados de lutitas.

- Antimonio (Sb): Es el elemento con número atómico 51 y se trata de un metaloide blanco plateado cristalino y quebradizo que se evapora a baja temperatura.

Se emplea en aleaciones para la fabricación de baterías, soldaduras, cañerías, rodamientos y también en pinturas, fuegos artificiales, cerámicas y como esmalte en metales, vidrios y plásticos. Es especialmente tóxico en estado gaseoso pudiendo causar la muerte en poco tiempo si la concentración es muy elevada, también puede causar daños en los pulmones y el corazón y caída del pelo.

El antimonio puede mantenerse en suspensión en el aire adherido a otras partículas durante días para posteriormente depositar en suelos y asociarse a otras partículas de hierro, aluminio y manganeso. Se encuentra en bajos niveles también en ríos y lagos.

Aparece en la corteza terrestre en con una concentración media de 0,20 ppm (Mitchell y Burridge, 1979). En suelos aparece con un valor medio de 1 ppm (en un rango que varía entre las 0,20 y las 10 ppm).

- Mercurio (Hg): Es el elemento con número atómico 80 y se trata de un metal pesado de color plateado que se encuentra en estado líquido a temperatura ambiente.

Su uso está muy limitado debida a su elevada toxicidad estando su utilización regulada por la Unión Europea¹⁴. Afecta en gran medida al sistema nervioso produciendo gran cantidad de alteraciones como pueden ser problemas de memoria, timidez, irritabilidad, temblores, delirios, tendencia suicida y depresión. Además también puede dañar a los pulmones y al sistema renal.

El mercurio se presenta habitualmente en forma de mercurio metálico y compuestos de mercurio inorgánico pudiéndose transmitir tanto por el aire en forma de vapores, como por el suelo y el agua experimentando transformaciones al modificarse su medio. Generalmente cuando el mercurio deposita en el suelo se mantiene en la parte superior de esta sin moverse y cuando se encuentra en el agua tiende a acumularse en el fondo. En ocasiones es ingerido por peces acumulándose en su organismo.

El contenido medio en la corteza terrestre de este metal pesado es de 50 ppb. Aparece en todo tipo de rocas siendo su contenido especialmente alto en lutitas ricas en materia orgánica. El contenido normal en suelos no debería superar las 100 ppb.

4 Legislación

Debido a que la problemática es compleja y tiene gran interés desde el punto de vista medioambiental y sanitario, en nuestro país, existe una extensa normativa que regula los distintos aspectos sobre el tema. Los más destacables son:

- R.D. 9/2005, de 14 de enero, donde se establece la relación de actividades potencialmente contaminantes del suelo y los criterios y estándares para la declaración de suelos contaminados.
- Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados.

Y a nivel del Principado de Asturias resulta de gran interés:

¹⁴ European Commission. "Communication from the commission to the European parliament and the council on the review of the Community Strategy Concerning Mercury". Brussels, 7.12.2010, COM(2010) 723 final

- BOPA NÚM. 91 21-VI-2014, resolución del 20 de Marzo de 2014, de la consejería de Fomento, Ordenación del Territorio y Medio Ambiente, por la cual se establecen los Niveles Genéricos de Referencia para metales pesados en Suelos del Principado de Asturias.

4.1 R.D. 9/2005

En el cual se exponen importantes conceptos que serán empleados posteriormente:

“Suelo contaminado: Es aquel cuyas características han sido alteradas negativamente por la presencia de componente químicos de carácter peligroso de origen humano en concentración tal que comporte un riesgo inaceptable para la salud humana o del medio ambiente, y así se haya declarado mediante resolución expresa. “

“Nivel genérico de referencia (NGR): la concentración de una sustancia contaminante en el suelo que no conlleva un riesgo superior al máximo aceptable para la salud humana o los ecosistemas y calculada de acuerdo con los criterios recogidos en el anexo VII.”

“Riesgo: probabilidad de que un contaminante presente en el suelo entre en contacto con algún receptor con consecuencias adversas para la salud de las personas o el medio ambiente.”

“Usos del suelo:

- Uso industrial del suelo: aquel que tiene como propósito principal el de servir para el desarrollo de actividades industriales, excluidas las agrarias y ganaderas.
- Uso urbano del suelo: aquel que tiene como propósito principal el de servir para el desarrollo de las actividades de construcción de viviendas, oficinas, equipamientos y dotaciones de servicios, y para la realización de actividades recreativas y deportivas.
- Otros usos del suelo: aquellos que, no siendo ni urbano ni industrial, son aptos para el desarrollo de actividades agrícolas, forestales y ganaderas.”

Los niveles genéricos de referencia para metales pesados no aparecen expuestos directamente en el R.D., sin embargo, en el anexo VII aparecen los criterios para el cálculo de los NGR de otras sustancias no recogidas en sus anexos V y VI entre los que se incluyen los metales pesados.

4.2 Ley 22/2011

Ley que tiene como objetivo regular la gestión de los residuos creando medidas que prevengan su generación y mitiguen los impactos adversos que puedan tener sobre la salud humana y el medio ambiente mediante una mejora de la eficiencia en el uso de los recursos. Además también tiene como objetivo regular el ámbito jurídico relacionado con la materia.

En el artículo 34.1 se expone lo siguiente:

“Las Comunidades Autónomas declararán y delimitarán los suelos contaminados, debido a la presencia de componentes de carácter peligroso procedentes de las actividades humanas, evaluando los riesgos para la salud humana o el medio ambiente, de acuerdo con los criterios y estándares que, establecidos en función de la naturaleza de los suelos y de sus usos, se determinen por el Gobierno previa consulta a las Comunidades Autónomas.”

Por tanto, los encargados de evaluar si existe contaminación no son las propias comunidades autónomas.

4.3 BOPA NÚM. 91 21-VI-2014

Los niveles genéricos de referencia (NGR) en el Principado de Asturias aparecen recogidos en el BOPA (Boletín Oficial del Principado de Asturias). Más concretamente en el NÚM. 91 21-IV-2014 en cuyo artículo 3 aparece un listado de contaminantes y niveles genéricos de referencia de metales pesados en suelos para protección de la salud humana en el Principado de Asturias.

Álvaro Domínguez López
ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DE LOS NIVELES GEOGÉNICOS DE METALES PESADOS EN SUELOS
DE ASTURIAS

Niveles genéricos de referencia para metales pesados para salud humana en el Principado de Asturias

Elemento	CASRN	Industrial (mg/kg)	Recreativo (mg/kg)	Residencial (mg/kg)	Otros usos (mg/kg)
Antimonio	7440-36-0	295	120	25	5
Arsénico	7440-38-2	200	40 ⁽¹⁾	40 ⁽¹⁾	40 ⁽¹⁾
Bario	7440-39-3	10000	10000	10000	1540
Berilio	7440-41-7	205	140	30	20
Cadmio	7440-43-9	200	20	20	2 ⁽²⁾
Cobalto	7440-48-4	300	105	25 ⁽³⁾	25 ⁽³⁾
Cobre	7440-50-8	4000	400	400	55
Cromo (III)	16065-83-1	10000	10000	10000	10000
Cromo (VI)	18540-29-9	50	25	5	2
Estaño	7440-31-5	10000	10000	10000	4360
Manganeso	7439-96-5	9635	4970 ⁽⁴⁾	2135 ⁽⁴⁾	2135 ⁽⁴⁾
Mercurio	7439-97-6	100	10	10	1
Molibdeno	7439-98-7	600	60	60	6
Níquel	7440-02-0	6500	4150	650	65
Plata	7440-22-4	200	20	20	2
Plomo	7439-92-1	800	400	400	70
Selenio	7782-49-2	2500	1740	250	25
Talio	7440-28-0	10	3	1	1
Vanadio	7440-62-2	1505	845	190	50 ⁽⁵⁾
Zinc	7440-66-6	10000	4550	4550	455

CASRN (Chemical Abstracts Service Registry Number) identificación numérica de la Sociedad Americana de Química.

⁽¹⁾ 100 mg/kg para suelos sobre las litologías de Calizas y Granitos.

⁽²⁾ 10 mg/kg para suelos sobre la litología de Calizas.

⁽³⁾ 35 mg/kg para suelos sobre la litología de Calizas.

⁽⁴⁾ 6435 mg/kg para suelos sobre la litología de Calizas.

⁽⁵⁾ 100 mg/kg para suelos sobre la litología de Calizas y Unidades de litología mixta.

Es importante destacar que el NGR se calcula según el uso del suelo y que además en algunos casos varía según la litología sobre la que se encuentra, factores que deben ser tenidos en cuenta a la hora de abordar el estudio.

5 Objetivos

- ✓ Realizar un análisis geoestadístico de la contaminación de suelos por metales pesados en el Principado de Asturias mediante el empleo de Sistemas de Información Geográfica.
- ✓ Comprobar la efectividad de la normativa vigente (BOPA NÚM. 91 21-VI-2014).
- ✓ Conocer el origen de las anomalías geoquímicas encontradas.

6 Procedimiento

6.1 Datos de inicio y obtención de datos

Los datos iniciales consisten en:

- Un total de 334 análisis realizados sobre muestras de suelo del territorio del Principado de Asturias. Estas muestras han sido recogidas del horizonte C del suelo en zonas lo más alejadas posibles de la actividad antrópica. Los análisis fueron realizados para los siguientes metales pesados: Mn, Zn, Cr, Pb, Ba, V, Co, Ni, Cu, Tl, As, Mo, Ag, Cd, Sb, Hg.

Estos análisis aparecen divididos en dos grupos:

- VEGA-XXX: Muestras tomadas en zonas relativamente planas, bajas y a la orilla de los ríos (vegas).
- M-XXX: Muestras tomadas en otras zonas elevadas o con elevada pendiente, zonas montañosas.
- Dos archivos vectoriales .shp (shapefile) con la situación de los puntos donde ha sido realizado el muestreo.
- Un archivo vectorial .shp (shapefile) de tipo polígono con las distintas litologías presentes en el territorio de Principado de Asturias.

En esta fase del proyecto tiene gran peso el concepto de calidad de los datos ya que de ello dependerá la calidad final del proyecto. Por tanto deben ser utilizadas siempre fuentes fiables.

Para este caso en particular han sido utilizados datos de dos fuentes distintas:

- Cartografía del Instituto Geográfico Nacional (IGN).
- Modelo digital de elevaciones (MDE) de ASTER GDEM¹⁵ con una precisión de 30 metros.¹⁶

¹⁵ El Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) Global Digital Elevation Model (GDEM) es un proyecto conjunto desarrollado conjuntamente por la U.S National Aeronautics and Space Administration (NASA) y el Japan's Ministry of Economy, Trade, and Industry (METI). Este MDE presenta un tamaño de pixel de un segundo de arco, aproximadamente unos 30 metros y utiliza como geoide de referencia el WGS84/EGM96.

¹⁶ Descargado desde: <http://gdem.ersdac.jspacesystems.or.jp/search.jsp>

6.2 Software empleado

A la hora de seleccionar el software a emplear es importante realizarse siempre la siguiente pregunta: “¿Cuál es el más adecuado para cumplir los objetivos establecidos?”. En este caso en particular hay que poner especial énfasis en que posea las siguientes características:

- Elevada capacidad para la manipulación de capas ráster.
- Buenas herramientas de análisis geoestadístico y geoespacial.
- Capacidad para manipular bases de datos mediante consultas SQL con capacidad geoespacial.
- Potentes herramientas de presentación.

Para la elaboración del trabajo, y teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, ha sido seleccionado para su utilización el software puntero en el campo: Esri ArcGIS, ya que tras realizar una comparativa con su principal rival, QGIS, se concluyó que es el que mejores herramientas geoestadísticas posee.



esri

Figura 3 Logo de la ESRI

Esri ArcGIS fue liberado en Diciembre de 1999 por el Environmental Systems Research Institute (Esri) bajo una licencia de software comercial propietario y es compatible con los sistemas operativos Microsoft Windows. Se trata del sistema de información geográfica líder en el mercado tras 15 años en los cuales ha ido añadiendo nuevas funcionalidades y presentando en la actualidad un gran potencial en todas sus vertientes.

Álvaro Domínguez López
ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DE LOS NIVELES GEOGÉNICOS DE METALES PESADOS EN SUELOS
DE ASTURIAS

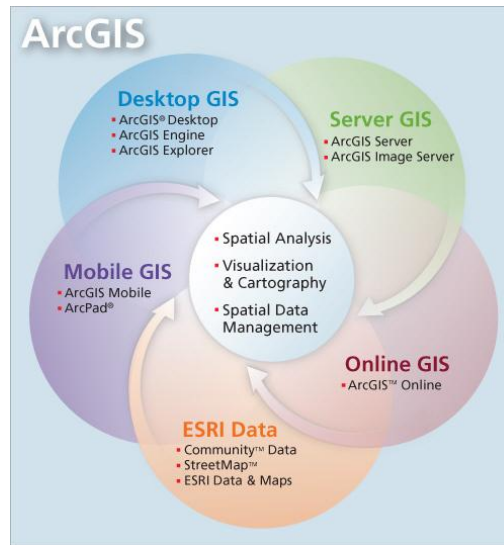


Figura 4 Esquema que representa los distintos ámbitos en los que la ESRI desarrolla su software. Fuente: ESRI

6.3 Establecimiento del proyecto y preparación de los datos

El primer paso será crear un nuevo proyecto en el que será utilizado como CRS por defecto el ERTS89/UTM30 mediante una transformación al vuelo (“on the fly”).

Muestras

Se necesita que los resultados de los análisis, en formato .xlsx (Microsoft Excel Worksheet) formen parte de la tabla de atributos de las capas vectoriales de puntos donde han sido realizados los análisis lo cual lograremos realizando un *join* entre los datos y la capa vectorial.

MDE

El MDE ha sido recortado, clasificado y se ha creado un hillshade al cual se le superpuesto el MDE con una transparencia del 30% para hacer los resultados más atractivos visualmente.

Mapa de usos del suelo

Se empleó la cartografía del CORINE Land Cover 2006¹⁷ que puede ser descargado desde la página del Instituto Geográfico Nacional.

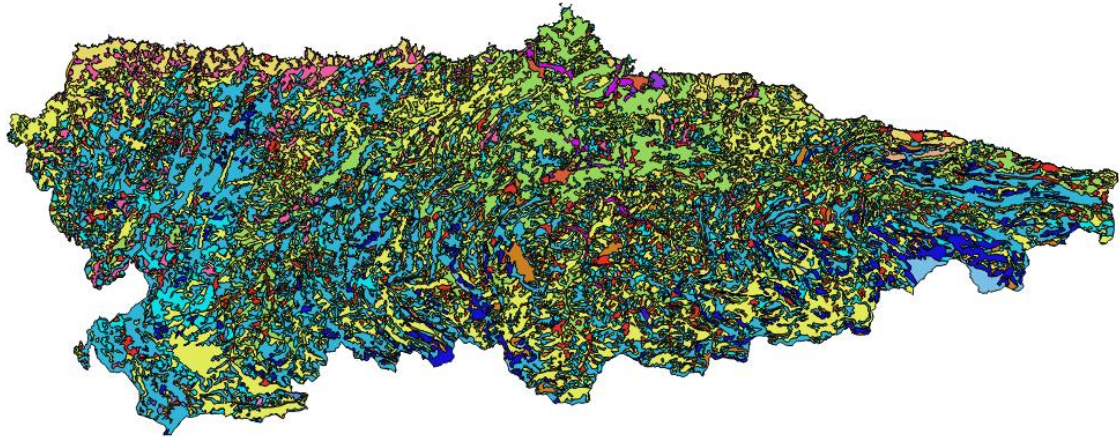


Figura 5 CORINE Land Cover 2006 de Asturias.

Se deben discriminar los códigos que son de interés en este caso de los que no lo son. Se necesitan conocer los suelos con uso urbano, uso recreativo, uso industrial y separarlos del resto.

Como uso industrial utilizaremos los siguientes códigos:

- 1.2.1 Industrial or commercial units
- 1.3.1 Material extraction sites
- 1.3.2 Dump sites

Como uso recreativo utilizaremos los siguientes códigos:

- 1.4.1 Green urban Areas
- 1.4.2 Sport and leisure facilities

Como uso residencial utilizaremos los siguientes códigos:

- 1.1.1 Continuous urban fabric

¹⁷ Programa europeo iniciado en el año 1985, y que desde 1995 está bajo el amparo de la Agencia Europea del Medio Ambiente, con el objetivo de generar una base de datos europea de ocupación de suelos a una escala 1:100000.

- 1.1.2 Discontinuous urban fabric

Para otros usos agruparemos los códigos restantes.

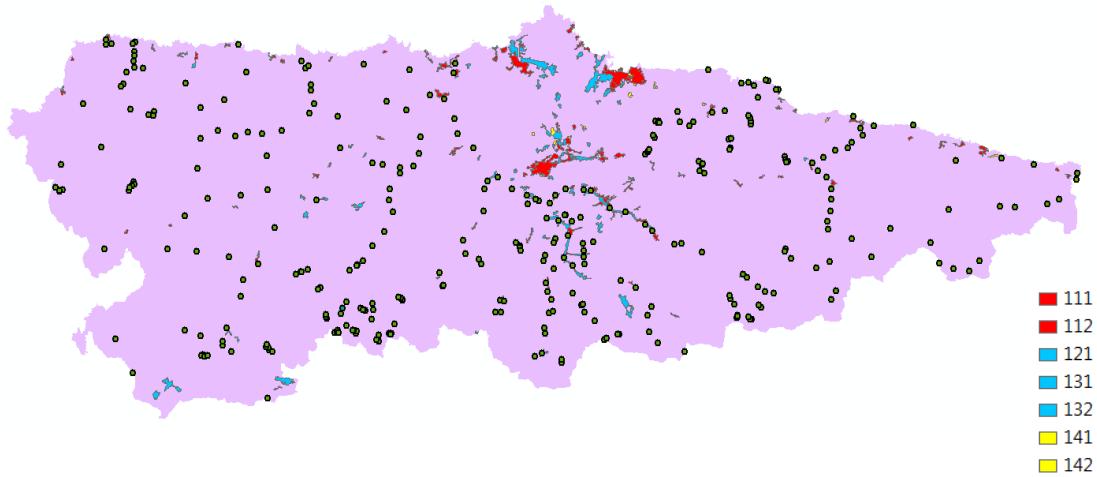


Figura 6 CORINE Land Cover 2006 de Asturias filtrado.

Al estar los NGR establecidos según los usos del suelo se deben comprobar los resultados de los krigeados con la capa del CORINE Land Cover filtrada para observar si las muestras han sido tomadas en zonas de uso industrial, recreativo, industrial o zonas con otros usos.

6.4 Metodología del análisis

6.4.1 Análisis exploratorio preliminar de los datos

En esta fase inicial serán observadas las concentraciones de los distintos metales pesados presentes en la muestras con el objetivo de encontrar valores anormales que serán tratados en mayor profundidad en diversos análisis posteriores.

Serán considerados anormales aquellos valores que superen los niveles genéricos de referencia estipulados por el BOPA.

Además durante esta fase se buscarán posibles valores erróneos para eliminarlos y que no puedan falsear los resultados finales.

6.4.2 Análisis espacial exploratorio de los datos (ESDA¹⁸)

A partir de los datos proporcionados se realizará un análisis exploratorio general para estudiar en mayor medida los datos y seleccionar el método de krigeado más adecuado.

Las herramientas utilizadas serán el Histogramas, Análisis de Tendencia, Gráficos de probabilidad normal, Mapas de Voronoi y Semivariogramas.

- Histograma: Es una representación gráfica de una variable en forma de barras en el que el eje vertical representa la frecuencia de los valores representados y que nos permite saber el modo en que se distribuye una población¹⁹.
- Análisis de tendencia: Mediante el cual se puede ver si la población muestra alguna tendencia espacial.
- Gráfico de probabilidad normal (Normal QQ Plot): Permite comparar la distribución empírica de un conjunto de datos con la distribución normal utilizando para ello los cuantiles de la normal estándar. En definitiva, prueba la normalidad de un conjunto de datos²⁰.
- Mapas de Voronoi: Mediante la denominada como Teselación de Voronoi se realiza una división de un plano en regiones basándose en la distancia euclidiana de un conjunto de puntos denominados semillas (seeds) permitiéndonos estudiar los datos de manera más local.
- Semivariograma: Define la variabilidad espacial de la población de referencia proporcionando información de cómo los datos están correlacionados con la distancia. El término semivariograma fue acuñado en el año 1963 por G. Matheron quien utilizó este método para predecir la cantidad óptima de mena en distintas minas²¹.

¹⁸ Exploratory Spatial Data Analysis

¹⁹ Entiéndase población como conjunto de elementos de referencia sobre las que han sido realizadas las observaciones

²⁰ Sonia Castillo Gutiérrez y Emilio Damián Lozano Aguilera. "Q-Q Plot Normal. Los puntos de posición gráfica". Revista electrónica de la Universidad de Jaén (2007)

²¹ David Roger Oldroyd. "The Earth Inside and Out: Some Major Contributions to Geology in the Twentieth Century". Geological Society Special Publication No. 192

6.4.3 Krigeado o Predicción de Kolmogorov Wiener

El krigeado es un método geoestadístico desarrollado inicialmente por Danie G. Krige²² y que consiste en realizar una interpolación para predecir datos desconocidos a partir de otros datos que ya conocemos.

Se asume que algunos fenómenos naturales pueden ser modelados por procesos aleatorios con autocorrelación espacial siendo la correlación espacial medida mediante un variograma.

Se considera que el krigeado es una familia de métodos de estimación líneal y óptima²³ en el sentido de los mínimos cuadrados²⁴. Además también se determina la incertidumbre asociada a la estimación.

En nuestro caso aplicaremos este método sobre cada uno de los contaminantes y si observamos que alguno de ellos presenta poblaciones con valores anórmale realizaremos un segundo kriging que en este caso será de tipo indicador (para discriminar esas poblaciones del resto).

²² Danie Gerhardus Krige (1919-2013), ingeniero de minas Sudafricano que empleó por primera vez el método posteriormente denominado como kriging (Matheron, 1963) en el cálculo de la cantidad media de oro en distintas minas al sur de África.

²³ La formulación del método de predicción óptima no fue realizada por Krige sino por la contribución de otros matemáticos como Wold (1938), Kolmogorov (1941) y Wiener (1949).

²⁴ Christensen, R., "Linear Models of Multivariate, Time Series, and Spatial Data". Springer-Verlag (1985)

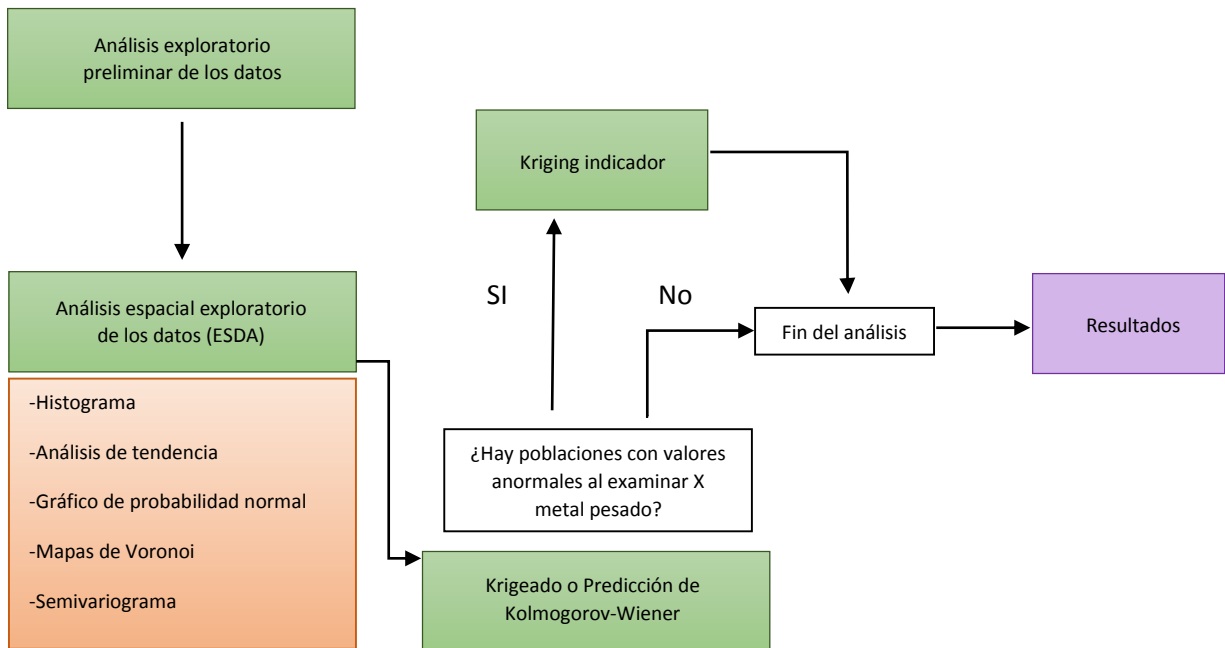


Figura 7 Diagrama de flujo del proceso seguido durante la elaboración del trabajo.

6.5 Comprobación de los Niveles Genéricos de Referencia

A la hora de realizar el kriging indicador se ha comprobado en todos los casos los usos del suelo y la litología por si pudiesen falsear nuestros resultados.

En el caso de que la totalidad de una población supere los NGR y tenga un uso del suelo o se situé sobre una litología para la cual existan excepciones en los NGR los resultados serán modificados para ajustarse a la normativa.

7 Resultados

7.1 Muestras en ladera vs muestras en vegas

Durante el proceso de análisis preliminar se pudieron comprobar las diferencias entre las muestras tomadas en las laderas y las tomadas vegas. A continuación se presenta una tabla donde se pueden ver algunos estadísticos que permiten caracterizar a ambas poblaciones:

Álvaro Domínguez López
ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DE LOS NIVELES GEOGÉNICOS DE METALES PESADOS EN SUELOS
DE ASTURIAS

Laderas (188 muestras)

	Mn	Zn	Cr	Pb	Ba	V	Co	Ni
Media	732,13	122,44	27,51	37,39	99,73	25,94	8,58	15,55
Desv. Std.	944,53	512,51	37,27	77,36	153,05	16,80	7,54	12,75
	Cu	Tl	As	Mo	Ag	Cd	Sb	Hg
Media	15,07	197,59	19,93	0,56	151,87	469,87	64,29	417,29
Dest. Std.	14,76	289,18	44,13	0,78	101,56	863,11	49,35	1943,95

Unidades de la media y la desviación estándar: mg/kg excepto en Tl, Ag, Cd, Sb y Hg que se encuentran en ppb.

Vegas (146 muestras)

	Mn	Zn	Cr	Pb	Ba	V	Co	Ni
Media	682,85	93,69	47,13	32,84	56,91	16,32	10,48	20,54
Desv. Std.	581,29	77,73	46,74	116,22	50,82	7,59	5,19	9,95
	Cu	Tl	As	Mo	Ag	Cd	Sb	Hg
Media	23,27	139,43	19,79	0,46	72,23	363,82	195,60	259,64
Dest. Std.	39,62	83,97	15,56	0,41	90,31	1178,7	1531,57	301,43

Unidades de la media y la desviación estándar: mg/kg excepto en Tl, Ag, Cd, Sb y Hg que se encuentran en ppb.

	Mn	Zn	Cr	Pb	Ba	V	Co	Ni
Dif. %	6,73	23,48	-71,32	12,17	42,94	37,09	-22,14	-32,09
	Cu	Tl	As	Mo	Ag	Cd	Sb	Hg
Dif. %	-54,41	29,43	0,70	17,86	52,43	22,57	-204,25	37,78

Diferencias entre las medias con respecto a las muestras tomadas en zonas bajas.

Los resultados muestran que en la mayoría de los casos las concentraciones son mayores en zona de ladera que en las zonas de vega. Sobre todo en Ag, Ba, Hg, V y Tl.

En el extremo opuesto están metales pesados como el Sb, Cu, Cr, Co y Ni cuyas concentraciones son superiores en las vegas. Es extremadamente llamativo el caso del Sb cuya concentración es un 204,25% superior en estas zonas.

Estos resultados son bastante poco comunes ya que lo habitual es que las concentraciones sean mayores en las zonas más bajas debido a que los contaminantes son arrastrados ladera abajo por la escorrentía.

En este caso en particular los resultados seguramente se deban a la distribución del muestreo. Las muestras de vega han sido tomadas próximas a ríos, zonas en las frecuentemente están situadas áreas industriales y núcleos de población por lo que no

Álvaro Domínguez López
ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DE LOS NIVELES GEOGÉNICOS DE METALES PESADOS EN SUELOS
DE ASTURIAS

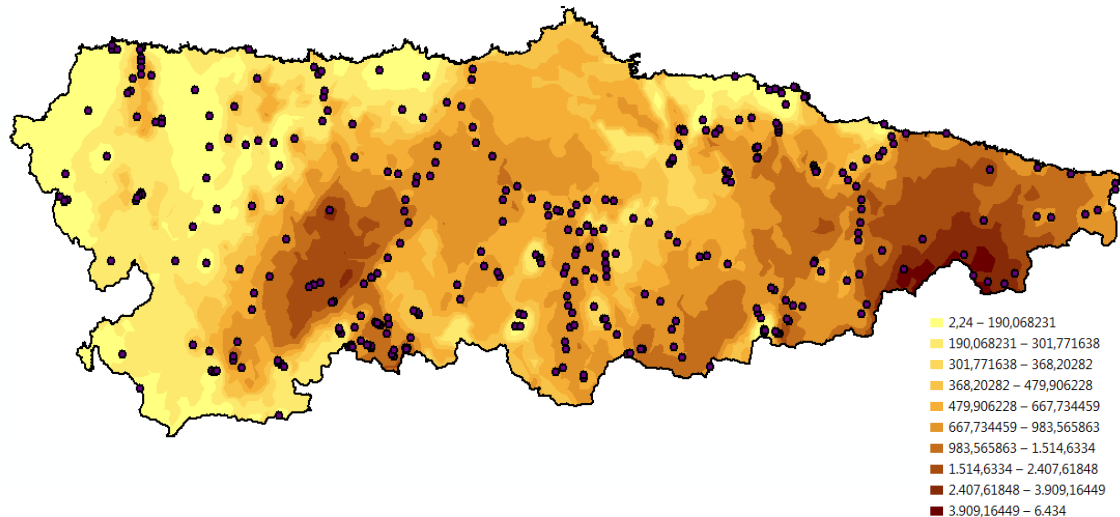
resulta extraño que exista cierta contaminación antrópica (baja debido a que el muestreo ha sido realizado en zonas de baja contaminación antrópica) en metales utilizados de manera masiva como el cobre, el cobalto o el níquel.

Por otro lado, gran parte de los yacimientos de la región están situados en zonas montañosas por lo que es normal que los suelos se vean enriquecidos por metales pesados presentes en los mismos.

Se puede concluir diciendo que las muestras tomadas en vegas tienen una contaminación antrópica asociada mientras que en el caso de las muestras tomadas en zonas de montaña presentan una “falsa” contaminación geogénica asociadas a anomalías geoquímicas positivas.

7.2 Metales pesados

7.2.1 Manganeso



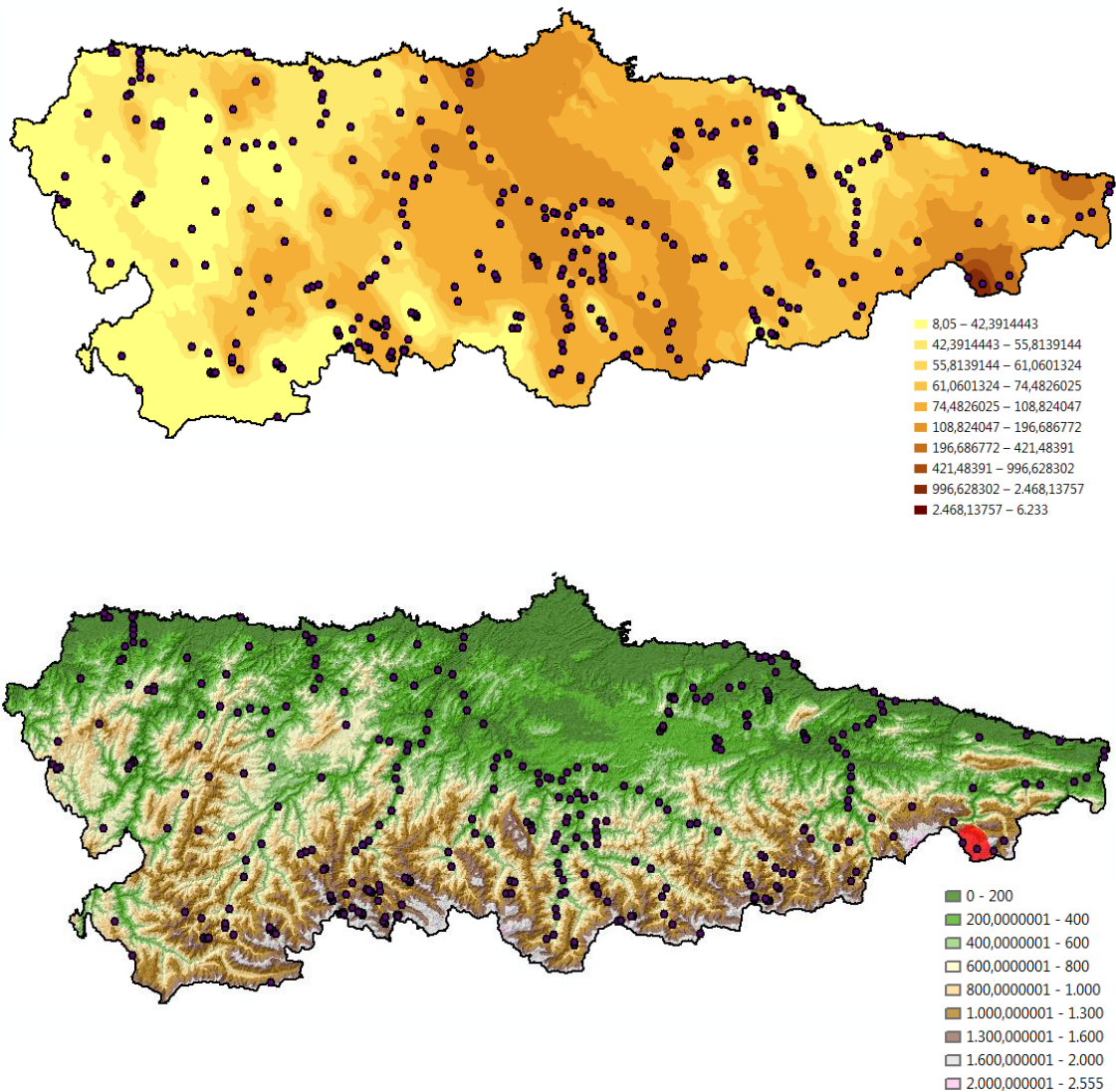
Se observan concentraciones más elevadas en el este que en el oeste. Esto es debido a que los suelos básicos tienen mayor capacidad para retener el Manganeso que los suelos ácidos y como se ha visto anteriormente los suelos básicos se forman principalmente sobre calizas (y carbonatos en general) muy abundantes en la zona este del Principado de Asturias.

Se puede observar un foco de altas concentraciones en la zona occidental cuyo origen está relacionado con las emisiones de la central térmica de Soto de la Barca (en el concejo de Tineo).

Por otra parte en la zona de los Picos de Europa y adyacentes (Sierra de Dobros y de Covadonga) aparecen concentraciones elevadas estando en este caso relacionadas con los yacimientos de la zona, con una mineralogía que incluye psilomelana ((Ba, H₂O)₂Mn₅O₁₀), pirolusita (MnO₂) y braunita (Mn²⁺(Mn³⁺)₆SiO₁₂).

Los valores obtenidos de la interpolación son normales y en ningún caso se superan los niveles genéricos de referencia establecidos.

7.2.2 Zinc

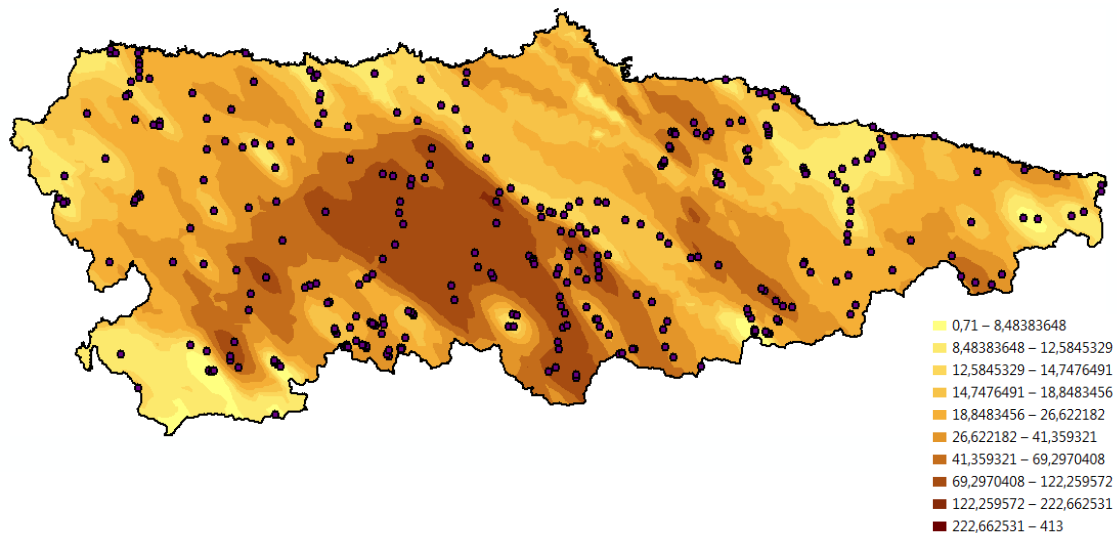


Se pueden ver las concentraciones más elevadas en la zona central y oriental. Y si se compara la zona occidental y la oriental se puede ver como las concentraciones son superiores en la oriental. Esto es debido a que al igual que en el caso del Manganese los suelos básicos tienen mayor capacidad de retener el Zinc que los suelos ácidos y la zona oriental está compuesta en gran medida por rocas carbonatadas.

Resulta llamativo que en la zona central aparecen concentraciones bastante elevadas aunque posiblemente esté relacionado con que es la zona de mayor actividad industrial y minera en el territorio asturiano.

Los resultados de la interpolación muestran que se superan los niveles genéricos de referencia en torno al municipio de Cabrales. Estas elevadas concentraciones están relacionadas a los yacimientos mineros de la zona como los famosos yacimientos de Zn-Pb de Las Vegas de Sotres con Esfalerita ((Zn,Fe)S) y en menor medida con otros yacimientos como el de Mina Delfina (Cu) que tiene asociados minerales con Zn secundario (o como impureza): Auricalcita ((Zn,Cu²⁺)₅(CO₃)₂(OH)⁶), Tetraedrita ((Cu,Fe)₁₂Sb₄S₁₃) y Tennantita (Cu₆[Cu₄(Fe,Zn)₂]As₄S₁₃).

7.2.3 Cromo



Se pueden ver las concentraciones más elevadas en la zona central/occidental. Esto es así debido a que el cromo es retenido con mayor facilidad por suelos ácidos, y por lo tanto asociados a rocas ácidas (como por ejemplo areniscas, cuarcitas o granitos) que son abundantes en las zonas centro y oeste de la región.

Las elevadas concentraciones en torno a la zona central parecen estar asociados a las emisiones de la central térmica de Soto de Ribera²⁵ aunque en este caso no se ve claramente debido a que las muestras en vegas falsean el resultado.

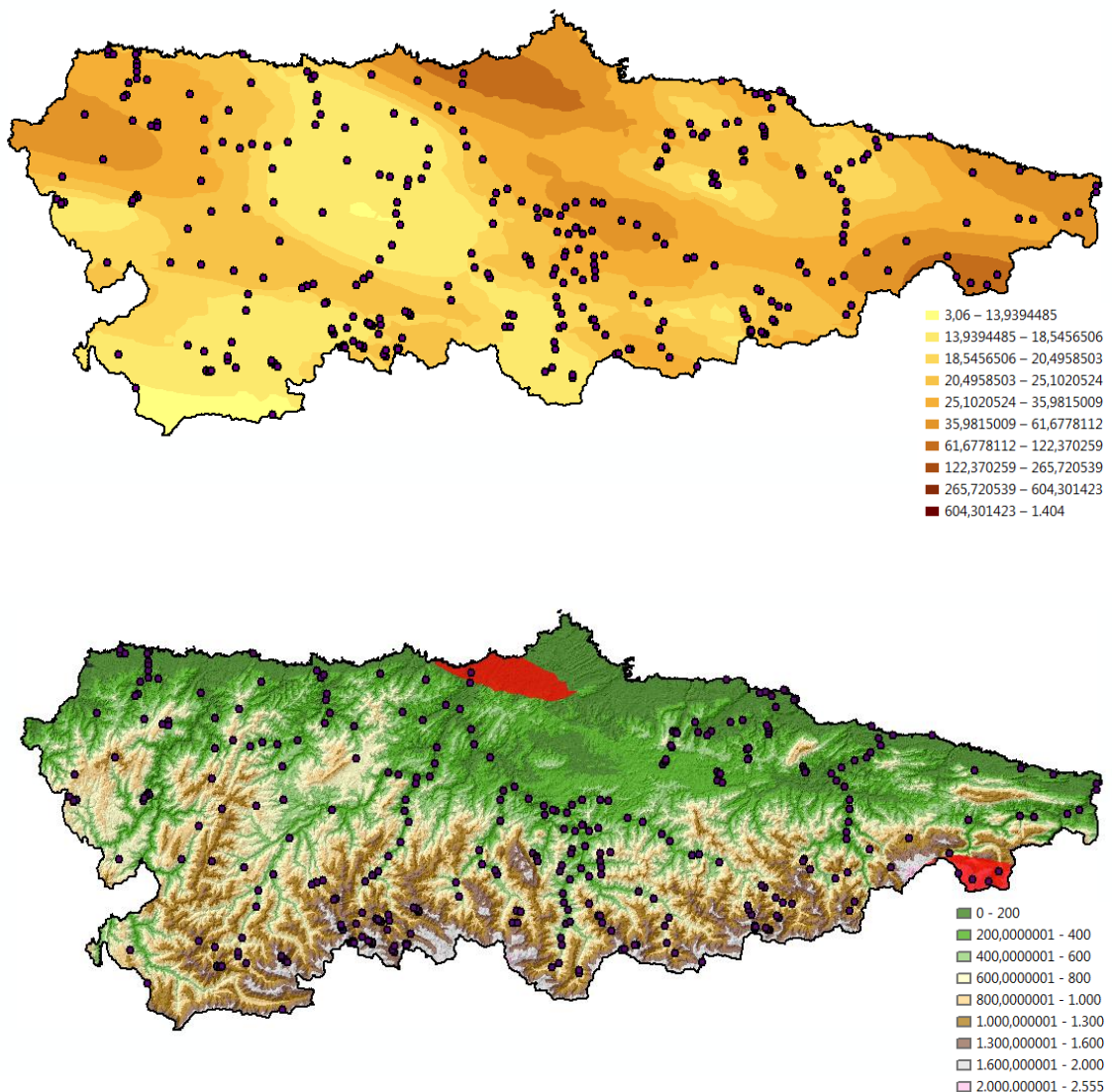
En la zona de Tineo seguramente tienen el mismo origen: generados por las emisiones de la central térmica de Soto de la Barca.

²⁵ Apuntes “Máster en Recursos Geológicos y Geotecnia” Indurot

Además, en algunas formaciones con niveles ferruginosos como la Fm. Furada, la Fm. Naranco y la Fm. Candás-Pireñes se han observado que las muestras poseen elevadas concentraciones en cromo debido a la presencia de cromita ($\text{Fe}^{2+}\text{Cr}_2\text{O}_4$) (García-Ramos et al. (1987))²⁶ lo cual si aparece reflejado en los resultados.

Se cumplen los niveles genéricos de referencia establecidos.

7.2.4 Plomo



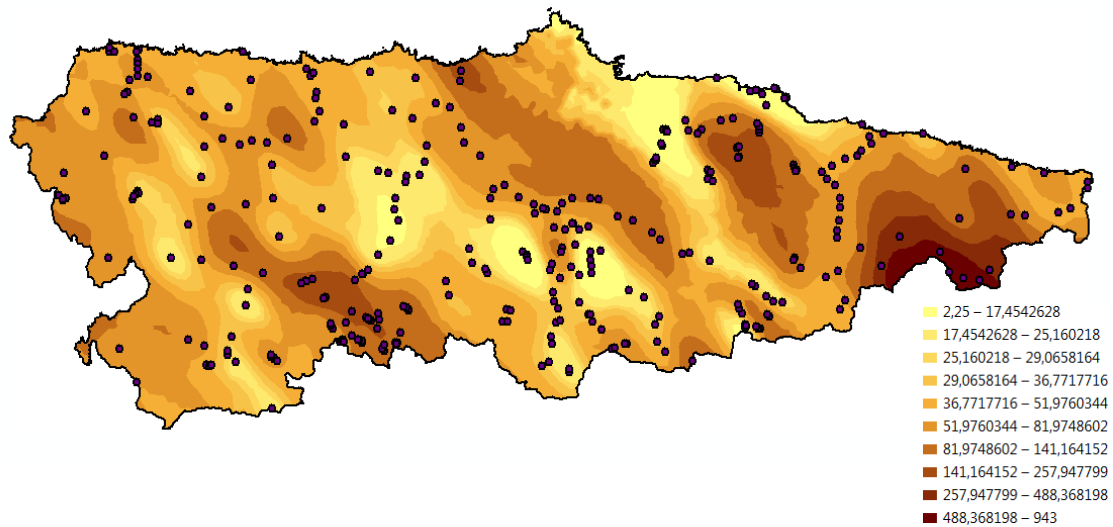
²⁶ Manuel Gutierrez Claverol y Carlos Luque Cabal. "Recursos del subsuelo en Asturias". Pag 93. Servicio de publicaciones de la Universidad de Oviedo.

El plomo aparece con valores bastante homogéneos si obviamos cuatro grandes focos que presentan elevadas concentraciones:

- En el extremo occidental aparecen concentraciones elevadas. Se deben a la geología del lugar que consiste en una zona de metamorfismo de contacto en torno al plutón granítico de Boal y que a su vez forma parte del domo térmico de Boal-Los Ancares. Los granitos y las rocas metamórficas como los esquistos poseen concentraciones más elevadas de plomo que en el caso de las rocas detríticas.
- En la zona centro se pueden ver también concentraciones moderadamente elevadas y posiblemente relacionadas con que se trata de una zona muy urbanizada, industrial y con mucha circulación (se debe recordar que antiguamente los combustibles llevaban plomo).
- En la zona norte podemos ver concentraciones muy elevadas que superan los niveles genéricos de referencia y que muy posiblemente estén relacionados con contaminación antrópica debido a la proximidad con Avilés (considerado por el Instituto Español de Oceanografía como el segundo punto más contaminado en plomo de España en el año 2014).
- Por último, en torno al municipio de Cabrales se pueden observar concentraciones que superan los niveles genéricos de referencia. Estas concentraciones están relacionadas, al igual que en el caso del Zinc, con los yacimientos de Zn-Pb de las Vegas de Sotres los cuales incluyen entre su mineralogía galena (PbS).

En ningún caso son superados los niveles genéricos de referencia establecidos.

7.2.5 Bario



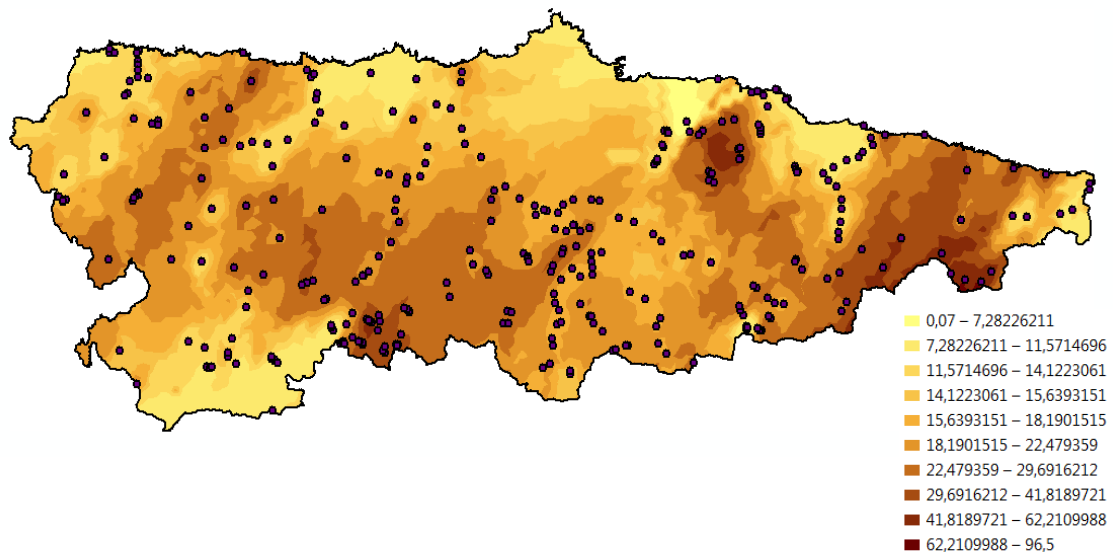
Se pueden observar cuatro focos de elevadas concentraciones relacionadas con yacimientos minerales (origen geogénico) de barita (BaSO_4) la cual aparece en muchos casos asociada a la fluorita (CaF_2):

- En Cudillero donde nos encontramos explotaciones como mina Avelina.
- En Cabrales donde nos encontramos con algunos yacimientos con barita como el de Ortiguera (yacimiento de Cu).
- En Cabranes y Piloña donde nos encontramos con explotaciones como mina Torazo.
- En Cangas del Narcea donde nos encontramos con explotaciones como mina Barrera.

En este último caso también puede estar relacionado con la proximidad a las mineralizaciones de Caunedo (mercurio) que tiene asociada barita entre otros minerales.

En ningún caso de superan los niveles genéricos de referencia.

7.2.6 Vanadio



El Vanadio aparece en muchos casos asociado a yacimientos de cobre. En este caso se pueden ver elevadas concentraciones en la zona de los Picos de Europa e Infiesto que están relacionadas con estos yacimientos pudiéndose agrupar en dos tipos:

- Yacimientos epitermales de Cu en el caso de los Picos de Europa.
- Yacimientos de tipo Skarn situados en la zona de Infiesto.

Los niveles algo elevados que se observan en la zona noroeste posiblemente estén relacionados el metamorfismo regional de la zona (Domo térmico Boal-Los Ancares).

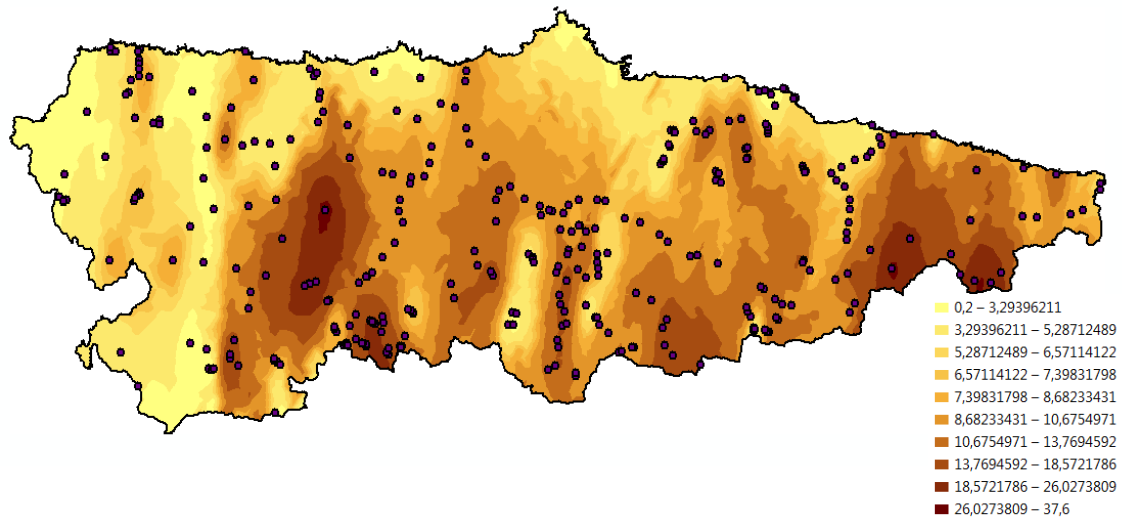
En el caso de la zona de Tineo las concentraciones son debidas a las emisiones de la central térmica de Soto de la Barca.

Por último las concentraciones en torno a Somiedo están relacionadas, al igual que en casos anteriores, con la minería. En la zona se encuentran importantes mineralizaciones de Mercurio como en el caso de Caunedo. Estas mineralizaciones tienen asociadas ciertas cantidades de pirita, calcopirita, esfalerita, galena, barita y minerales de alteración de Cu (como la malaquita)²⁷

En ningún caso se superan los niveles genéricos de referencia establecidos.

²⁷ Javier García Guinea, Jesús Martínez Frías. "Recursos Minerales de España". Pag 804. CSIC

7.2.7 Cobalto



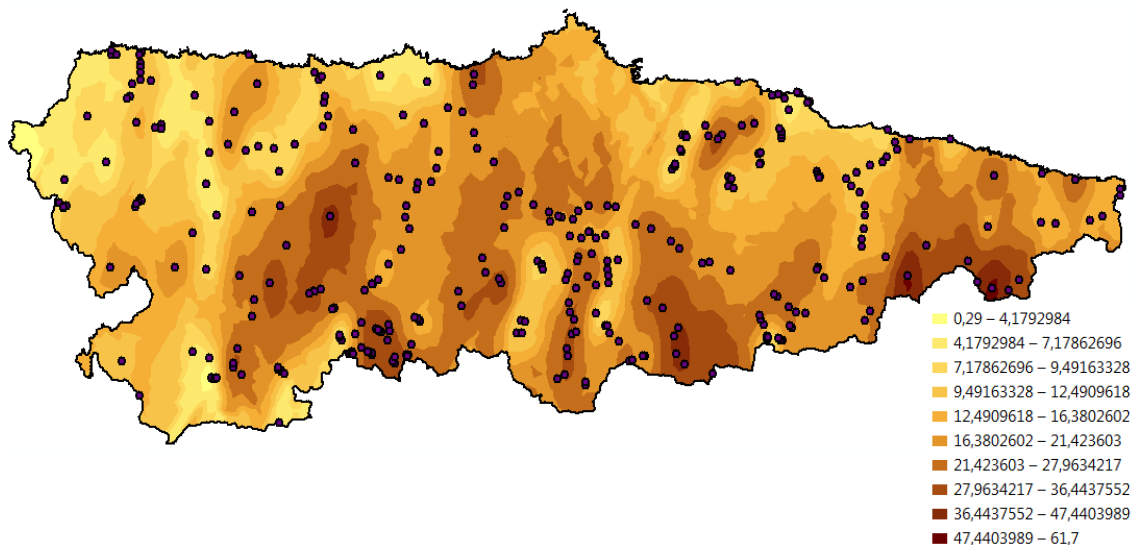
Las concentraciones de cobalto son bastante variables a lo largo del territorio pudiéndose observar concentraciones elevadas en diversos lugares a lo largo del territorio:

- En la zona de Picos de Europa debido, al igual que en otros casos, a la gran cantidad de yacimientos de la zona siendo en este caso los causantes los de Cu-Co-Ni.
- En torno a la Sierra del Aramo donde también existen yacimientos de Cu-Co-Ni.
- En la zona del municipio de Aller es posible que las altas concentraciones se deban a la proximidad con los yacimientos de Cu-Co-Ni de Villamanín, situados en el límite entre León y Asturias.
- En la zona central, en este caso, debido su situación y extensión es posible que tengan relación con las emisiones de la central térmica de Soto de Ribera.
- En el concejo de Tineo es muy probable que ocurra algo similar al caso anterior y se deban a las emisiones de la central térmica de Soto de la Barca.
- En Infiesto seguramente tengan origen geogénico y estén relacionadas con las elevadas concentraciones que suelen presentar los skarn en gran cantidad de elementos (incluyendo cobalto).
- Por último en la zona de Somiedo se deben, al igual que en otros muchos casos, a la gran cantidad de yacimientos de Cu en la zona (destacando los de Caunedo)

en los cuales mineralizaciones con cobre, cobalto y níquel aparecen conjuntamente (con excepción del yacimiento de La Paranza (Oviedo)²⁸).

No se superan los niveles genéricos de referencia

7.2.8 Níquel

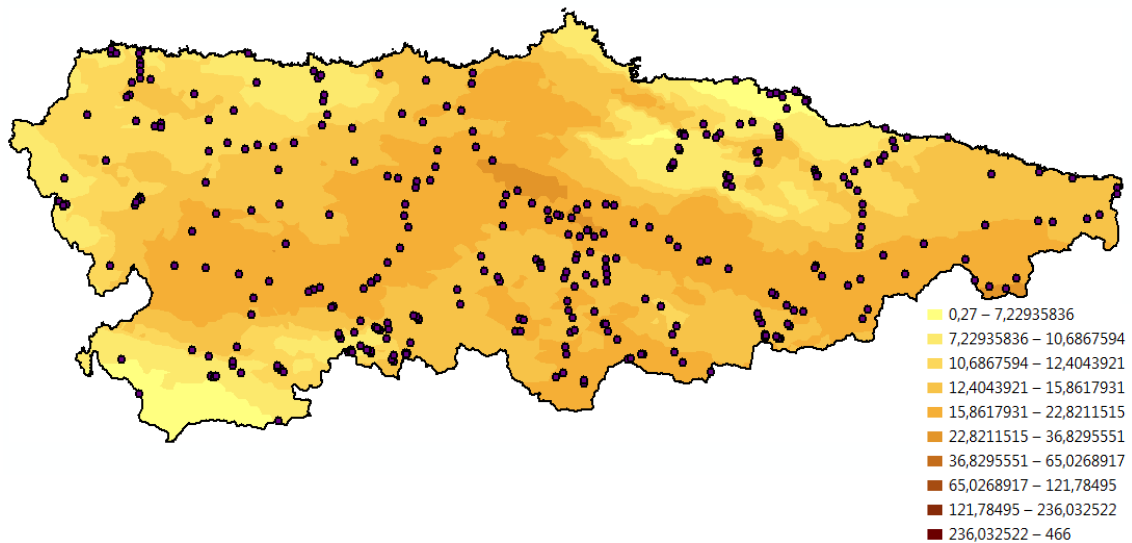


La distribución de las concentraciones que se puede observar es muy similar a la que se ha visto en el caso del cobalto lo cual hace pensar que el origen es el mismo. Esto es lógico ya que las mineralizaciones con cobalto y níquel aparecen juntas muy frecuentemente. Por tanto las conclusiones alcanzadas en el caso de cobalto pueden ser también aplicadas con el níquel.

Se cumplen los niveles genéricos de referencia en todos los casos.

²⁸ Manuel Gutierrez Claverol y Carlos Luque Cabal. "Recursos del subsuelo en Asturias". Pag 54. Servicio de publicaciones de la Universidad de Oviedo.

7.2.9 Cobre

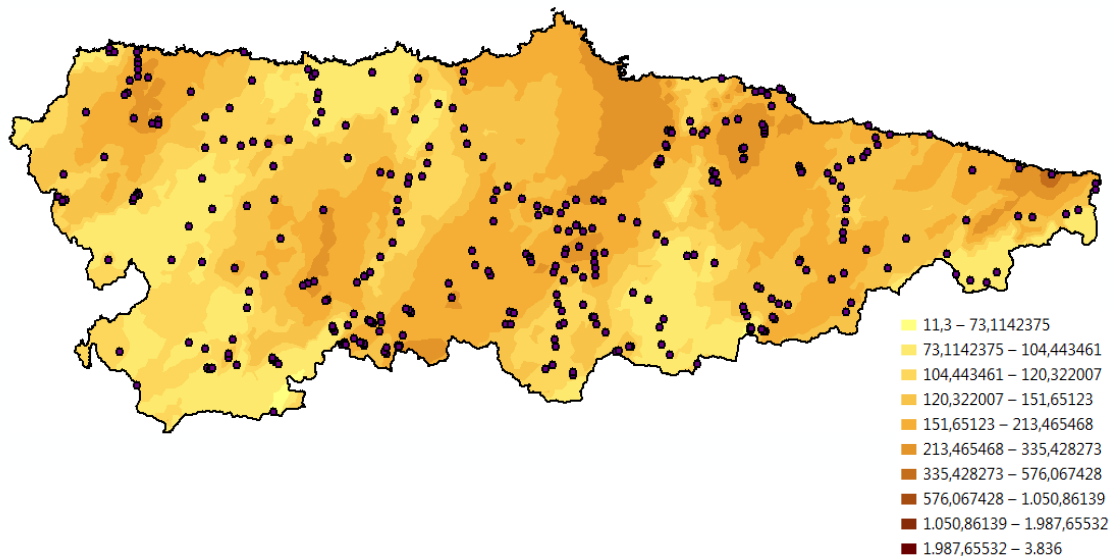


Las concentraciones en cobre son bastante homogéneas en todo el territorio sólo pudiéndose observar dos puntos con unas concentraciones ligeramente superiores al resto:

- En las proximidades de Oviedo, cuyo origen es incierto ya que podría tener tanto un origen antrópico (es una zona muy poblada e industrializada) o podría deberse a los yacimientos de cobre en el sector de la Sierra del Aramo.
- En la Zona de Cabrales relacionadas con total seguridad con los yacimientos de Cu-Co-Ni presentes.

Se cumplen los niveles genéricos de referencia en todos los casos.

7.2.10 Talio



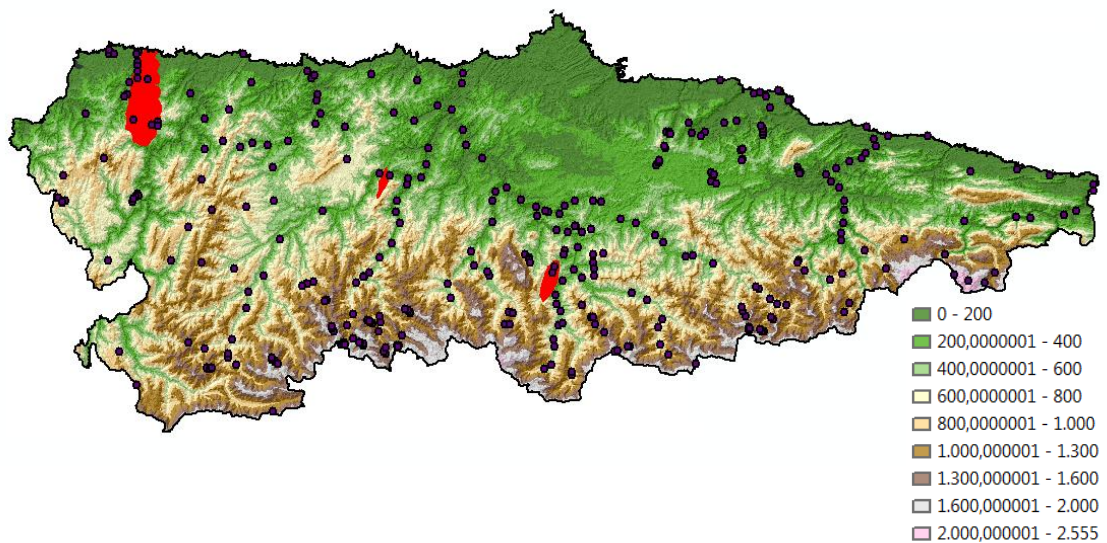
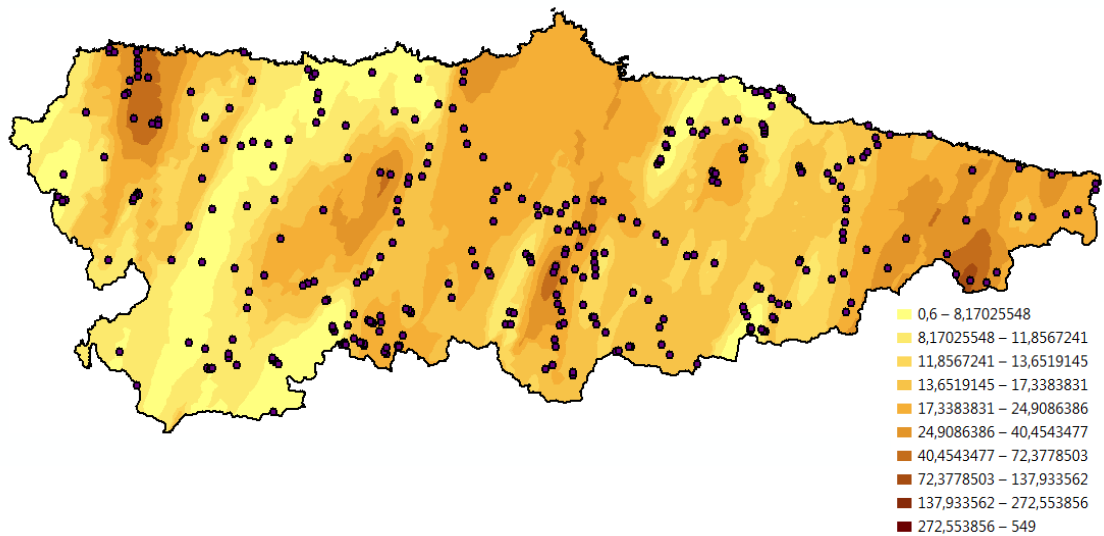
El talio es un elemento que fue ampliamente utilizado en pesticidas lo cual probablemente esté relacionado con las elevadas concentraciones de Gijón, Noreña y Oviedo.

Por otra parte los skarns son anómalos en gran cantidad de elementos, entre ellos talio, lo que explicaría las altas concentraciones en el municipio de Infiesto. Un caso similar sería el de Boal, en el cual nos encontramos con intrusiones graníticas que presentarían la misma particularidad (los skarn a grandes rasgos consisten en una intrusión volcánica, el endoskarn, que al intruir en rocas carbonatadas crea una aureola de metamorfismo denominada como exoskarn).

En el caso de la zona de Tineo casi con total seguridad estén asociadas con las emisiones de la central térmica de Soto de la Barca.

No se superan los niveles genéricos de referencia establecidos.

7.2.11 Arsénico



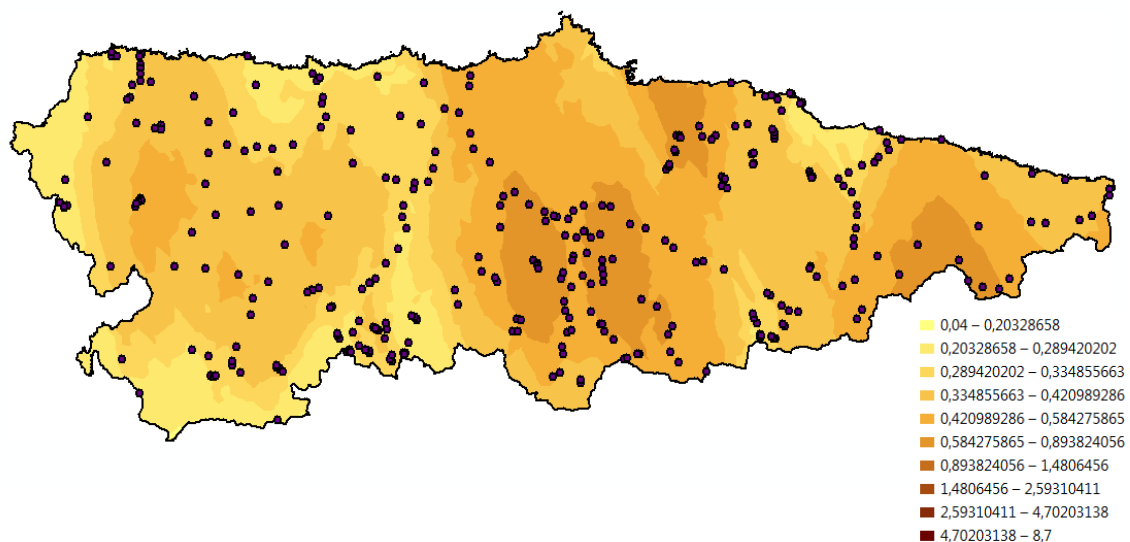
Se pueden observar un total de cuatro zonas con elevadas concentraciones de arsénico todas ellas con origen geogénico:

- Zona de Picos de Europa asociados a yacimientos de mercurio-arsénico.
- Zona de Mieres asociados a yacimientos de mercurio-arsénico
- Zona de Tineo asociados skarns de cobre-oro-arsénico destacando el skarn de Carlés.

- Zona de Boal asociado a intrusiones graníticas y yacimientos meso-epitermales de oro-arsénico-antimonio asociados, siendo un claro ejemplo de este tipo de yacimientos el de Salave.

Exceptuando el caso de los Picos de Europa, se superan los niveles genéricos de referencia en los otros tres.

7.2.12 Molibdeno



Se pueden ver principalmente tres zonas con elevadas concentraciones:

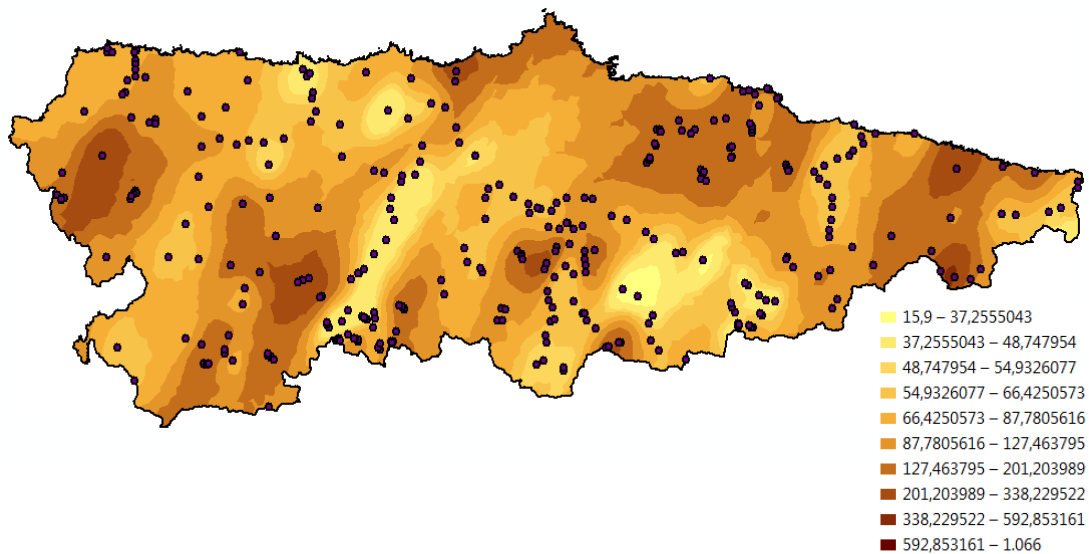
- En la zona central siendo extremadamente probable, debido a la morfología y a su extensión, que se deban a las emisiones de la central térmica de Soto de Ribera.
- Zona de Picos de Europa es bastante probable que estén relacionadas con los yacimientos de Picos de Europa aunque su origen concreto es complicado de conocer. Una posible hipótesis es que estén relacionados con hidrotermalismo ya que los yacimientos de W, Sn y Mo del territorio están asociados a intrusiones de rocas ígneas ácidas e hidrotermalismo²⁹.

²⁹ Manuel Gutierrez Claverol y Carlos Luque Cabal. "Recursos del subsuelo en Asturias". Pag 65. Servicio de publicaciones de la Universidad de Oviedo.

- En la zona de Infiesto, muy posiblemente relacionadas con el skarn de Infiesto (se debe recordar que los skarn son anómalos en gran cantidad de elementos incluyendo el molibdeno).

En ningún caso de superan los niveles genéricos de referencia establecidos.

7.2.13 Plata

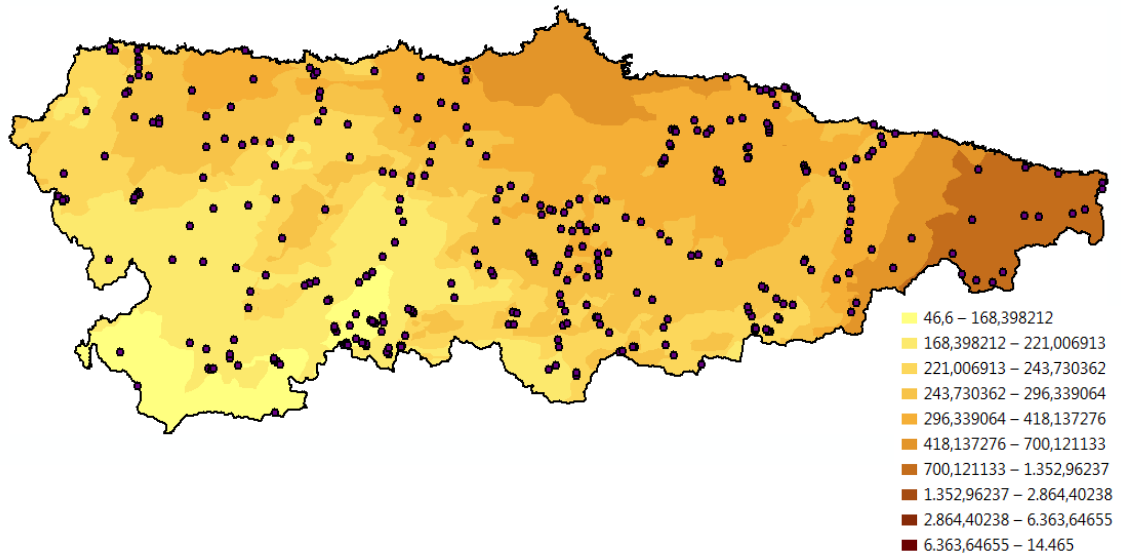


Se pueden observar varios puntos con unas concentraciones localmente elevadas:

- En el sector de Boal asociado al domo térmico de Boal-Los Ancares.
- En la zona de Tineo guardando relación seguramente con las emisiones de la central térmica de Soto de la Barca.
- En la zona central se repite el caso anterior pero la fuente es la central térmica de Soto de Ribera.
- En la zona de Infiesto probablemente guarde algún tipo de relación con el skarn de Infiesto.
- En torno a Cabrales seguramente asociadas a la gran cantidad de yacimientos de la zona.

En ningún caso de superan los niveles genéricos de referencia.

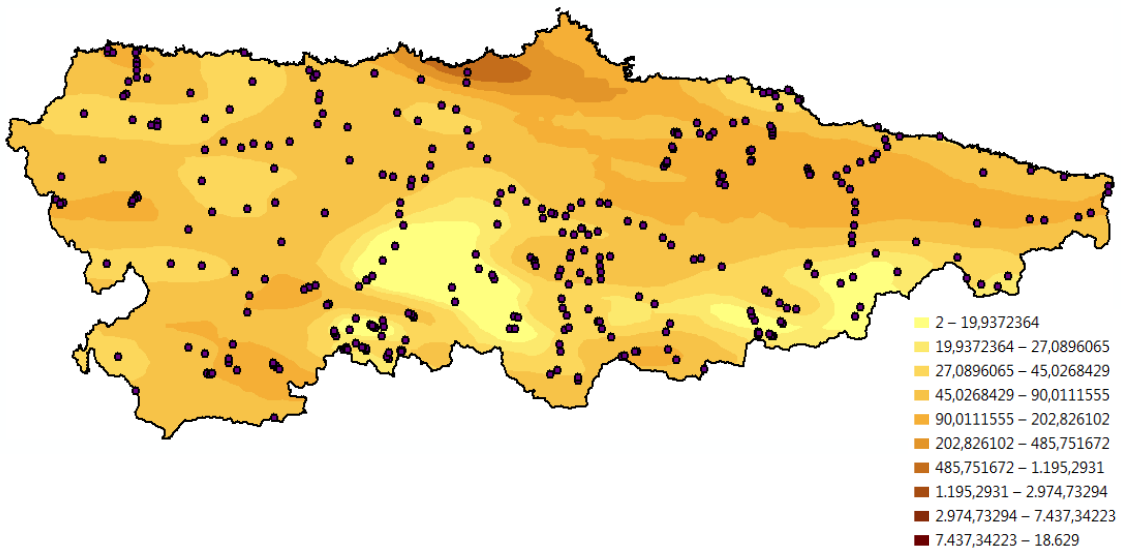
7.2.14 Cadmio



Lo más destacable en este caso es la tendencia SO-NE que se puede observar muy claramente. Posiblemente tenga relación con la litología dominante en cada zona (rocas siliciclásticas en el oeste y rocas carbonatadas en el este) ya que el cadmio se fija con más facilidad en suelos básicos (pH alto) que en ácidos.

Las concentraciones no superan los niveles genéricos de referencia en ningún caso.

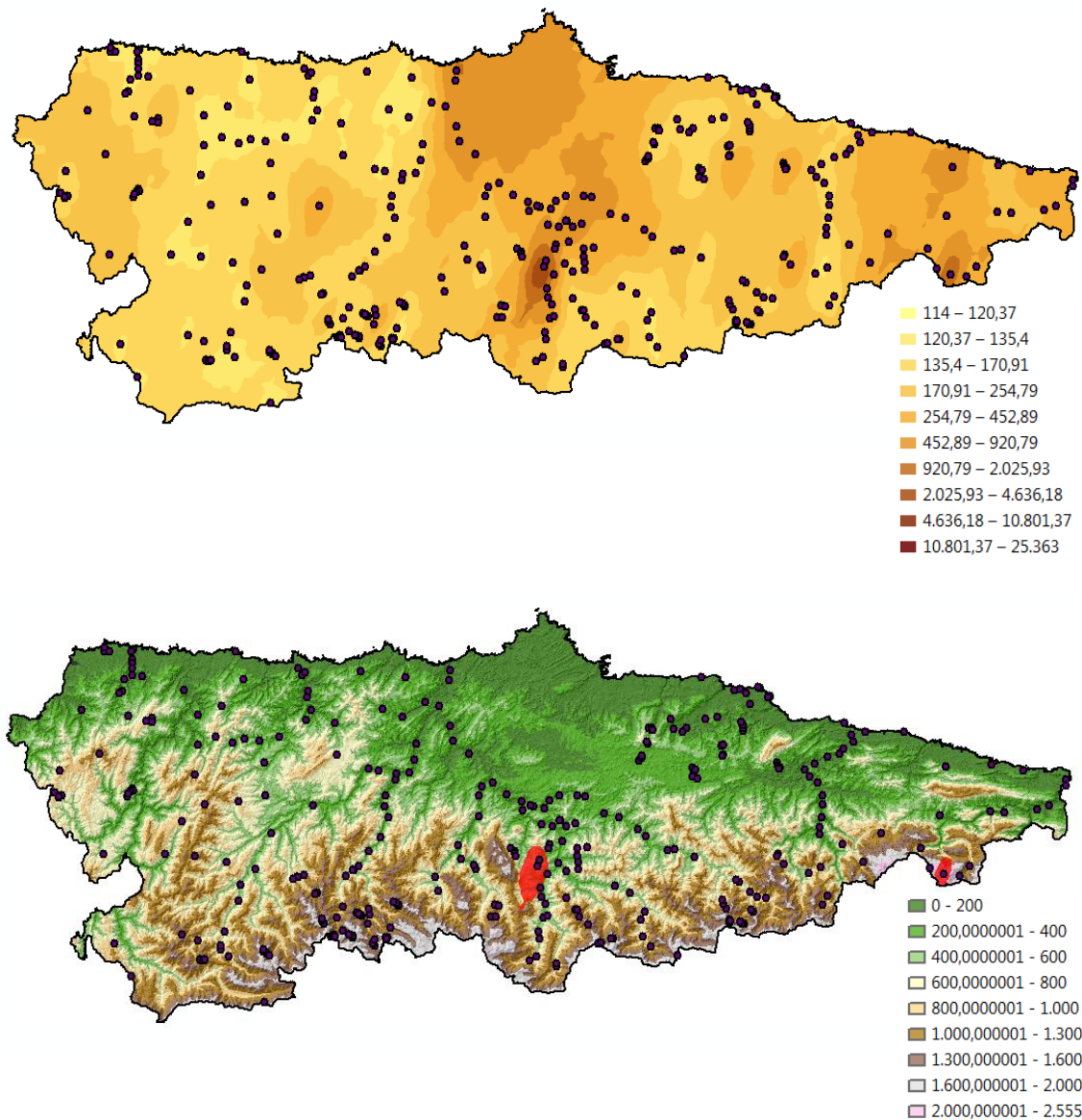
7.2.15 Antimonio



Resultan llamativas las concentraciones en la zona de Avilés. Con total seguridad tengan origen antrópico y estén ligadas a la gran actividad industrial de la zona (Avilés es una ciudad con altos niveles de contaminación).

En ningún caso de superan los niveles genéricos de referencia establecidos.

7.2.16 Mercurio



Se pueden ver dos zonas de concentraciones muy elevadas resultando especialmente una de ellas situada en el entorno de Mieres y debidos a yacimientos de mercurio-arsénico destacando en cuanto a volumen de la mineralización los de Terronal y la Peña en Mieres y los de Soterraña y Muñón Cimero en Pola de Lena.

Por otro lado en la zona de Picos de Europa las concentraciones deben guardar relación también con la presencia de otros yacimientos de este tipo pero de menor importancia³⁰.

En ambos casos los niveles genéricos de referencia establecidos son superados.

8 Conclusiones

De los resultados obtenidos se pueden sacar una serie de conclusiones acerca de los factores que afectan a la concentración de los metales en Asturias siendo la principal la gran importancia que tiene la geología en la distribución de los mismos. Aún al haberse realizado el muestreo en zonas de muy baja contaminación antrópica la variabilidad entre las concentraciones es muy grande.

Resulta también llamativo el contraste entre las dos “poblaciones” de muestras empleadas. Se puede ver con total claridad un comportamiento que se podría considerar anormal en la que las concentraciones más elevados están en las zonas más altas lo cual permite hacerse una idea del peso que tiene el factor geológico (los yacimientos suelen estar situados en zonas de montaña).

Si se hace una agrupación de las posibles causas de altas concentraciones y puntos contaminados según los NGR del Principado de Asturias nos encontramos fundamentalmente con tres factores:

- Yacimientos: Asturias es una región minera y con un gran abanico de yacimientos minerales, siendo destacables los yacimientos de Cu-Co-Ni, Hg-As, Pb-Zn, Au-As-Sb, F-Ba y los skarn de Cu-Au-As.

³⁰ Carlos Aramburu, Fernando Bastida et al. “*Geología de Asturias*”. Pag. 146. Ediciones Trea, 1ª edición (1995).

Álvaro Domínguez López
ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DE LOS NIVELES GEOGÉNICOS DE METALES PESADOS EN SUELOS
DE ASTURIAS

- Litologías: Aunque en algunos casos es visible cierta variabilidad entre rocas siliciclásticas y carbonatadas lo más destacable se da en las rocas volcánicas las cuales, y debido a su naturaleza, están enriquecidas en gran cantidad de metales pesados. Un caso particularmente destacable en Asturias es el de la intrusión granítica de Boal y su zona de metamorfismo de contacto asociada.

- Emisiones industriales: Principalmente se pueden observar tres grandes focos de contaminación antrópica. Las centrales térmicas de Soto de la Barca y de Soto de Ribera y el entorno de la ciudad de Avilés. En los dos primeros casos la emisión de cenizas volantes y su posterior depósito dan lugar a anomalías geoquímicas de gran extensión aunque de pequeña magnitud (en ningún caso llegan a superar los NGR). A la hora de hablar de Avilés el escenario es muy diferente: es una ciudad muy contaminada, cuya ría y calidad del aire han sido titular en muchas noticias por su deficiente estado siendo la contaminación de sus suelos muy elevada.

Los niveles genéricos de referencia en el principado de Asturias utilizan como factor principal a la hora de realizar la clasificación los usos del suelo con matices geológicos en algunas ocasiones. Aun así los resultados muestran que en algunos casos estos NGR son superados sin estar relacionadas las concentraciones con actividad antrópica siendo el caso del zinc, el plomo, el arsénico y el mercurio.

Si uno se ciñe al concepto de contaminación únicamente se deberían contemplar las anomalías geoquímicas positivas relacionadas con la acción humana, sin embargo con los niveles genéricos de referencia actuales se está considerando que concentraciones elevadas por naturaleza y con un origen geogénico son contaminación por lo que quizá debería plantearse una modificación de los mismos acotándolos desde el punto de vista geológico aún más.

9 Bibliografía

Libros

- Carlos Aramburu, Fernando Bastida et al. *“Geología de Asturias”*. Ediciones Trea, 1ª edición (1995).
- Barceloux G., Donald y Barceloux Donald. *“Zinc”*. Clinical Toxicology, 1999, Vol. 37, No. 2.
- David Roger Oldroyd. *“The Earth Inside and Out: Some Major Contributions to Geology in the Twentieth Century”*. Geological Society Special Publication No. 192
- Christensen, R., *“Linear Models of Multivariate, Time Series, and Spatial Data”*. Springer-Verlag (1985)
- Domy C. Adriano. *“Trace elements in Terrestrial Enviroments: Biogeochemistry, Bioavailability and Risks of Metals”* Ed. Springer, 2ª edición (2001).
- Manuel Gutierrez Claverol y Carlos Luque Cabal. *“Recursos del subsuelo en Asturias”*. Servicio de publicaciones de la Universidad de Oviedo.
- Javier García Guinea, Jesús Martínez Frías. *“Recursos Minerales de España”*. CSIC.

Trabajos

- *“Geoestadística Espacial y Espacio- Temporal: Vino nuevo, Cepas Viejas”*. J.M. Montero, G. Fernández-Avilés ,J. Mateu, E. Porcu.
- *“Fichas técnicas de cenizas volantes de carbón y cenizas de hogar o escorias”*. Centro de Estudios y experimentación de obras públicas (CEDEX).

Legislación

- *Real Decreto 9/2005, de 14 de enero, por el que se establece la relación de actividades potencialmente contaminantes del suelo y los criterios y estándares para la declaración de suelos contaminados.* «BOE» núm. 15, de 18 de enero de 2005, páginas 1833 a 1843 (11 págs.). Referencia: BOE-A-2005-895.
- *Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados.* «BOE» núm. 181, de 29 de julio de 2011, páginas 85650 a 85705 (56 págs.). Referencia: BOE-A-2011-13046.
- *Resolución de 20 de marzo de 2014, de la Consejería de Fomento, ordenación del Territorio y Medio Ambiente, por la que se establecen los niveles Genéricos*

Álvaro Domínguez López
ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DE LOS NIVELES GEOGÉNICOS DE METALES PESADOS EN SUELOS
DE ASTURIAS

de Referencia para metales pesados en suelos del Principado de Asturias.
BOPA. NÚM. 91 de 21-IV-2014

Webs

- *ArcGIS Resource Center* – help.arcgis.com
- *Wikipedia* - www.wikipedia.com
- *Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades, USA* - www.atsdr.cdc.gov

Apuntes

- Apuntes “*Máster en Recursos Geológicos y Geotecnia*”. Indurot

RESÚMENES ANALÍTICOS

ANEXO I

ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DE LOS NIVELES GEOGÉNICOS DE METALES PESADOS EN SUELOS DE ASTURIAS

Autor: Álvaro Domínguez López

Tutor: Celestino Ordóñez Galán

Fecha: 6/2015

FICHA DE METAL PESADO

Nombre: Manganeso

Muestras: 334

Sumatorio: 237336,26

Mínimo: 2,24

Media: 710,587605

Máximo: 6434

Desviación Estándar: 806,51617

Análisis Espacial Exploratorio de los datos

Histograma: Utilizando un histograma con transformación logarítmica se observa una distribución leptocúrtica (kurtosis: 4,1375), apuntada y unas colas más anchas de lo normal. También se observa cierta asimetría en la distribución de los datos (coeficiente de sesgo: -1,095).

Análisis de tendencia: Se observa una ligera tendencia hacia el Este donde las concentraciones son más elevadas. También se puede ver como las concentraciones son mayores en las latitudes medias.

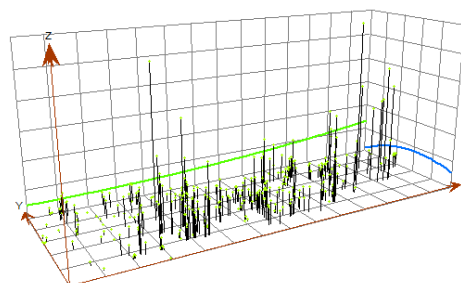


Gráfico de Probabilidad normal: La población muestra una distribución bastante alejada a la normal obteniéndose un mejor ajuste mediante una transformación logarítmica, aunque no es bueno.

Mapas de Voronoi: Muestra concentraciones elevadas localmente en la zona de los Concejos de Tineo y Cangas del Narcea, y en el extremo más oriental de la comunidad autónoma.

Semivariograma: La mayor variabilidad se da en la dirección NO/SE.

Interpolación

Tipo: Kriging ordinario con transformación logarítmica.

Modelo del semivariograma: Gaussiano.

Anisotropía: Sí.

Observaciones

-Los datos originales no siguen una distribución normal, por lo tanto se aplica una transformación logarítmica.

-Es necesario remover una tendencia de segundo orden.

-No se superan los NGR establecidos.

FICHA DE METAL PESADO

Nombre: Zinc

Muestras: 334

Sumatorio: 36698,29

Mínimo: 8,05

Media: 109,87512

Máximo: 6233

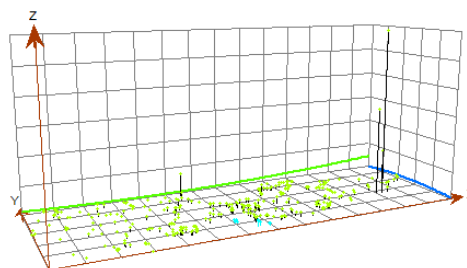
Desviación Estándar: 388,191535

Análisis Espacial Exploratorio de los datos

Histograma: Utilizando un histograma con transformación logarítmica se observa una distribución leptocúrtica (kurtosis: 7,598), muy apuntada y unas colas más anchas de lo normal. También se puede observar una ligera asimetría en la distribución de los datos (coeficiente de sesgo: 0,60558).

Análisis de tendencia: Se observa una ligera tendencia hacia el Este donde las concentraciones son más elevadas.

Gráfico de Probabilidad normal: La distribución está bastante alejada de la normal pero mediante una transformación logarítmica se consigue un mejor ajuste.



Mapas de Voronoi: Se observan concentraciones muy elevadas localmente en la zona del concejo de Cabrales (únicamente dos muestras. Posiblemente se debe a irregularidades en el muestreo).

Semivariograma: La mayor variabilidad se da en la dirección NO/SE.

Interpolación

Tipo: Kriging ordinario con transformación logarítmica.

Modelo del semivariograma: Gaussiano.

Anisotropía: Sí.

Observaciones

-Los datos originales no siguen una distribución normal, por lo tanto se aplica una transformación logarítmica.

-Es necesario remover una tendencia de segundo orden.

-Se superan los NGR establecidos.

FICHA DE METAL PESADO

Nombre: Cromo

Muestras: 334

Sumatorio: 12053,35

Mínimo: 0,71

Media: 36,087874

Máximo: 413

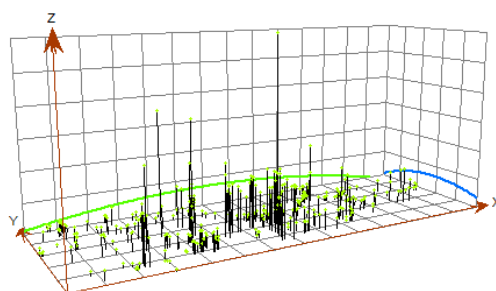
Desviación Estándar: 42,793268

Análisis Espacial Exploratorio de los datos

Histograma: Utilizando un histograma con transformación logarítmica se observa una distribución ligeramente leptocúrtica (kurtosis: 3,3134), ligeramente apuntada y unas colas más anchas de lo normal. Se puede observar una distribución muy simétrica de los datos (coeficiente de sesgo: 0,0020347).

Análisis de tendencia: Se observa que los valores más elevados tienden a encontrarse en las longitudes centrales.

Gráfico de Probabilidad normal: La distribución está bastante alejada de la normal pero mediante una transformación logarítmica se consigue un buen ajuste.



Mapas de Voronoi: Se observan concentraciones locales elevadas al sur de la zona central del territorio asturiano y en, aproximadamente, una franja que une el municipio de Mieres con el de Tineo.

Semivariograma: No se observan grandes variaciones.

Interpolación

Tipo: Kriging ordinario con transformación logarítmica.

Modelo del semivariograma: Gaussiano.

Anisotropía: Sí.

Observaciones

-Los datos originales no siguen una distribución normal, por lo tanto se aplica una transformación logarítmica.

-Es necesario remover una tendencia de segundo orden.

-Se cumplen los NGR establecidos.

FICHA DE METAL PESADO

Nombre: Plomo

Muestras: 334

Sumatorio: 11824,8

Mínimo: 3,06

Media: 35,403593

Máximo: 1404

Desviación Estándar: 96,321023

Análisis Espacial Exploratorio de los datos

Histograma: Utilizando un histograma con transformación logarítmica se observa una distribución leptocúrtica (kurtosis: 11,19), muy apuntada y unas colas más anchas de lo normal. Se observa una fuerte asimetría en la distribución de los datos (coeficiente de sesgo: 1,823).

Análisis de tendencia: Se observa una tendencia muy ligera hacia el este, donde las concentraciones son un poco mayores.

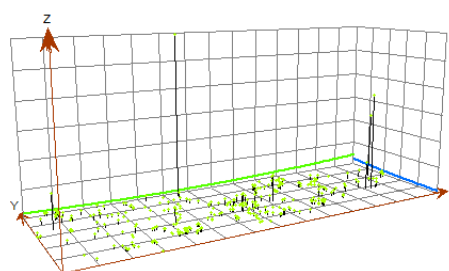


Gráfico de Probabilidad normal: La distribución está muy alejada de la normal tanto sin realizar ninguna transformación como realizando una transformación logarítmica.

Mapas de Voronoi: Se observan concentraciones locales elevadas en las franjas que unen Oviedo-Gijón, Gijón-Aviles y Oviedo-Langreo, en el entorno del municipio de Cabrales y en el extremo noroeste de la comunidad.

Semivariograma: La mayor variabilidad se da en la dirección NE/SO.

Interpolación

Tipo: Kriging ordinario con transformación logarítmica.

Modelo del semivariograma: Gaussiano.

Anisotropía: Sí.

Observaciones

-Los datos originales no siguen una distribución normal, por lo tanto se aplica una transformación logarítmica.

-Es necesario remover una tendencia de segundo orden.

-No se cumplen los NGR establecidos.

FICHA DE METAL PESADO

Nombre: Bario

Muestras: 334

Sumatorio: 27057,48

Mínimo: 2,25

Media: 81,010419

Máximo: 943

Desviación Estándar: 121,511886

Análisis Espacial Exploratorio de los datos

Histograma: Utilizando un histograma con transformación logarítmica se observa una distribución leptocúrtica (kurtosis: 3,705), algo apuntada y unas colas más anchas de lo normal. Se observa una distribución de los datos bastante simétrica (coeficiente de sesgo: -0,20455).

Análisis de tendencia: Se observa una tendencia hacia el este donde nos encontramos las concentraciones más elevadas. Las concentraciones también son mayores en latitudes medias.

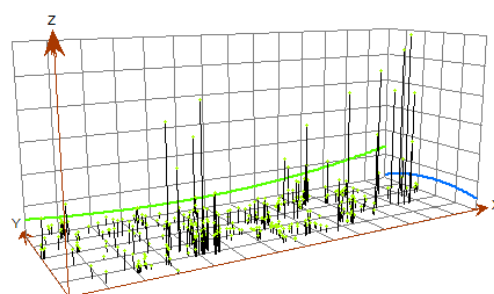


Gráfico de Probabilidad normal: La distribución está bastante alejada de la normal pero mediante una transformación logarítmica se consigue un mejor ajuste aunque no muy próximo a la normal.

Mapas de Voronoi: Se observan concentraciones locales elevadas en torno a los concejos de Cabrales, Onís y Cangas de Onís.

Semivariograma: La mayor variabilidad se da en la dirección NO/SE.

Interpolación

Tipo: Kriging ordinario con transformación logarítmica.

Modelo del semivariograma: Gaussiano.

Anisotropía: Sí.

Observaciones

-Los datos originales no siguen una distribución normal, por lo tanto se aplica una transformación logarítmica.

-Es necesario remover una tendencia de segundo orden.

-Se cumplen los NGR establecidos.

FICHA DE METAL PESADO

Nombre: Vanadio

Muestras: 334

Sumatorio: 27057,48

Mínimo: 2,25

Media: 81,010419

Máximo: 943

Desviación Estándar: 121,511886

Análisis Espacial Exploratorio de los datos

Histograma: Utilizando un histograma con transformación logarítmica se observa una distribución fuertemente leptocúrtica (kurtosis: 14,278), muy apuntada y unas colas más anchas de lo normal. Se observa una distribución asimétrica de los datos (coeficiente de sesgo: -1,6753).

Análisis de tendencia: Se observa una tendencia hacia el este donde nos encontramos las concentraciones mas elevadas. Las concentraciones también son mayores en latitudes medias.

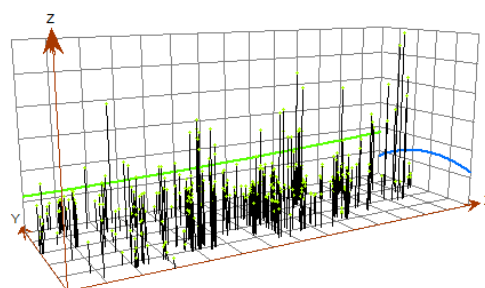


Gráfico de Probabilidad normal: La distribución está bastante alejada de la normal pero mediante una transformación logarítmica se consigue un buen ajuste.

Mapas de Voronoi: Las concentraciones son muy variables a lo largo del territorio. Destacando especialmente las elevadas concentraciones que se encuentran en el extremo oriental de la comunidad.

Semivariograma: La mayor variabilidad se da en la dirección NO/SE.

Interpolación

Tipo: Kriging ordinario con transformación logarítmica.

Modelo del semivariograma: Gaussiano.

Anisotropía: Sí.

Observaciones

-Los datos originales no siguen una distribución normal, por lo tanto se aplica una transformación logarítmica.

-Es necesario remover una tendencia de segundo orden.

-Se cumplen los niveles genéricos establecidos.

FICHA DE METAL PESADO

Nombre: Cobalto

Muestras: 334

Sumatorio: 3144,14

Mínimo: 0,2

Media: 9,413593

Máximo: 37,6

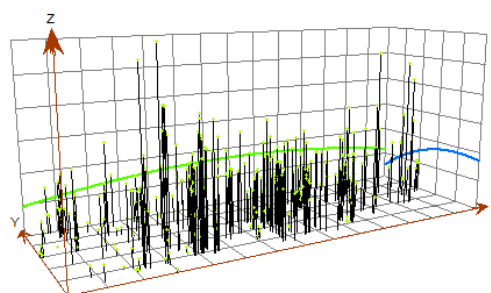
Desviación Estándar: 6,686702

Análisis Espacial Exploratorio de los datos

Histograma: Utilizando un histograma sin transformación se observa una distribución leptocúrtica (kurtosis: 4,486), algo apuntada y unas colas más anchas de lo normal. Se observa una distribución asimétrica de los datos (coeficiente de sesgo: 0,97109).

Análisis de tendencia: Se observa que las mayores concentraciones tienden a encontrarse en longitudes centrales y en las latitudes inferiores.

Gráfico de Probabilidad normal: La distribución está muy alejada de la normal tanto sin realizar ninguna transformación como realizando una transformación logarítmica. El mejor ajuste se da sin realizar ninguna transformación.



Mapas de Voronoi: Las concentraciones son muy heterogéneas a lo largo del territorio.

Semivariograma: La mayor variabilidad se da en la dirección NO/SE.

Interpolación

Tipo: Kriging ordinario sin transformación.

Modelo del semivariograma: Gaussiano.

Anisotropía: Sí.

Observaciones

-Los datos originales siguen una distribución bastante próxima a la normal, por lo tanto no se aplica ningún tipo de transformación.

-Es necesario remover una tendencia de segundo orden.

-Se cumplen los NGR establecidos.

FICHA DE METAL PESADO

Nombre: Níquel

Muestras: 334

Sumatorio: 5922,92

Mínimo: 0,29

Media: 17,733293

Máximo: 61,7

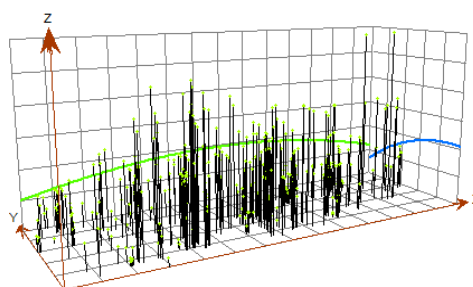
Desviación Estándar: 11,869439

Análisis Espacial Exploratorio de los datos

Histograma: Utilizando un histograma sin transformación se observa una distribución leptocúrtica (kurtosis: 3,3052), ligeramente apuntada y unas colas más anchas de lo normal. Se observa una distribución de los datos asimétrica (coeficiente de sesgo: 0,80654).

Análisis de tendencia: Se observa que las mayores concentraciones tienden a encontrarse en longitudes centrales y en las latitudes inferiores.

Gráfico de Probabilidad normal: La distribución está muy alejada de la normal tanto sin realizar ninguna transformación como realizando una transformación logarítmica. El mejor ajuste se da sin realizar ninguna transformación.



Mapas de Voronoi: Las concentraciones son muy heterogéneas a lo largo del territorio.

Semivariograma: La mayor variabilidad se da en la dirección NO/SE.

Interpolación

Tipo: Kriging ordinario sin transformación.

Modelo del semivariograma: Gaussiano.

Anisotropía: Sí.

Observaciones

-Los datos originales siguen una distribución bastante próxima a la normal, por lo tanto no se aplica ningún tipo de transformación.

-Es necesario remover una tendencia de segundo orden.

-Se cumplen los NGR establecidos.

FICHA DE METAL PESADO

Nombre: Cobre

Muestras: 334

Sumatorio: 6231,28

Mínimo: 0,27

Media: 18,656527

Máximo: 466

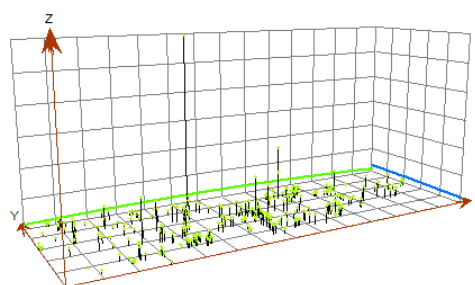
Desviación Estándar: 28,731761

Análisis Espacial Exploratorio de los datos

Histograma: Utilizando un histograma con transformación logarítmica se observa una distribución leptocúrtica (kurtosis: 6,1087), muy apuntada y unas colas más anchas de lo normal. Se observa una distribución de los datos bastante simétrica (coeficiente de sesgo: -0,57469).

Análisis de tendencia: Se observa una tendencia muy ligera: las mayores concentraciones se sitúan en las longitudes centrales.

Gráfico de Probabilidad normal: La distribución está bastante alejada de la normal pero mediante una transformación logarítmica se consigue un buen ajuste.



Mapas de Voronoi: Se observan concentraciones muy elevadas localmente en la zona del concejo de Soto del Barco (solo una muestra. Posible irregularidad en el muestreo).

Semivariograma: La mayor variabilidad se da en la dirección NE/SO.

Interpolación

Tipo: Kriging ordinario con transformación logarítmica.

Modelo del semivariograma: Gaussiano.

Anisotropía: Sí.

Observaciones

-Los datos originales no siguen una distribución normal, por lo tanto se aplica una transformación logarítmica.

-No es necesario remover ninguna tendencia.

-Se cumplen los NGR establecidos.

FICHA DE METAL PESADO

Nombre: Talio

Muestras: 334

Sumatorio: 57502,9

Mínimo: 11,3

Media: 172,164371

Máximo: 3836

Desviación Estándar: 225,80085

Análisis Espacial Exploratorio de los datos

Histograma: Utilizando un histograma con transformación logarítmica se observa una distribución leptocúrtica (kurtosis: 6,909), muy apuntada y unas colas más anchas de lo normal. Se observa una distribución de los datos muy simétrica (coeficiente de sesgo: 0,088567).

Análisis de tendencia: Se observa una ligera tendencia hacia el Este donde las concentraciones son más elevadas.

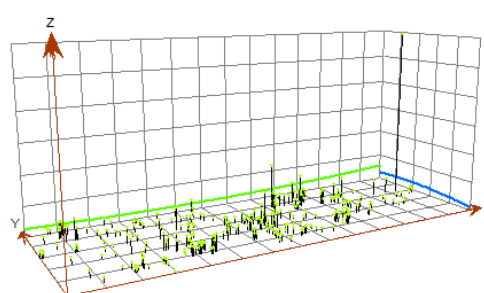


Gráfico de Probabilidad normal: La distribución está algo alejada de la normal pero mediante una transformación logarítmica se logra un buen ajuste.

Mapas de Voronoi: Las concentraciones son muy heterogéneas a lo largo del territorio.

Semivariograma: La mayor variabilidad se da en la dirección NE/SO.

Interpolación

Tipo: Kriging ordinario con transformación logarítmica.

Modelo del semivariograma: Gaussiano.

Anisotropía: Si.

Observaciones

-Los datos originales no siguen una distribución normal, por lo tanto se aplica una transformación logarítmica.

-Es necesario remover una tendencia de segundo orden.

-Se cumplen los NGR establecidos.

FICHA DE METAL PESADO

Nombre: Arsénico

Muestras: 334

Sumatorio: 6635,33

Mínimo: 0,6

Media: 19,866257

Máximo: 549

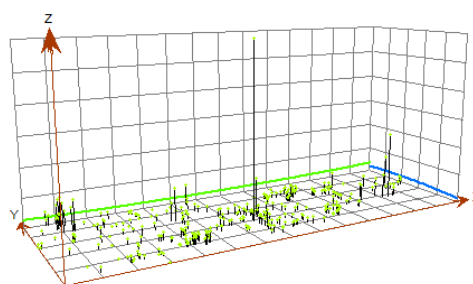
Desviación Estándar: 34,66846

Análisis Espacial Exploratorio de los datos

Histograma: Utilizando un histograma con transformación logarítmica se observa una distribución leptocúrtica (kurtosis: 5,9672), muy apuntada y unas colas más anchas de lo normal. Se observa una distribución de los datos bastante simétrica (coeficiente de sesgo: -0,24192).

Análisis de tendencia: Se observa una ligera tendencia: las mayores concentraciones se encuentran en las longitudes extremas.

Gráfico de Probabilidad normal: La distribución está alejada de la normal y no se consigue un ajuste correcto con una transformación logarítmica.



Mapas de Voronoi: Las concentraciones son bastante homogéneas a lo largo del territorio.

Semivariograma: La mayor variabilidad se da en la dirección NO/SE.

Interpolación

Tipo: Kriging ordinario con transformación logarítmica.

Modelo del semivariograma: Gaussiano.

Anisotropía: Si.

Observaciones

-Los datos originales no siguen una distribución normal, por lo tanto se aplica una transformación logarítmica.

-Es necesario remover una tendencia de segundo orden.

-No se cumplen los NGR establecidos.

FICHA DE METAL PESADO

Nombre: Molibdeno

Muestras: 334

Sumatorio: 172,72

Mínimo: 0,04

Media: 0,517126

Máximo: 8,7

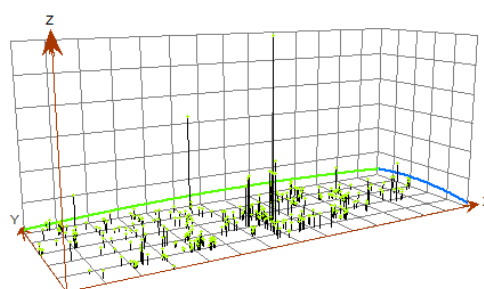
Desviación Estándar: 0,64486

Análisis Espacial Exploratorio de los datos

Histograma: Utilizando un histograma con transformación logarítmica se observa una distribución leptocúrtica (kurtosis: 6,1083), muy apuntada y unas colas más anchas de lo normal. Se observa una distribución de los datos algo asimétrica (coeficiente de sesgo: 0,85094).

Análisis de tendencia: Se observa una tendencia muy ligera: las mayores concentraciones se encuentran en las latitudes y longitudes medias.

Gráfico de Probabilidad normal: La distribución está bastante alejada de la normal pero mediante una transformación logarítmica se consigue un mejor ajuste.



Mapas de Voronoi: Se observan poblaciones con máximos locales en torno a los municipios de Mieres y Morcín.

Semivariograma: La mayor variabilidad se da en la dirección NE/SO.

Interpolación

Tipo: Kriging ordinario con transformación logarítmica.

Modelo del semivariograma: Gaussiano.

Anisotropía: Si.

Observaciones

-Los datos originales no siguen una distribución normal, por lo tanto se aplica una transformación logarítmica.

-Es necesario remover una tendencia de segundo orden.

-Se cumplen los NGR establecidos.

FICHA DE METAL PESADO

Nombre: Plata

Muestras: 334

Sumatorio: 39097,3

Mínimo: 15,9

Media: 117,057784

Máximo: 1066

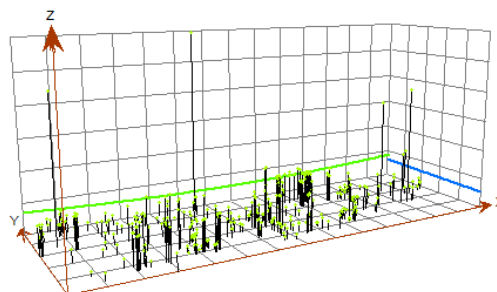
Desviación Estándar: 104,55454

Análisis Espacial Exploratorio de los datos

Histograma: Utilizando un histograma con transformación logarítmica se observa una distribución ligeramente platicúrtica (kurtosis: 2,7237), poco apuntada y unas colas un poco menos anchas de lo normal. Se observa que la distribución de los datos es bastante simétrica (coeficiente de sesgo: 0,2061).

Análisis de tendencia: Observamos una tendencia muy ligera hacia el este donde las concentraciones son un poco mayores.

Gráfico de Probabilidad normal: La distribución está algo alejada de la normal pero mediante una transformación logarítmica se logra un buen ajuste.



Mapas de Voronoi: Se observa que en la zona de Gijón, Villaviciosa, Sariego, Nava, Cabranes, Piloña y Colunga hay concentraciones localmente elevadas.

Semivariograma: La mayor variabilidad se da en la dirección NE/SO.

Interpolación

Tipo: Kriging ordinario con transformación logarítmica.

Modelo del semivariograma: Gaussiano.

Anisotropía: Si.

Observaciones

-Los datos originales no siguen una distribución normal, por lo tanto se aplica una transformación logarítmica.

-Es necesario remover una tendencia de segundo orden.

-Se cumplen los niveles genéricos de referencia.

FICHA DE METAL PESADO

Nombre: Cadmio

Muestras: 334

Sumatorio: 39097,3

Mínimo: 15,9

Media: 117,057784

Máximo: 1066

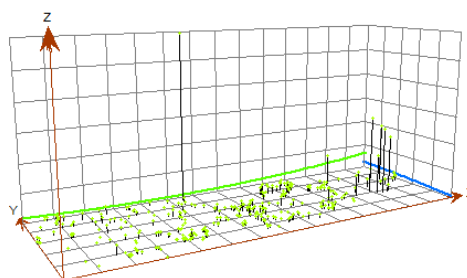
Desviación Estándar: 104,55454

Análisis Espacial Exploratorio de los datos

Histograma: Utilizando un histograma con transformación logarítmica se observa una distribución leptocúrtica (kurtosis: 8,648), muy apuntada y unas colas más anchas de lo normal. La distribución de los datos es asimétrica (coeficiente de sesgo: 1,5025).

Análisis de tendencia: Observamos una ligera tendencia hacia el este donde las concentraciones son algo mayores.

Gráfico de Probabilidad normal: La distribución está bastante alejada de la normal pero mediante una transformación logarítmica se consigue un buen ajuste.



Mapas de Voronoi: Las concentraciones son bastante homogéneas a lo largo del territorio pero en el extremo este se observan concentraciones ligeramente mayores.

Semivariograma: La mayor variabilidad se da en la dirección NE/SO.

Interpolación

Tipo: Kriging ordinario con transformación logarítmica.

Modelo del semivariograma: Gaussiano.

Anisotropía: Si.

Observaciones

-Los datos originales no siguen una distribución normal, por lo tanto se aplica una transformación logarítmica.

-Es necesario remover una tendencia de segundo orden.

-Se cumplen los niveles genéricos de referencia.

FICHA DE METAL PESADO

Nombre: Antimonio

Muestras: 334

Sumatorio: 40644,93

Mínimo: 2

Media: 121,691407

Máximo: 18629

Desviación Estándar: 1015,373365

Análisis Espacial Exploratorio de los datos

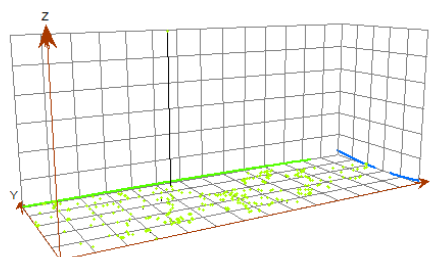
Histograma: Utilizando un histograma con transformación logarítmica se observa una distribución leptocúrtica (kurtosis: 6,5262), muy apuntada y unas colas más anchas de lo normal. La distribución de los datos es bastante simétrica (coeficiente de sesgo: -0.010658).

Análisis de tendencia: No se observan tendencias destacables.

Gráfico de Probabilidad normal: La distribución está muy alejada de la normal. El ajuste mejora en gran medida al aplicar una transformación logarítmica.

Mapas de Voronoi: Las concentraciones son muy variables a lo largo del territorio. Sin embargo, en el noreste de la comunidad nos encontramos concentraciones elevadas bastante generalizadas.

Semivariograma: La mayor variabilidad se da en la dirección NE/SO.



Interpolación

Tipo: Kriging ordinario con transformación logarítmica.

Modelo del semivariograma: Gaussiano.

Anisotropía: Si.

Observaciones

-Los datos originales no siguen una distribución normal, por lo tanto se aplica una transformación logarítmica.

-Es necesario remover una tendencia de segundo orden.

-Se cumplen los niveles genéricos de referencia

FICHA DE METAL PESADO

Nombre: Mercurio

Muestras: 334

Sumatorio: 40644,93

Mínimo: 2

Media: 121,691407

Máximo: 18629

Desviación Estándar: 1015,373365

Análisis Espacial Exploratorio de los datos

Histograma: Utilizando un histograma con transformación logarítmica se observa una distribución leptocúrtica (kurtosis: 14,562) muy apuntada y unas colas más anchas de lo normal. La distribución de los datos es marcadamente asimétrica (coeficiente de sesgo: 2,7732).

Análisis de tendencia: Observamos una tendencia muy ligera: las mayores concentraciones se dan en latitudes y longitudes medias.

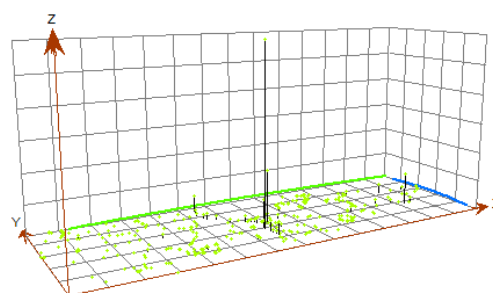


Gráfico de Probabilidad normal: No se obtiene un ajuste correcto sin transformación ni con una transformación logarítmica.

Mapas de Voronoi: Las mayores concentraciones aparecen localmente en la parte central de la comunidad.

Semivariograma: La mayor variabilidad se da en la dirección NO/SE.

Interpolación

Tipo: Kriging ordinario con transformación logarítmica.

Modelo del semivariograma: Gaussiano.

Anisotropía: Si.

Observaciones

-Los datos originales no siguen una distribución normal, por lo tanto se aplica una transformación logarítmica.

-No es necesario remover ninguna tendencia.

-Se superan los NGR establecidos.