

# Trabajo Fin de Máster

## *ELABORACIÓN DE MAPAS DE CONTENIDOS ISOTÓPICOS de O-18 EN LA PRECIPITACIÓN SOBRE LA PENÍNSULA IBÉRICA POR MEDIO DE TÉCNICAS GEOESTADÍSTICAS*

**Intensificación: ANÁLISIS DE SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS**

**Autor:**

*HANSELL SOTO CASTRO*

**Director:**

*DR. JOSÉ ESTEBAN CAPILLA ROMÁ*

**MARZO, 2017**



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería  
hidráulica y medio ambiente  
**mihma**

A:

*Mis padres Luis y Edita, por ser el pilar fundamental en todo lo que soy.*

*Mis hermanos, Din Lui, Koke Katherine, Kaluma Jamileth y Joule Phili, por estar conmigo y apoyarme siempre.*

*Para los que ya no están y mis amigos.*

*“Conocimiento no compartido es conocimiento perdido”*

*Anónimo*

## **Agradecimientos**

El desarrollo de este trabajo de fin de master ha sido posible gracias a la ayuda y apoyo de muchas personas.

En primer lugar quisiera expresar mi agradecimiento por la ayuda brindada de mi tutor José Capilla Romá por la guía, apoyo, paciencia, confianza y transmitirme conocimientos durante la realización del presente trabajo fin de master. Sin él no hubiera sido posible el desarrollo del TFM.

Agradecimiento al Área de Aplicaciones Isotópicas del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) por la disponibilidad de datos para la realización del presente TFM.

De igual manera agradecer al Gobierno del Perú, mi país, por la beca otorgada.

A mi familia, por su incondicional apoyo, y a mis compañeros con quienes tuve el honor de compartir la mejor experiencia en las aulas, creando buenos momentos y transmitiendo siempre la sensación de estar en familia.

## Resumen del Trabajo de Fin de Máster

Datos del proyecto
<b>Título del TFM en español:</b> ELABORACIÓN DE MAPAS DE CONTENIDOS ISOTÓPICOS de O-18 EN LA PRECIPITACIÓN SOBRE LA PENÍNSULA IBÉRICA POR MEDIO DE TÉCNICAS GEOESTADÍSTICAS
<b>Título del TFM en inglés:</b> ELABORATION OF ISOTOPIC CONTENT MAPS OF O-18 IN THE PRECIPITATION ON THE IBERIAN PENINSULA BY GEOSTATISTICAL TECHNIQUES
<b>Título del TFM en Valenciano:</b> ELABORACIÓ DE MAPES DE CONTINGUTS isotòpics d'O-18 A LA PRECIPITACIÓ SOBRE LA PENÍNSULA IBÈRICA PER MITJÀ DE TÈCNiques GEOESTADÍSTIQUES
<b>Alumno:</b> HANSELL SOTO CASTRO
<b>Director:</b> DR. JOSÉ ESTEBAN CAPILLA ROMÁ
<b>Codirector/es:</b> Haga clic aquí para escribir texto.
<b>Fecha de Lectura:</b> Marzo del 2017

Resumen
<b>En castellano (máximo 5000 caracteres)</b>
<p>La composición isotópica de las precipitaciones puede ser de una gran ayuda para el conocimiento y comprensión del funcionamiento de los sistemas hidrológicos, incluyendo las trayectorias del recurso hídrico, los orígenes de las recargas y la cantidad disponible de recurso de los acuíferos. Además, este conocimiento es necesario para abordar los problemas de movilización de contaminantes en los acuíferos. Pero en la actualidad, su uso es muy limitado, debido a la escasa disponibilidad de los datos. Por lo que es un reto ampliar las escasas mediciones de los isótopos estables en la precipitación a lugares circundantes, teniendo en cuenta variables geográficas como la latitud y altitud.</p> <p>Actualmente la Red Mundial de Isótopos en Precipitación - GNIP, brinda los datos isotópicos de <math>\delta^{18}\text{O}</math> en precipitación; pero a su vez existen agencias gubernamentales de cada país que se encargan de alimentar esa base de datos. En el caso de España la Red Española de Vigilancia de Isótopos en Precipitación - REVIP proporciona los datos isotópicos desde el año 2000. Los datos para elaborar el presente trabajo perteneciente a España se obtuvieron de la REVIP y los pertenecientes a Portugal y Gibraltar lo obtuvimos de la GNIP. Existen mapas de contenido isotópico elaborados con modelos de regresión entre el <math>\delta^{18}\text{O}</math> y los parámetros geográficos de latitud y altitud, que no reflejan las características locales de los eventos climatológicos, dando como resultados mapas con pequeños residuos en los nodos de la red. Actualmente</p>

se realizan estudios donde identificamos los parámetros climatológicos relevantes en la formación isotópica, para luego aplicar técnicas geoestadísticas con el fin de mejorar estos mapas.

En el presente trabajo realizaremos un mapeo del  $\delta^{18}\text{O}$  sobre la península Ibérica, aplicando la metodología geoestadística del Kriging, basadas en un adecuado procesamiento de los datos, consistente en una regresión hasta obtener una concentración normalizada de isótopos estables, independiente de la latitud y altitud. Luego realizaremos un análisis estructural de esta variable y un kriging ordinario que nos ha permitido mapear el  $\delta^{18}\text{O}$  en una cuadrícula de 5000X5000m. Los resultados muestran la dependencia del  $\delta^{18}\text{O}$  con la latitud y altitud, así como una buena adaptación de un modelo Imbricado conformado en buena parte por un gaussiano y un exponencial, representando adecuadamente la variable normalizada, proporcionando una reproducción exacta en los nodos.

Se muestran diferencias en el contenido isotópico entre la parte Oeste y Este de la península Ibérica, que pueden reflejar a eventos climatológicos característicos a cada área.

**En valenciano (máximo 5000 caracteres)**

La composició isotòpica de les precipitacions pot ser d'una gran ajuda per al coneixement i comprensió del funcionament dels sistemes hidrològics, incloent les trajectòries del recurs hídic, els orígens de les recàrregues i la quantitat disponible de recurs dels aqüífers. A més, aquest coneixement és necessari per abordar els problemes de mobilització de contaminants als aqüífers. Però en l'actualitat, el seu ús és molt limitat, a causa de l'escassa disponibilitat de les dades. Pel que és un repte ampliar les escasses mesures dels isòtops estables en la precipitació a llocs circumdants, tenint en compte variables geogràfiques com la latitud i altitud.

Actualment la Xarxa Mundial d'Isòtops en Precipitació - GNIP, brinda les dades isotòpiques de  $\delta^{18}\text{O}$  en precipitació; però al seu torn hi ha agències governamentals de cada país que s'encarreguen d'alimentar aquesta base de dades. En el cas d'Espanya la Xarxa Espanyola de Vigilància d'Isòtops en Precipitació - REVIP proporciona les dades isotòpiques des de l'any 2000. Les dades per elaborar el present treball pertanyent a Espanya es van obtenir de la REVIP i els pertanyents a Portugal i Gibraltar el vam obtenir de la GNIP. Hi ha mapes de contingut isotòpic

elaborats amb models de regressió entre el  $\delta^{18}\text{O}$  i els paràmetres geogràfics de latitud i altitud, que no reflecteixen les característiques locals dels esdeveniments climatològics, donant com a resultats mapes amb petits residus als nodes de la xarxa. Actualment es realitzen estudis on identifiquem els paràmetres climatològics rellevants en la formació isotòpica, per després aplicar tècniques geoestadístiques per tal de millorar aquests mapes.

En el present treball realitzarem un mapatge del  $\delta^{18}\text{O}$  sobre la península Ibèrica, aplicant la metodologia geoestadística del Kriging, basades en un adequat processament de les dades, consistent en una regressió fins obtenir una concentració normalitzada d'isòtops estables, independent de la latitud i altitud. Després realitzarem una anàlisi estructural d'aquesta variable i un kriging ordinari que ens ha permès mapejar el  $\delta^{18}\text{O}$  en una quadricula de 5000X5000m. Els resultats mostren la dependència del  $\delta^{18}\text{O}$  amb la latitud i altitud, així com una bona adaptació d'un model imbricat conformat en bona part per un gaussià i un exponencial, representant adequadament la variable normalitzada, proporcionant una reproducció exacta als nodes.

Es mostren diferències en el contingut isotòpic entre la part Oest i Est de la península Ibèrica, que poden reflectir esdeveniments climatològics característics a cada àrea.

**En inglés (máximo 5000 caracteres)**

The isotopic composition of rainfall can be a great help in understanding and understanding the functioning of hydrological systems, including water resource paths, recharge origins and the available quantity of aquifer resources. In addition, this knowledge is needed to address the problems of pollutant mobilization in aquifers. But at present, its use is very limited, due to the scarce availability of the data. It is therefore a challenge to extend the scarce measurements of stable isotopes in precipitation to surrounding sites, taking into account geographic variables such as latitude and altitude.

Currently, the World Network of Precipitating Isotopes - GNIP, provides  $\delta^{18}\text{O}$  isotopic data in precipitation; But in turn there are government agencies in each country that are responsible for feeding that database. In the case of Spain, the Spanish Isotope Surveillance Network in Precipitation - REVIP provides isotope data since 2000. The data for the present work from Spain were obtained from REVIP and those from

Portugal and Gibraltar were obtained from The GNIP. There are isotopic maps produced with regression models between the  $\delta^{18}\text{O}$  and the geographical parameters of latitude and altitude, which do not reflect the local characteristics of the climatological events, resulting in maps with small residues in the nodes of the network. Studies are currently carried out where we identify the relevant climatological parameters in the isotopic formation, and then apply geostatistical techniques in order to improve these maps.

In the present work we will perform a mapping of the  $\delta^{18}\text{O}$  on the Iberian peninsula, applying the geostatistical methodology of the Kriging, based on an adequate processing of the data, consisting of a regression until obtaining a normalized concentration of stable isotopes, independent of latitude and altitude. Then we will perform a structural analysis of this variable and an ordinary kriging that has allowed us to map the  $\delta^{18}\text{O}$  in a grid of 5000X5000m. The results show the dependence of the  $\delta^{18}\text{O}$  with the latitude and altitude, as well as a good adaptation of an Imbricated model conformed in good part by a gaussian and an exponential, representing adequately the normalized variable, providing an exact reproduction in the nodes.

There are differences in the isotopic content between the western and eastern part of the Iberian peninsula, which may reflect climatic events characteristic of each area.

**Palabras clave español (máximo 5):** Isótopos ambientales, geoestadística, Kriging

**Palabras clave valenciano (máximo 5):** Isòtops ambientals, geoestadística, Kriging

**Palabras clave inglés (máximo 5):** environmental Isotopes, geostatistics, kriging

**Fecha:** Marzo del 2017

**Fdo. (Alumno)**

**Índice**

<b>I.</b>	<b>INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS</b>	<b>1</b>
1.1.	Introducción	1
1.2.	Objetivos	2
1.3.	Organización del Documento	3
<b>II.</b>	<b>ESTADO DEL ARTE</b>	<b>4</b>
2.1.	Generalidades	4
2.1.1.	Isotopos Estables	4
2.1.2.	Cuantificación	5
2.1.3.	Fraccionamiento Isotópico	7
2.1.4.	Isotopos en el Ciclo Hidrológico	9
2.1.5.	Aplicaciones	11
2.2.	Antecedentes	16
2.2.1.	Conclusiones : Síntesis de los Antecedentes	21
<b>III.</b>	<b>DATOS</b>	<b>23</b>
3.1.	Datos Isotópicos	23
3.1.1.	GNIP	23
3.1.2.	REVIP	25
3.1.3.	Metodología de Muestreo y Análisis	27
3.2.	Variables geográficas	28
<b>IV.</b>	<b>METODOLOGÍA</b>	<b>31</b>
4.1.	Dominio Espacial Y Temporal	33
4.1.1.	Domino Espacial: Península Ibérica	33
4.1.2.	Series Temporales de Datos	34
4.2.	Tratamientos de Datos	37
4.2.1.	Estadísticos Descriptivos	37
4.2.2.	Ponderación	39
4.2.3.	Regresión Lineal	40
4.2.4.	Contraste de Hipótesis	47
4.2.5.	Análisis Espacial	47
4.2.6.	Estimación	53
4.2.7.	La estimación Geoestadística: EL KRIGING	55
4.2.8.	SGeMS - Stanford Geostatistical Modeling Software	59



V.	RESULTADOS	62
5.1.	Representaciones Gráficas de las Estaciones	62
5.2.	Ponderación de Datos Isotópicos	63
5.3.	Desviación Estándar de los Datos	65
5.4.	Isótopos Estables Ponderados	66
5.5.	Relación entre $\delta^{18}O$ y los Variables Geográficas	67
5.5.1.	$\delta^{18}O$ Vs Altitud	67
5.5.2.	$\delta^{18}O$ Vs Latitud	68
5.5.3.	$\delta^{18}O$ Vs Distancia al Mar	68
5.6.	Ecuaciones de Regresión Lineal	69
5.6.1.	Regresión Lineal con las Variables geográficas	69
5.7.	Variograma	74
5.7.1.	Variograma Experimental	74
5.7.2.	Variograma Teórico	75
5.8.	Estimación: KRIGING	77
5.8.1.	Parámetros del Kriging	78
5.8.2.	Valores Estimados	80
5.9.	Determinación del Valor $\delta^{18}O$	81
5.10.	Otras Actividades	83
5.10.1.	Análisis con Estaciones Adicionales	83
5.10.2.	Análisis sin peso de la desviación estándar	90
5.11.	Comparación de Planos	98
VI.	CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN	104
6.1.	Conclusiones	104
6.2.	Líneas Futuras De Investigación	106
VII.	BIBLIOGRAFÍA	107
VIII.	ANEXOS	112
8.1.	Gráficas de las estaciones en la península Ibérica	112
8.2.	Gráficas de las estaciones fuera de la península Ibérica	135

### Índice de tablas

Tabla 1 Estaciones de mediciones .....	35
Tabla 2 Periodo de la tomas de datos de las estaciones .....	36
Tabla 3 Forma de ponderar los datos isotópicos .....	40
Tabla 4 Medias de isotopos estables y de precipitación de cada estación de la península Ibérica. ....	63
Tabla 5 Datos anuales ponderados de las estaciones .....	64
Tabla 6 Desviación estándar y pesos asignados a cada estación .....	65
Tabla 7 Clasificación según la ubicación de las estaciones .....	66
Tabla 8 Estaciones ubicadas cerca al mar.....	70
Tabla 9 Valores del $\delta^{18}\text{O}^*$ para todas las estaciones .....	72
Tabla 10 Resultados de la Variable Estandarizada $\delta^{18}\text{O}^{**}$ .....	73
Tabla 11 Ubicación de las estaciones adicionales .....	83
Tabla 12 Periodo de datos de las estaciones adicionales .....	83
Tabla 13 Medias de isotopos estables y de precipitación de cada estación Adicional .....	84
Tabla 14 Datos anuales ponderados de las estaciones .....	84
Tabla 15 Desviación estándar y pesos asignados a cada estación .....	84
Tabla 16 Valores isotópicos de cada estación. ....	85
Tabla 17 valores de la variable estandarizada $\delta^{18}\text{O}^{**}$ .....	92
Tabla 18 Resumen de los mapas obtenidos .....	103

### Índice de figuras

Figura 1: Variación de la composición isotópica de las masas de nubes por efecto del fraccionamiento. Fuente: (Montoya, 2016) .....	9
Figura 2: Red Mundial de Isótopos en Precipitación (GNIP). Operada: IAEA-WMM (Fuente: <a href="http://www.iaea.org">www.iaea.org</a> ) (Global Network of Isotopes in Precipitation (GNIP). IAEA-WMM. Source: <a href="http://www.iaea.org">www.iaea.org</a> ).....	24
Figura 3: Situación de las 16 estaciones de la Red Española de Vigilancia de Isótopos en Precipitación (REVIP) y de las principales demarcaciones hidrográficas españolas. FUENTE: (Díaz Teijeiro, y otros, 2009). ....	26
Figura 4. Localización de las estaciones GNIP y REVIP. ....	28
Figura 5 Mapa de altitud de la Península Ibérica.....	29
Figura 6 Mapa de latitud de la Península Ibérica.....	30
Figura 7 Metodología empleada en nuestro estudio.....	33
Figura 8 Imagen satelital de nuestra área de estudio.....	34
Figura 9 diagrama de dispersión y línea de las medias hipotéticas .....	42
Figura 10 valores de "r" y sus implicaciones.....	45
Figura 11: Representación gráfica del R2, en función a la dispersión de los datos.....	46
Figura 12 Rango de búsqueda para los pares de puntos del variograma. ....	48
Figura 13 Partes de un variograma.....	49
Figura 14 Modelos de Variogramas.....	51

*ELABORACIÓN DE MAPAS DE CONTENIDOS ISOTÓPICOS de O-18 EN LA PRECIPITACIÓN SOBRE LA  
PENÍNSULA IBÉRICA POR MEDIO DE TÉCNICAS GEOESTADÍSTICAS*

Figura 15 Vista del SeGMS.....	61
Figura 16 Parámetros de búsqueda para el variograma.....	74
Figura 17 variograma de los $\delta^{18}\text{O}^{**}$ .....	75
Figura 18 Modelo Esférico.....	76
Figura 19 Modelo Exponencial.....	76
Figura 20 Modelo Gaussiano.....	76
Figura 21 Variograma Imbricado entre un Gaussiano y Exponencial .....	77
Figura 22 Parámetros de búsqueda para la interpolación del Kriging.....	78
Figura 23 Variograma Imbricado seleccionado para la estimación .....	79
Figura 24 Área de estimación en el Kriging .....	80
Figura 25 Valores Estimados del $\delta^{18}\text{O}^{**}$ .....	81
Figura 26 Procedimiento para obtener $\delta^{18}\text{O}^{**}$ .....	82
Figura 27 Valor del $\delta^{18}\text{O}$ .....	82
Figura 28 Procedimiento para obtener $\delta^{18}\text{O}^{**}$ .....	85
Figura 29 Parámetros del Variograma.....	86
Figura 30 Variograma con todas las estaciones.....	86
Figura 31 Modelo Gaussiano.....	87
Figura 32 Modelo Esférico.....	87
Figura 33 Modelo Exponencial.....	88
Figura 34 Modelo Imbricado (Gaussiano + Esférico) .....	88
Figura 35 Parámetros de búsqueda del Kriging.....	89
Figura 36 Valores estimados del $\delta^{18}\text{O}^{**}$ .....	89
Figura 37 Valor del $\delta^{18}\text{O}$ .....	90
Figura 38 procedimiento empleado sin brindar el peso a las estaciones .....	91
Figura 39 Procedimiento para obtener $\delta^{18}\text{O}^{**}$ .....	91
Figura 40 Parámetros del Variograma.....	93
Figura 41 Variograma con todas las estaciones.....	93
Figura 42 Modelo Gaussiano.....	94
Figura 43 Modelo Esférico.....	94
Figura 44 Modelo Exponencial.....	95
Figura 45 Modelo Imbricado (Gaussiano + Exponencial).....	95
Figura 46 Parámetros de búsqueda del Kriging.....	96
Figura 47 Valores estimados del $\delta^{18}\text{O}^{**}$ .....	96
<b>Figura 48 Valor del <math>\delta^{18}\text{O}</math></b> .....	97
Figura 49 Valores comparados del $\delta^{18}\text{O}^{**}$ .....	99
Figura 50 Valores comparados del $\delta^{18}\text{O}$ .....	100
Figura 51 Valores comparados del $\delta^{18}\text{O}$ .....	101
Figura 52 Valores comparados del $\delta^{18}\text{O}$ .....	102

**Índice de Gráficas**

Gráfica 1 $\delta^{18}\text{O}$ ponderado Vs Altitud .....	67
Gráfica 2 $\delta^{18}\text{O}$ ponderado Vs Latitud.....	68
Gráfica 3 $\delta^{18}\text{O}$ ponderado Vs Distancia al mar .....	68
Gráfica 4 Relación del $\delta^{18}\text{O}$ Vs Lat. Cerca al mar .....	70
Gráfica 5 Relación del $\delta^{18}\text{O}^*$ Vs Altitud .....	72

## **I. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS**

### **1.1. Introducción**

La planificación y gestión eficiente de los recursos hídricos requiere un adecuado conocimiento y comprensión del funcionamiento de los sistemas hidrológicos, incluyendo las trayectorias del recurso en los sistemas, los orígenes de las recargas y la cantidad disponible de recurso de los acuíferos. Además, este conocimiento es necesario para abordar los problemas de movilización de contaminantes en los acuíferos.

Durante muchos años el entendimiento de estos procesos y fenómenos hidrológicos que ocurren en los sistemas hidrológicos ha sido muy difícil de lograr, debido a la complejidad de los factores que intervienen en los sistemas hidrológicos. Eso provoca una elevada incertidumbre al momento de gestionar adecuadamente el recurso, ya sea para atender las demandas o asegurar una oferta permanente de agua. Por ello es necesario el aprovechamiento de todos los campos del conocimiento científico relacionados al recurso hídrico con el fin de cumplir con una adecuada gestión.

La composición isotópica de las precipitaciones puede ser de una gran ayuda a la hora de identificar las entradas de las recargas así como el recorrido del agua en el sistema. Los isótopos estables pueden ser utilizados como trazadores naturales debido a que todas las aguas existentes sobre la corteza terrestre llevan consigo este tipo de isótopos en mayor o menor medida y de distintos tipos. Estos se encuentran disueltos o formando parte de su propia molécula (caso del tritio). Se trata de trazadores ideales en las diferentes etapas del ciclo hidrológico, ya que a efectos de las técnicas de modelación en hidrología posee un comportamiento idéntico al del agua. Ocurre con el deuterio y los isótopos O-18, ya que forman parte de la molécula del agua y no se ven afectadas por acciones antropomórficas. Se obtiene así información importante como la relación existente de las aguas en sus diferentes medios que difícilmente se puede obtener mediante otros métodos.

Frente a esto es necesario un adecuado análisis estructural de los datos con el fin de determinar las variaciones en espacio y tiempo de las estaciones. Dichas variaciones no son más que el producto del fraccionamiento isotópico ocasionado por variables

geográficas que influyen en el contenido isotópico de la precipitación, así como de los fenómenos climatológicos más frecuentes en las distintas zonas climáticas de la península, las mismas que se pretenden captar. El contenido isotópico de las precipitaciones depende de diversos factores siendo uno muy importante el origen del vapor de agua que constituye las nubes.

## **1.2. Objetivos**

El objetivo principal del presente trabajo es realizar un mapeo del  $\delta^{18}\text{O}$  en la precipitación sobre la Península Ibérica, aplicando metodologías geoestadísticas. Para ello, se cumplirán con los siguientes objetivos específicos:

- Realizar un adecuado análisis estructural de los datos sobre la Península Ibérica.
- Identificar las variables geográficas más influyentes en la composición isotópica de la precipitación.
- Determinar la variación de los datos isotópicos en cada una de las estaciones a lo largo del periodo temporal.

Por lo que será necesario el cumplimiento de las siguientes metas:

- La implementación de un Modelo Digital del Terreno de la Península Ibérica.

Para ello se ha optado por descargar los datos del Servicio Geológico de los Estados Unidos – USGS, de la cual obtendremos las variables geográficas que emplearemos en nuestro análisis de la composición isotópica de la precipitación.

- Obtención de los datos de contenido isotópico de la precipitación en la Península Ibérica.

Estos se obtendrán de la Red Española de Vigilancia de Isótopos en Precipitación – REVIP correspondiente al dominio espacial de España Peninsular, y de la Red Mundial de Isótopos en Precipitación – GNIP para completar la parte de la península ibérica correspondientes a Portugal y Gibraltar.

### **1.3. Organización del Documento**

El presente trabajo de fin de master sigue la siguiente organización:

- Capítulo 1**    **Introducción y Objetivos:** Contempla la Introducción, descripción de los objetivos del presente trabajo y organización del documento.
- Capítulo 2**    **Estado del Arte:** Breve recapitulación sobre los conceptos isotópicos empleados, la intervención isotópica en el ciclo hidrológico y las aplicaciones en diferentes campos científicos. Así como, de los antecedentes hechos referente a este trabajo.
- Capítulo 3**    **Datos:** Presentación de los datos empleados en el presente trabajo.
- Capítulo 4**    **Metodología:** Explicación de la metodología y conocimientos empleados en el desarrollo de este trabajo. Así mismo una breve descripción de SGeMS.
- Capítulo 5**    **Resultados:** Procesamiento y análisis de los resultados obtenidos en cada etapa del trabajo, desde el tratamiento de datos hasta la elaboración de los mapas. Se muestran gráficas, cuadros resumen y mapas de contenido isotópico.
- Capítulo 6**    **Conclusiones:** Conclusiones finales del trabajo y Líneas Futuras De Investigación referentes a este TFM.
- Capítulo 7**    **Bibliografía:** Se menciona las referencias bibliográficas empleadas en la elaboración del presente Trabajo de Fin de Master.
- Capítulo 8**    **Anexos:** Se muestran las gráficas de tendencia temporal de las estaciones en estudiadas.

## II. ESTADO DEL ARTE

### 2.1. Generalidades

#### 2.1.1. Isotopos Estables

En 1912, Thomson luego de un experimento en donde deseaba comprobar el valor del peso atómico del neón (20,182), obtuvo el valor de 20 en un 90.5%, 21 en 0.3% y 22 en un 9.2 %, encontrando así tres clases de neón con sus valores de masa casi exactamente números enteros, siendo el peso atómico justamente el promedio de esta mezcla. (Redondo, 2008); posterior a ese descubrimiento en 1913 el químico británico Frederick Soddy uso un neologismo utilizando las palabras griegas isotopo *Isos* = igual y *Topos* = lugar, que significa “*mismo lugar*” (Redondo, 2008) para describir a átomos del mismo elemento químico que presentan el mismo número de protones y electrones pero con diferente número de neutrones, siendo variables de un mismo elemento químico que ocupan el mismo lugar en la tabla periódica de los elementos químicos.

Hoy en día se sabe que casi todos los elementos se componen de una mezcla de varios isótopos. Mientras que en ciertos casos (por ejemplo el oro y el yodo) un isótopo supone el 100% de la sustancia, en muchos otros (como el cloro y el cinc) los diferentes isótopos se encuentran en proporciones comparables (Redondo, 2008). Los científicos sospechan la existencia de aproximadamente 120 elementos acompañados de 3100 formas isotópicas, entre los cuales sólo 283 son isótopos estables (Fry, 1991). Entre de los cuales existen elementos que pueden ser muy peligroso para la salud humana, ya que los isotopos radiactivos se desintegran espontáneamente (Unkovich, y otros, 2001), y que del mismo modo existen elementos que no presentan una actividad radiactiva apreciable (emisión de radiación ionizante) ya que el isótopo en cuestión tiene un tiempo de desintegración extremadamente elevado, recibiendo el nombre de isotopos estables (por ejemplo, el uranio-238, empleado en la datación de materiales geológicos, posee un período de semidesintegración de 4468 millones de años) (Redondo, 2008).

Los elementos químicos como el hidrogeno, carbono, nitrógeno, oxígeno y azufre son muy abundantes en la corteza terrestre e intervienen en los numerosos procesos naturales, por lo que la utilización de estos isotopos ambientales, viene siendo impulsado desde hace más de 50 años por la Agencia Internacional de Energía Atómica (AIEA) con sede en viene, en cooperación con diferencias entidades relacionadas al tema de diferentes partes del mundo que incentivan a desarrollar investigación empleando métodos complementarios para el estudio de las aguas subterráneas y superficiales. Utilizándose principalmente los isotopos ambientales estables como el Oxigeno 18, deuterio, carbono 13, azufre 34 y nitrógeno 15; e isotopos radiactivos como el tritio y el carbono 14 (Herráez, 2008).

Al constituir la molécula de agua se puede llegar a conocer mediante sus variaciones: las condiciones ambientales en que se infiltró el agua en el acuífero, llegando a diferenciar aguas de distintos orígenes (altitud, época climatológica, estación del año, condiciones de evaporación, mezcla); las posibles fuentes de alimentación que recargan el acuífero (aguas de precipitación directa sobre la cuenta, infiltración de las aguas superficiales o procedencia de diferentes altitudes o cuentas limítrofes); el origen de las variaciones en la calidad química de las aguas; el movimiento y ritmo de renovación de las aguas subterráneas, con ayuda de isotopos radiactivos como el carbono-14 (Herráez, 2008).

Estudiaremos al isotopo ambiental estable del oxígeno-18, por presentar características que facilitan al estudio hidrológico, ya que no se ve afectada por actividades antropomórficas y actuar como un trazador natural.

### **2.1.2. Cuantificación**

Los isótopos estables se miden a través de la espectrometría de masas y por espectroscopía de absorción láser para los isótopos estables, y por medio de conteo por centelleo líquido después de un enriquecimiento electrolítico para las mediciones de tritio (IAEA, 2014). Un espectrómetro es un instrumento que se encarga de separar átomos o moléculas con carga según sus masas en presencia de un campo magnético



fuerte, debido a que los enlaces formados con el isótopo ligero son más débiles y más fáciles de romper que los que se forman con el isótopo pesado, las moléculas que contienen isótopos ligeros se extraen en procesos rápidos como la evaporación, mientras que las moléculas que contienen isótopos pesados lo hacen a través de procesos más lentos (Unkovich, y otros, 2001).

Existen diferentes maneras de expresar la composición isotópica de una muestra, las cuales suelen responder al área de trabajo en los que se emplean, ya sea por su facilidad de manejo o meramente por costumbre (Redondo, 2008).

En el caso de trabajar a escala de abundancias isotópicas naturales, es bastante laborioso tener que manejar porcentajes con cuatro cifras decimales, que es precisamente en donde se encuentran las variaciones naturales de los isótopos ligeros (y, por supuesto, la precisión analítica requerida para poder detectarlas) (Redondo, 2008).

Junto a las moléculas de  $H^{16}O$  existen en el agua otras moléculas, como las del tipo  $^2HH^{16}O$  y  $H_2^{18}O$ , cuyas concentraciones medias de esa composición molecular varía de unas aguas a otras. Craig en 1961, estableció un agua patrón denominado SMOW ("Standard Mean Ocean Water") con el fin de unificar las formas de expresión de las concentraciones de oxígeno-18 y deuterio, y debido a su pequeña concentración respecto al patrón de medida, haciendo posible la comparación de los resultados. (Herráez, 2008). A este patrón se le asigna el valor cero para las concentraciones de oxígeno y deuterio.

Actualmente este patrón está agotado y la Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA) ha creado otro patrón de similar procedencia que se denomina VSMOW y que se envía a todos los laboratorios de la red mundial. Este nuevo patrón denominado  $\delta$ , posee la ventaja de incorporar en su formulación la composición isotópica de la referencia, esto es bueno ya que los espectrómetros isotópicos miden con mayor precisión las relaciones isotópicas mediante comparación que estrictamente en términos absolutos (Redondo, 2008); las concentraciones isotópicas en relación a los patrones del SMOW y VSMOW, se expresan como desviaciones (positivas o negativas), expresadas en tanto por mil, como se detalla:

$$\delta(\text{‰}) = \frac{(R_{\text{muestra}} - R_{\text{patrón}})}{R_{\text{patrón}}} * 1000$$

Siendo  $R = {}^2\text{H}/\text{H}$  o  ${}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O}$  para la muestra y para el patrón. Por lo que los valores positivos de  $\delta$  indican un enriquecimiento en oxígeno-18 y deuterio, comparado con el patrón. La reproductibilidad de las medidas es de 0.1 ‰ para el  $\delta^{18}\text{O}$  y 1‰ para  $\delta^2\text{H}$ . (Herráez, 2008). La incertidumbre para los análisis realizados en los Laboratorio de Aplicaciones Isotópicas (LAI) del Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas del CEDEX, es de  $\pm 0,2\text{‰}$  para  $\delta^{18}\text{O}$  y de  $\pm 1,5\text{‰}$  para  $\delta^2\text{H}$  (Díaz Teijeiro, y otros, 2009)

En el medio natural, las variaciones para estos isotopos oscilan para el  $\delta^{18}\text{O}$  entre  $\pm 40\text{‰}$  y para el  $\delta^2\text{H}$  entre  $\pm 400\text{‰}$ . Por los que los hielos polares de la Antártida alcanzan los valores más negativos del orden de  $-450\text{‰}$  para  $\delta^2\text{H}$  y  $-55\text{‰}$  para el  $\delta^{18}\text{O}$ , los valores con las desviaciones más altos se registraron en las sebkhas saharianas llegaron a  $+150\text{‰}$  para  $\delta^2\text{H}$  y  $+30\text{‰}$  para el  $\delta^{18}\text{O}$  (Fritz, y otros, 1980). Pero en muchos lugares donde el clima es muy variado, los isotopos ambientales estables presentan un comportamiento bimodal con valores de desviación más negativos para los periodos húmedos y valores menos negativos que coinciden con los periodos secos. (María V., y otros, 2008).

### 2.1.3. Fraccionamiento Isotópico

El descubrimiento del deuterio por parte de Harold Urey en 1931 (lo que le supuso el Premio Nobel en 1934), y la observación de que la abundancia del mismo varía de unos ambientes geológicos a otros, dio origen al reconocimiento del denominado “fraccionamiento isotópico” (Urey, 1947). El fraccionamiento isotópico del agua se produce debido a los cambios de estado que experimenta el agua en sus diferentes estados a lo largo del ciclo hidrológico, ya que es un proceso físico-químico complejo que se debe a la fuerza de enlace de los isótopos implicados en la molécula del agua y a sus presiones de vapor, siendo mayor el enlace de los isótopos pesados (Oxígeno-18 y deuterio) por lo que quedan más retardados (Herráez, 2008).

La extensión en que se distribuyen los isótopos estables entre dos fases (o especies) coexistentes A y B viene determinada por el "factor de fraccionamiento"  $\alpha$ :  $\alpha = R_A/R_B$ , donde  $R_A$  y  $R_B$  son los ratios isotópicos en ambas especies. Los factores de fraccionamiento están comprendidos generalmente entre 1,0000 y 1,0040 (Redondo, 2008).

El proceso se realiza de acuerdo al mecanismo de destilación en condiciones de equilibrio definidos por Rayleigh según la ecuación (Herráez, 2008):

$$\delta - \delta_0 = \varepsilon \ln f = (\alpha - 1) \ln f$$

Siendo:

$\delta$	=	Composición final
$\delta_0$	=	Composición inicial
$\varepsilon$	=	Factor de fraccionamiento
$f$	=	Fracción de vapor restante
$\alpha$	=	Coficiente de fraccionamiento

La diferencia de presión de vapor, es la causa más importante del fraccionamiento entre las moléculas del agua  $^{18}\text{O}$  y  $^2\text{H}$  y las moléculas de  $\text{H}_2^{16}\text{O}$ . El fraccionamiento isotópico depende estrechamente de la temperatura, de la humedad atmosférica y de la velocidad de evaporación. Si la evaporación se produce lentamente se puede decir que hay equilibrio, pero si se produce rápidamente se dice que no hay equilibrio. En la naturaleza la evaporación se produce con mucha frecuencia en condiciones de no equilibrio; sin embargo el proceso de condensación se produce en general lentamente y en condiciones de equilibrio (Herráez, 2008).

Existen otros factores que influyen en el fraccionamiento isotópico, como la: Latitud, a medida que nos alejamos del ecuador (aumenta la latitud), se producen valores isotópicos más negativos; El Efecto Continental, a medida que la masa de nubes ingresa al continente y se produce la lluvia, las moléculas más pesadas, serán las primeras en formar parte de la condensación, por lo tanto las lluvias que se producen tendrán valores isotópicos más empobrecidos; Altitud, este factor es muy

determinante al momento de saber la elevación a la que se produce la recargas de los acuíferos, ya que a medida que aumenta la altitud y se producen precipitaciones, los valores isotópicos que presentan las precipitaciones van disminuyendo; El Efecto Estacional, este factor es muy influyente en regímenes con climas templados, ya que la lluvia presenta valores isotópicos más negativos durante el invierno; y Intensidad de la Lluvia, los valores isotópicos que se presentan en las precipitaciones intensas son negativos que las que se presentan en las precipitaciones normales. (aguaysig, 2010)

## 2.1.4. Isotopos en el Ciclo Hidrológico

### 2.1.4.1. Precipitaciones

Los isotopos estables que se encuentran contenidos dentro de las precipitaciones, dependen de la evolución del agua a lo largo del ciclo hidrológico, desde su evaporación en los océanos; existen cuatro factores que combinados influyen en la cantidad isotópica de las precipitaciones, como son: la distancia al océano, temperatura, intercambio isotópico con el vapor atmosférico durante la precipitación y evaporación (Herráez, 2008)

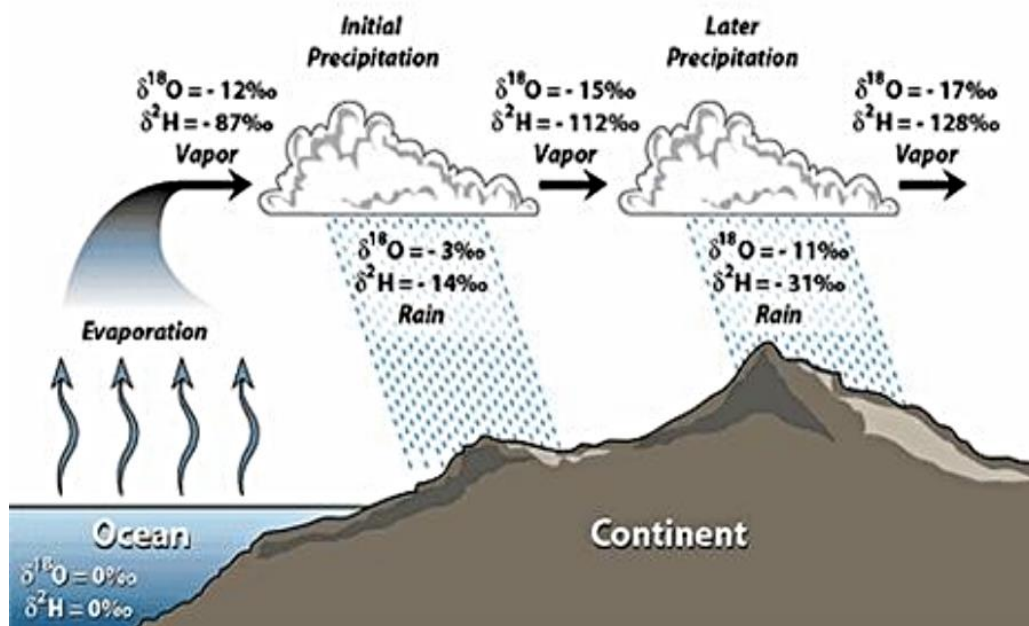


Figura 1: Variación de la composición isotópica de las masas de nubes por efecto del fraccionamiento. Fuente: (Montoya, 2016)

La composición media anual de las precipitaciones, suele ser aproximadamente constante, ya que los factores que producen el fraccionamiento actúan de la misma forma año tras año; como la distancia al océano, ya que los vapores producidos presentan concentraciones ligeramente negativas, dependiendo de la composición de la superficie donde se genera, y conforme va penetrando hacia el continente, las concentraciones van disminuyendo haciéndose más ligeras, debido a que la preferencia en condensación la tiene las moléculas más pesadas, con lo que las precipitaciones se van haciendo isotópicamente más negativas hacia el interior de los continentes “efecto de la Continentalidad” (Ericsson, 1981).

La temperatura es un factor que influye en la composición inicial de las precipitaciones. En general el valor producido a bajas temperaturas es isotópicamente más ligero (valores de  $\delta$  más negativos) que obtenidos a alta temperatura (Herráez, 2008). La dependencia con la temperatura produce también variaciones isotópicas debidas a: la altitud y latitud (variaciones espaciales), y variaciones climatológicas (estacionales y temporales, paleoclimáticas).

Al aumentar la altitud se producen empobrecimiento de los isotopos pesados, debido a que la altitud depende del clima local y de la topografía. Los gradientes de  $\delta^{18}\text{O}$ , varían entre -0.15 y -0.5 ‰ / 100 m de elevación, puede llegar a -0.6‰/100 m en las zonas polares (Payne, y otros, 1981). Durante las variaciones estacionales las precipitaciones de invierno contienen concentraciones isotópicas más pobres en comparación con las de verano (Fritz, y otros, 1980).

Durante la precipitación se presenta el intercambio isotópico con el vapor atmosférico que es conocido como el “efecto de cantidad”, durante las precipitaciones la acción del vapor existentes en las capas atmosféricas produce una concentración en Oxígeno-18 y deuterio diferente buscando una situación de equilibrio, dependiendo del tamaño de la gota, la intensidad de las lluvias, duración y temperatura. (Dansgaard, 1981), haciendo que las precipitaciones más intensas y de mayor duración presenten aguas más ligeras en comparación con las de corta duración, existen pues variaciones no solo debido a temperatura sino también a la cantidad de precipitación y al origen del aire húmedo (Herráez, 2008).

Las aguas en donde se produce la evaporación presentan una gran cantidad de isótopos con valores muy pesados, donde aumentan con la velocidad de evaporación y estando controlado por la temperatura y la humedad atmosférica (Dansgaard, 1981). Este efecto es importante en las regiones áridas a causa de baja saturación de la atmósfera. El incremento de concentración es despreciable en climas templados y húmedos y en especial en las regiones polares (Herráez, 2008).

### **2.1.5. Aplicaciones**

Como se dijo antes, los isótopos estables se emplean como trazadores naturales que nos permiten seguir el recorrido de los elementos H, O, S, N, C, en el medio ambiente y seres que lo habitan. Podemos concluir que existe sustento científico para poder aprovechar el estudio de los isótopos ambientales estables no solo en temas hidrológicos si no en una diversidad de campos, donde otros métodos científicos no podrían despejar dudas sobre el origen, comportamiento y evolución de diferentes seres vivos o fenómenos ambientales que se podrían producir, como explicaremos a continuación.

- El estudio de los isótopos ambientales estables se puede emplear para identificar el hielo depositado durante los períodos glaciales, encontrando la correlación entre temperatura y composición isotópica, debido a que tiene una concentración muy reducida de isótopos pesados en relación con la precipitación de épocas más recientes. De hecho, esto ha sido observado en todas las perforaciones profundas realizadas en los casquetes de hielo hasta la fecha. (Rozanski, y otros, 1990).
- El estudio y la reconstrucción de la abundancia histórica de los gases atmosféricos, permitirá entender las implicaciones climáticas del reciente aumento de estos gases por las actividades antropomórficas, gases que en composición poseen isótopos ambientales estables como el CO<sub>2</sub> atmosférico, de donde se sabe que cuya concentración no ha sido constante a través del tiempo y que ha incrementado un 12% en los últimos 35 años; o como el metano, que también puede ser reconstruido por medidas de aire atrapado en el hielo (Guerrero, y otros, 2000).

- Con la aplicación de isótopos estables podemos determinar la contaminación de estuarios, ríos y lagos, debido a que los vertidos residuales de origen humano poseen un elevado valor del  $\delta^{15}N$  en comparación con el medio ambiente, estando este isótopo muy relacionado con el aumento de la densidad de las poblaciones humanas, ya que por lo general causan problemas de eutrofización. (Gómez Lado, 2015). Por lo que representa una herramienta útil para la determinación del origen e historia de un material presente en el ambiente (Guerrero, y otros, 2000)
- Nos permite determinar la contribución de entrada de materia orgánica a los sistemas acuáticos continentales y marinos, ya que el carbono orgánico puede proceder de origen terrestre o por productores primarios. Por otro lado las aguas dulces y marinas poseen distinta composición isotópica de carbono, azufre y nitrógeno (las aguas marinas poseen por lo general una cantidad más alta de isótopos pesados), determinándose las especies migratorias como a sus rutas de migración, ya que estas tendrán diferentes firmas de isótopos estables (Hobson, y otros, 2012). Los isótopos estables han sido utilizados para identificar microorganismos que están activamente implicados en un proceso metabólico específico, bajo condiciones similares a las que ocurren en los ambientes naturales (Guerrero, y otros, 2000).
- Del mismo modo se realizan estudios con los isótopos estables, para determinar los flujos de energía en las cadenas alimenticias, ya que la composición isotópica del carbono de los animales depende de la ingesta, produciendo un incremento del 0.5 a 1.0‰ en los animales respecto a su dieta. Algunos de los procesos que contribuyen a este enriquecimiento son: (i) pérdida preferencial de  $^{12}CO_2$  en la respiración; (ii) captación selectiva de compuestos  $^{13}C$  durante la digestión; (iii) fraccionamiento metabólico durante la formación de distintos tipos de tejidos (pelo > cerebro > músculo > hígado > adiposo) (Guerrero, y otros, 2000).
- En los últimos años se está estudiando la presencia de los isótopos estables en las plantas, ya que informan acerca de los recursos adquiridos por las plantas durante los procesos de asimilación, transformación de los recursos y las condiciones ambientales y fisiológicas durante el crecimiento; el  $\delta^{18}O$  se

emplea para determinar si los cambios de  $\delta^{13}\text{C}$  se deben a la asimilación del carbono o en la transpiración de las plantas, ya que refleja la conducta estomática en diferentes especies teniendo en cuenta el cambio de las propiedades hidráulicas que se da en las hojas de las plantas. La composición isotópica del xilema es la misma de la fuente del agua que absorbido la planta, siempre y cuando no se haya producido fraccionamiento del isótopo en la asimilación del recurso, por lo que se realiza el análisis isotópico del xilema de diferentes especies, con el fin de determinar una fuente potencial del agua para una determinada área. (Resco, 2010).

- Se están estudiando los fraccionamientos isotópicos de los elementos Carbono y Azufre, para determinar la antigüedad de la tierra; estudiando la discriminación isotópica de la materia pre-biológica de una de las rocas más antiguas que se conoce: las de formación de Issua, en Groenlandia, que data de algo más de 3900 millones de años (Guerrero, y otros, 2000).
- El Centro de Experimentación y Obras Públicas (CEDEX) junto con la Universidad Complutense de Madrid (UCM) realizaron estudios referentes a cuantificar la contribución de dos ríos (Jarama y Lozaya, ubicados en la parte norte de Madrid) en el área de mezcla según las variaciones estacionales y diarias en su composición isotópica, empleando mapas de distribución espacial de  $\delta^{18}\text{O}$  de precipitación en este sitio, obteniendo así las relaciones isotópicas del deuterio ( $\delta^2\text{H}$ ) y oxígeno-18 ( $\delta^{18}\text{O}$ ), en relación con el estándar de agua VSMOW donde mostraban que las firmas isotópicas de los ríos eran bien diferenciados permitiendo calcular los porcentajes de agua de mezcla. (Bardasano, y otros, 2012).
- En cuanto a las aguas subterráneas con el fin de determinar su origen se realiza en relación con la concentración correspondiente de isótopos estables en la infiltración de precipitaciones en la zona de recarga del acuífero. En ocasiones la concentración de isótopos estables en el acuífero se puede relacionar con la infiltración ocurrida en un período en que las condiciones climáticas varíen. Las diferentes composiciones de isótopos estables del agua que proviene de ríos que nacen en las montañas y del agua de precipitaciones locales pueden emplearse para determinar la mezcla de precipitaciones y ríos en las aguas



subterráneas. El cambio de la composición de isótopos estables de las aguas en remanso de los lagos suele emplearse para determinar la tasa de evaporación del lago. (Gonfiantini, y otros, 1987).

- Existe una estrecha relación entre las aguas subterráneas y las superficiales, tal como lo demostraron (Castaño, y otros, 2013), donde obtuvieron muestras en el entorno del Parque Nacional de Las Tablas de Daimiel, que presentaban valores de isótopos estables que indican una evaporación previa a la recarga, o una mezcla con aguas evaporadas, y con la ayuda de los diversos modelos de distribución de los valores isotópicos que se realizaron anteriormente, se pudo determinar la posible área de la precipitación que origina las escorrentías superficiales y subterráneas cuyas huellas quedaban reflejadas tras un paso intermedio de un proceso de evaporación. Del mismo modo (Muñoz, y otros, 2013), identificaron y caracterizaron las zonas de recarga de las diferentes litologías del Sistema Acuífero de la Loma de Úbeda definiendo mejor el sistema de flujo, donde con la combinación de técnicas hidroquímicas, se puede ayudar a definir el modelo conceptual de funcionamiento y el tiempo de renovación del agua reconociendo los recursos potencialmente explotables.
- Un dato importante es el tiempo de permanencia del agua en un acuífero, llamado también "edad" del agua. Algunos isótopos radiactivos pueden desempeñar un papel, según sus períodos de semidesintegración, para determinar el tiempo que el agua de que se trate estuvo en contacto con la atmósfera. Si el agua subterránea es muy joven, la carga puede depender de la precipitación en determinado año y tras una estación seca puede faltar el agua subterránea. El otro extremo, o sea, agua subterránea muy vieja, puede significar que o hubo recarga y por lo tanto agotamiento de las reservas de agua subterránea. (Gonfiantini, y otros, 1987).
- El estudio de los isótopos estables, también tiene gran ayuda en el campo forense; ya que existen estudios donde sugieren que los valores de  $\delta^{18}\text{O}$  del cabello humano pueden utilizarse para saber la región del origen de individuos desconocidos. Para ellos se evaluó la variación temporal en el valor del  $\delta^{18}\text{O}$  del agua potable, tomando como datos las mediciones de los grifos de agua potable para desarrollar modelos geospaciales o mapas de la variación

intraanual, la variación temporal en el agua del grifo  $\delta^{18}\text{O}$  se correlacionó con el tipo de suministro de agua, y se relacionó con los patrones geográficos de precipitación  $\delta^{18}\text{O}$  estacionalidad y tiempo de residencia del agua (Casey, y otros, 2011).

- Los análisis de los isotopos ambientales estables, son una herramienta útil para reconstruir las condiciones paleoambientales en regiones kársticas, ya que estas regiones tienen una amplia distribución en la superficie del terreno, siendo alrededor del 29% del territorio español. En las que las acciones del agua, principalmente en las rocas carbonatadas, se han creado tierras y depósitos erosivos específicos, ofreciendo así posibilidades científicas interesantes. El isótopo estable se utiliza para deducir algunas características de los acuíferos kársticos, alcanzando así las relaciones hidrogeológicas de dicho sistema. Las relaciones isotópicas del oxígeno ( $\delta^{18}\text{O}$ ) se las utiliza para deducir las temperaturas que se presentan en los sistemas; las relaciones isotópicas estables del carbono ( $\delta^{13}\text{C}$ ) se las utiliza para deducir la procedencia del carbono y obtener información sobre el tipo de vegetación existente en el área estudiada. Del mismo modo los isótopos estables en aguas kársticas se utilizan para identificar la procedencia del agua y la posible mezcla de agua, así como para proporcionar información sobre el flujo del agua, la velocidad y el tiempo de residencia en el acuífero ( $^{16}\text{O}$  y  $^{18}\text{O}$ ) y los isótopos de hidrógeno ( $^1\text{H}$  y  $^2\text{H}$ ) Como trazadores debidos a ser parte de la molécula de agua (López Martínez, 2008).

## 2.2. Antecedentes

Las variaciones de los isótopos estables en la precipitación son especialmente útiles para elaborar los modelos de circulación global. Estos modelos simulan el comportamiento de todo el sistema atmosférico, incluida su interacción con el océano, y pueden utilizarse para pronosticar la respuesta del sistema a distintos tipos de fuerzas internas y externas, tales como la creciente concentración de gases con efecto de invernadero en la atmósfera y las variaciones de la insolación. (Rozanski, y otros, 1990), es por eso que en los años 70 se introduce el patrón VSMOW (Viena Estándar Mean Ocean Water) el mismo que nos demuestra la relación lineal entre el  $\delta^{18}\text{O}$  y el  $\delta^2\text{H}$ , a través de una red global para isótopos en la precipitación GNIP pertenecientes a la AIEA, y que se utiliza actualmente, siendo la siguiente expresión. (Clark, y otros, 1997).

$$\delta^2 H = 8.13 \delta^{18} O + 10.8\% \quad \text{VSMOW}$$

Basados en datos de precipitaciones desde 1961 hasta 1993 de la AIEA-WMM, hace 23 años Rozanski y compañía, estudiaron las correlaciones existentes entre los contenidos de los isótopos en precipitación con distintas variables geográficas (latitud, altitud, distancia al mar) y climáticas (temperatura del aire), en sus medias estacionales y anuales de diferentes partes del mundo, resaltando así la importancia del estudio de isótopos como indicadores climáticos. (Rozanski, y otros, 1993).

En Estados Unidos de Norte América, para determinar una buena composición isotópica de la precipitación, se apoyó en la toma de datos de isótopos de la red fluvial ya que se integran con éxito a la variabilidad espacial en el ciclo meteorológico y proporcionan el mejor conjunto de datos disponible sobre las distribuciones espaciales de los valores isotópicos de las aguas meteóricas en los Estados Unidos. Con el fin de representar adecuadamente la variación espacial, se evaluaron los efectos de diferentes opciones para varios parámetros de contorneado, incluyendo el número de puntos, el tamaño de las cuadrículas y el tipo de rutina de cuadrícula, para asegurar que el algoritmo de contorneado utilizado no introdujera sesgo en las áreas de estudio. Los efectos del kriging se compararon con el uso de un método de rejilla de distancia inversa, produciendo contornos que parecían más precisos, ya que los parámetros de kriging fueron elegidos apropiadamente para minimizar artefactos

causados por composiciones anómalas de un solo sitio, mostrando que las distribuciones espaciales de los valores isotópicas del deuterio ( $\delta^2\text{H}$ ) y oxígeno-18 ( $\delta^{18}\text{O}$ ) son muy similares entre sí, ya que coinciden con los contornos topográficos mostrando un alto grado de coherencia espacial (Kendall, y otros, 2001)

Con la utilización de datos de 583 estaciones de la GNIP, Gabriel J. Bowen y Bruce Wilkinson, describieron la distribución isotópica moderna en términos de variables geográficas principales, con el fin de comprender el patrón geológico de cambio del  $\delta^{18}\text{O}$ , modelando la correlación entre  $\delta^{18}\text{O}$  en la precipitación con la latitud y altitud; y combinándolos con las cuadrículas residuales, que son los residuos de los valores observados con los previstos, obtuvo un mapa global de alta resolución de  $\delta^{18}\text{O}$ , el cual puede servir como referencia espacial para la paleoprecipitación (Bowen, y otros, 2002). La ecuación encontrada fue:

$$\delta^{18}\text{O} = -0.0051(|LAT|)^2 + 0.1805(|LAT|) - 0.002(|LAT|) - 5.247$$

No existe un método estandarizado para conseguir la representación de la distribución espacial isotópica, por lo que se empleó el re-muestreo, con el fin de comprobar la veracidad de las estimaciones interpoladas de  $\delta^2\text{H}$  y  $\delta^{18}\text{O}$ , realizadas en cuatro métodos, triangulación, interpolación a distancia inversa, análisis objetivo de Cressman y de regresión con latitud y altitud (método de Bowen y Wilkinson, 2002). Donde se observó que los errores encontrados estaban fuertemente relacionados con el número de datos; y que el método propuesto por Bowen y Wilkinson, reduce el error promedio de estimaciones en un 10-15% con respecto a otros métodos probados, dando un error promedio, utilizando todos los datos disponibles, de  $\approx 2,5\%$  del intervalo global; presentando mapas de contenido isotópico con un nivel de confianza del 95%, con cobertura continental y oceánica (Bowen, y otros, 2003).

En EE.UU. se realizó el análisis de mapas isotópicos de precipitación y de aguas de río, los cuales fueron elaborados con datos de latitud y altitud como predictores primarios de composición isotópica estable. Con el fin de determinar las diferencias entre estos mapa, que nos indiquen el efecto local y las extensiones regionales de estos desplazamientos sobre las composiciones isotópicas del agua. Encontrando el llamado “efecto de captación” para los ríos. Siendo los valores de las aguas del río inferiores a los valores isotópicos locales, en aquellas cuencas donde las variaciones de elevación son muy pronunciadas. La diferencia de los valores isotópicos de precipitación

previstos con los observados, corresponden a otros factores que influyen en la formación de estos isótopos en la precipitación, como la distancias desde la fuente de vapor, la tasa de precipitación, la trayectoria de la tormenta y la humedad relativa, que no son contabilizados cuando analizamos solamente la latitud y la elevación de la estación; por lo que con el fin de captar estos procesos de importancia regional, se contorneo los residuos usando una rutina de ponderación inversa, dejando de lado el Kriging para interpolar los valores ya que los datos no son suficientemente espaciados para calcular un modelo de semi-variograma (Dutton, y otros, 2005).

En Estados Unidos se realizó un estudio de distribución isotópico estable en el agua potable, donde se demostraba que las variaciones espaciales de las relaciones isotópicas del agua de grifo eran muy grandes y similares a las composición isotópica de las aguas de precipitación; y las variaciones interanuales eran pequeñas. Con el fin de determinar las predicciones de las relaciones isotópicas del agua del grifo, se realizó un kriging ordinario utilizando un semi-variograma esférico con efecto pepita donde no se observó anisotropía espacial fuerte en ninguno de los conjuntos de datos (Bowen, y otros, 2007).

Liebminger et al. (2006, 2007) realizo un estudio sobre el domino espacial de Austria e identifico modelos que describen las distribuciones espaciales medias estacionales y medias anuales, donde estudio 7 parámetros climáticos y geográficos que no necesariamente inciden en el valor de  $\delta^{18}O$  de precipitación de forma lineal ni singular, en diferentes formas algorítmicas, de forma individual o compuesta, obteniendo valores que describen procesos que indican en el fraccionamiento isotópico; estos estudios no fueron bien vistos, ya que el tratamiento algorítmico que realiza a los parámetros son redundantes y no se justifica en observación y sin un claro sentido físico, pero obtuvo modelos con buenos ajustes, aunque están sobreparametrizados: 13 términos (grados de libertad) para 51 datos. (Heredia, y otros, 2012).

Se realizó una rejilla de 10'x10' en el Mediterráneo central y oriental, que represente la composición isotópica de la precipitación. Aplicando modelos estadísticos de regresión que representan altos coeficientes de correlación, el mismo que fueron evaluados mediante una calidad de ajuste para seleccionar a la mejor combinación del modelo a los datos geográficos y meteorológicos; y el uso de un kriging ordinario exponencial con anisotropía, con el fin de representar los residuos de los modelos

interpolados. Se observó que los modelos con parámetros meteorológicos, presentan mejores estadísticas de calidad de ajuste que aquellos que solamente usan datos geográficos (Lykoudis, y otros, 2007).

En el 2010 Lykoudis, realiza estudios sobre el dominio espacial del Mediterráneo Oriental de Grecia a la costa de Levantina, obteniendo modelos que describen las distribuciones espaciales media anuales y medias mensuales, pero con algunas limitaciones, ya que las estaciones son escasas y con una distribución espacial heterogénea de donde obtiene series no continuas con presencia de huecos, no siendo recomendadas cuando se desee estudiar escenarios climáticos particulares, ya que restringen más estos datos. Los parámetros empleados para sus estudios fueron la latitud, cota, temperatura y precipitación. (Heredia, y otros, 2012).

En el año 2007, se realizó un estudio en la provincia de Burgos donde muestran una metodología que permite aplicar métodos de correlación de los isotopos con la latitud y la cota, de forma continua a un sector limitado del territorio peninsular español, basados en la utilización de herramientas de SIG unida al uso de un modelo para la predicción de la composición isotópica media plurianual de la precipitación, permitiendo elaborar una cartografía continua de distribución del  $\delta^{18}O$  en la precipitación, el cual podrá ayudar a proyectos donde será necesaria la diferenciación del origen de distintos tipos de agua. (Rodríguez, y otros, 2007)

(Díaz Teijeiro, y otros, 2009), expusieron los resultados de siete años de funcionamiento de la REVIP para los isotopos  $\delta^{18}O$ ,  $\delta^2H$ ,  $\delta^3H$ ; estudiando la distribución espacial de los isotopos estables de las aguas de precipitación en España peninsular e Islas Baleares, tomando como datos el valor medio anual estableciendo que existe una correlación con la latitud y la altitud, ya que la latitud se integra con el efecto de la cota para producir una tendencia única de empobrecimiento isotópico de las precipitaciones hacia mayor latitud y cota, siendo estos factores determinantes que controlan el fraccionamiento isotópico.

En el 2012 J. Heredia y compañía, realizaron modelos de regresión múltiple basados en parámetros climáticos locales (temperatura, precipitación, humedad relativa, velocidad del viento) que describan la evolución temporal a escala mensual del contenido isotópico del  $\delta^{18}O$  en la precipitación en el ámbito de la España peninsular e Islas Baleares, llegando a establecer un modelo básico definido por los parámetros

simples de temperatura y logaritmo de la precipitación mejorando la representación al detalle cuando incorporaban un parámetro compuesto definido por el logaritmo de la humedad y la velocidad del viento, sin embargo no se pudo conocer la situación en origen (condiciones de evaporación que rigen el valor del  $\delta^{18}O$  siendo estas las que se incorporan a las nubes y que luego dan lugar a las precipitaciones de donde obtenemos los datos a estudiar). (Heredia, y otros, 2012).

En el año 2011, después de analizar las técnicas de mapeo de los isotopos estables que se realizan por modelos de regresión, observaron que mantienen pequeños residuos en los nodos de la red que probablemente sean causados por eventos climáticos locales. Por lo que se empezó a trabajar empleando técnicas geoestadísticas, incluyendo la identificación de parámetros climáticos relevantes, mejorando así estos mapas. (Capilla, y otros, 2011).

Existe una relación de la composición isotópica de los embalses y sus cuencas hidrográficas, tal como lo demostraron Bardasano y Villarroya en 2012, quienes realizaron un modelo de distribución del  $\delta^{18}O$  de precipitación sobre España peninsular, con el fin de ayudar a identificar los factores que regulan la composición isotópica de los reservorios de agua en los diferentes sistemas hidrológicos y climáticos del país, mejorar la comprensión de la oferta hídrica con la que posee un sistema con el fin de atender a las demandas de una cuenca, ya que se definirá una línea de evaporación de los reservorios en estudio. Para ellos se seleccionó 5 reservorios teniendo en cuenta una amplia representación de la variabilidad geográfica, climática y física de España, donde se comparó el contenido isotópico observado de los reservorios en relación con la línea meteorológica local, empleando una herramienta SIG donde los datos isotópicos de REVIP muestran valores de  $\delta^{18}O$  de precipitación más altos que de los embalses, debido a las diferencias de altitud que existe entre los embalses y las estaciones de la REVIP, y se determinó una línea de evaporación que ayudará a definir con precisión el rastreo de la fuente de agua meteórica. (Bardasano, y otros, 2012)

### **2.2.1. Conclusiones : Síntesis de los Antecedentes**

- Los modelos de circulación global de las variaciones isotópicas estables en la precipitación, nos sirve para pronosticar la respuesta de las fuerzas internas y externas dentro del sistema modelado, por lo que debemos de aprovechar la correlación existente entre los contenidos isotópicos en precipitación y con distintos parámetros geométricos y climáticos; donde existe un predominio de los modelos de regresión de segundo orden, tomando como parámetros principales la latitud y altitud.
- En las investigaciones de las referencias citadas, es muy común el concepto de residuos refiriéndose a la diferencia de los valores estimados con los observados, causados probablemente por fenómenos locales o por la procedencia del origen de las precipitaciones, por lo que demuestra la falta de reproducción de mediciones y la pérdida de información.
- Respecto al método del Kriging en la elaboración de mapas de contenido isotópico, quedó demostrado por Kendall en 2001, que es eficiente en la representación de la producción de contornos de la variación espacial, siempre que los parámetros utilizados sean los adecuados para minimizar las composiciones isotópicas anómalas locales donde se presentan los residuos. Representando así, mejor la distribución isotópica en la precipitación, ya que reduce el efecto de los residuos en los nodos de la red que posiblemente sean causados por eventos climáticos locales.
- Para el desarrollo de un mapa de contenido isotópico empleando un Kriging, debemos tener datos suficientemente espaciados para calcular un modelo de semi-variograma, tal como lo preciso (Dutton, y otros, 2005). Ya que si obtenemos un semi-variograma que represente los datos, como lo obtuvo Bowen en 2007, podremos emplear un kriging ordinario esférico con efecto pepita, que represente las composiciones isotópicas del agua en precipitación (Bowen, y otros, 2007). O del mismo modo emplear un Kriging ordinario exponencial con anisotropía como lo realizó Lykoudis en 2007.
- En el 2011 se realizó un mapeo de contenido isotópico empleando técnicas geoestadísticas, el estudio se realizó sobre la península Ibérica. Emplearon un kriging ordinario exponencial, representando adecuadamente la distribución



espacial del contenido isotópico, donde ya no se observaba los residuos en los nodos. (Capilla, y otros, 2011); como si se observaba en los mapas elaborados por métodos de regresión múltiple, sobre el mismo dominio espacial (Heredia, y otros, 2012).

- (Rodríguez, y otros, 2007) demostró la importancia de un mapeo de contenido isotópico en las precipitaciones para la toma de decisiones en proyectos hidrogeológicos, donde serán necesarios la identificación del origen de los distintos tipos del agua. El mapeo de la distribución del contenido isotópico  $\delta^{18}O$ , lo realizo en la provincia de Burgos.

### **III. DATOS**

#### **3.1. Datos Isotópicos**

Los datos con lo que se trabajaron en este proyecto correspondientes al dominio espacial de la Península Ibérica. Los datos fueron obtenidos de la Red Mundial de Isótopos en Precipitación (GNIP), la cual se encarga de la observación mundial de isótopos de oxígeno e hidrógeno en precipitación, siendo iniciada por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) y la Organización Meteorológica Mundial (OMM) desde 1958, la misma que viene siendo operada en cooperación con instituciones asociadas en los Estados Miembros. En la demarcación de España peninsular los datos fueron tomados de la Red de Vigilancia de Isótopos en Precipitación (REVIP), gestionada por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) en colaboración con la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET).

##### **3.1.1. GNIP**

Desde 1961, la GNIP ha brindado las firmas isotópicas de la precipitación en todo el mundo. La red está conformada por más de 1000 estaciones de monitoreo en más de 125 países y territorios; las cuales las brindan datos con calidad y consistencia gracias al apoyo logístico brindado por la OIEA.

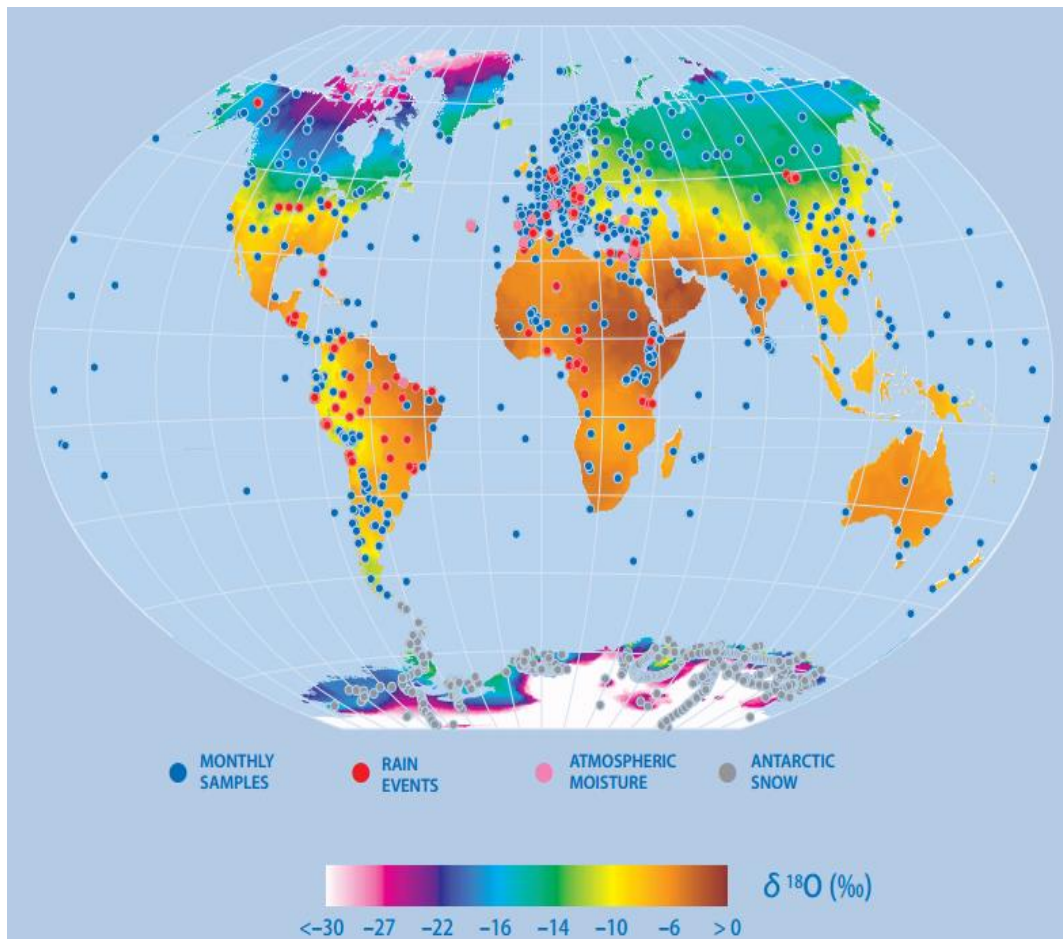
El objetivo era una recopilación sistemática de datos espaciales básicos sobre el contenido de isótopos de la precipitación a escala global para determinar variaciones temporales y espaciales, Isótopos estables y tritio en la precipitación. Mientras que el conductor inicial, fue para monitorear la precipitación de las pruebas termonucleares atmosféricas a través de la determinación del isótopo de hidrógeno radiactivo Tritium, desde la década de 1970 el enfoque cambió a convertirse en una red de observación de hidrógeno estático e isótopos de oxígeno datos para estudios hidrológicos (GNIP, 2015).

Con el fin de obtener adecuados datos isotópicos que nos ayuden en las investigaciones hidrológicas dentro del alcance de inventario, planificación y desarrollo de los recursos hídricos. Se inició en el 2002 una Red Global de Isótopos en Ríos (GNIR)

*ELABORACIÓN DE MAPAS DE CONTENIDOS ISOTÓPICOS de O-18 EN LA PRECIPITACIÓN SOBRE LA PENÍNSULA IBÉRICA POR MEDIO DE TÉCNICAS GEOESTADÍSTICAS*

para complementar los datos de la GNIP; GNIR es un programa global de observación ambiental dedicado a la compilación de ensayos isotópicos de aguas fluviales, pero también a la recolección y análisis de muestras de agua. Ambos recursos están disponibles a través del portal WISER (Sistema de Isótopos de Agua para Análisis de Datos, Visualización y Recuperación Electrónica).

La base de datos GNIP del OIEA, incluye ahora más de 120 000 registros de datos mensuales. Toda la base de datos GNIP está disponible para su consulta y se puede descargar desde el sitio web del OIEA ([www.iaea.org/water](http://www.iaea.org/water)).



**Figura 2: Red Mundial de Isótopos en Precipitación (GNIP). Operada: IAEA-WMM (Fuente: [www.iaea.org](http://www.iaea.org)) (Global Network of Isotopes in Precipitation (GNIP). IAEA-WMM. Source: [www.iaea.org](http://www.iaea.org))**

### **3.1.2. REVIP**

La Red Española de Vigilancia de Isótopos en Precipitación (REVIP) es gestionada por el CEDEX en colaboración con la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Donde actualmente cuentan con un total de 16 estaciones de vigilancia, 14 estaciones en España peninsular que se encuentran distribuidas en las principales cuencas hidrográficas españolas, una en Mallorca y otra en La Palma de Gran Canaria (Islas Canarias); en las que se procede al muestreo y, posteriormente, al análisis sistemático y periódico de la composición isotópica de la precipitación en España. Brindando series de cadena mensual, actualizadas y sus carencias son escasas; convirtiéndola en una de las mejores redes nacionales que integran la GNIP.

Todas las estaciones de la REVIP se sitúan en estaciones meteorológicas de la AEMET, excepto la de Madrid-Retiro que es gestionada y muestreada directamente por el personal del Laboratorio de Aplicaciones Isotópicas (LAI) del Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas del CEDEX.

La REVIP se creó en el año 2000, para cumplir los siguientes objetivos:

- Apoyar a la gestión de recursos hídricos, principalmente para la delimitación de masas de agua.
- Identificar los variables geográficas y climáticos que regulan la composición isotópica de la precipitación.
- Mejorar el conocimiento sobre los eventos meteorológicos que afectan a diferentes zonas de España.
- Apoyar la investigación en hidrología, y los estudios de estimación de recursos hídricos (recarga), protección frente a la contaminación, gestión de infraestructuras hidráulicas (fugas de embalses) y prevención de riesgos de avenidas e inundaciones.
- Apoyar la calibración de modelos de circulación global de la atmósfera y aportar información relevante para la comprensión de procesos meteorológicos y la evaluación del cambio climático.
- Contribuir desde España a los desarrollos e investigaciones que se realizan en el marco del OIEA.

Teniendo en cuenta estos objetivos, la REVIP se diseñó para que cubriera los siguientes aspectos (Díaz Teijeiro, y otros, 2009):

- Amplia cobertura geográfica (Norte-Sur, Este-Oeste, Península y zonas insulares: Baleares y Canarias, con diferente entorno orográfico y distinta cota topográfica).
- Cobertura de distintas zonas climáticas (zonas húmedas y secas; continentales, litorales e insulares; atlánticas y mediterráneas).
- Adecuada representación de cuencas hidrográficas

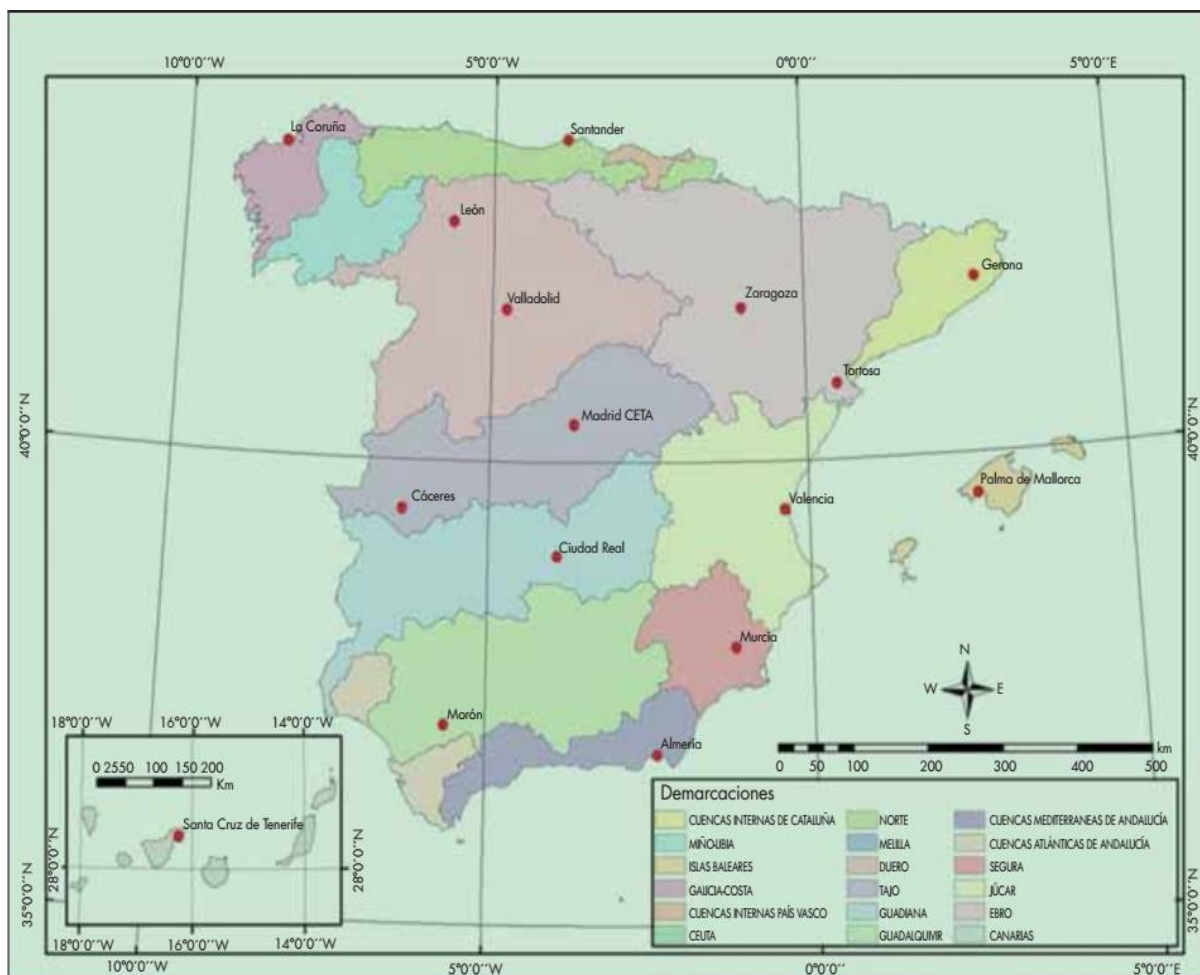


Figura 3: Situación de las 16 estaciones de la Red Española de Vigilancia de Isótopos en Precipitación (REVIP) y de las principales demarcaciones hidrográficas españolas.

FUENTE: (Díaz Teijeiro, y otros, 2009).

### **3.1.3. Metodología de Muestreo y Análisis**

Para la determinación de isótopos estables del agua, se toman muestras mensuales integradas, siguiendo el protocolo de muestreo, análisis y registro establecido por el OIEA.

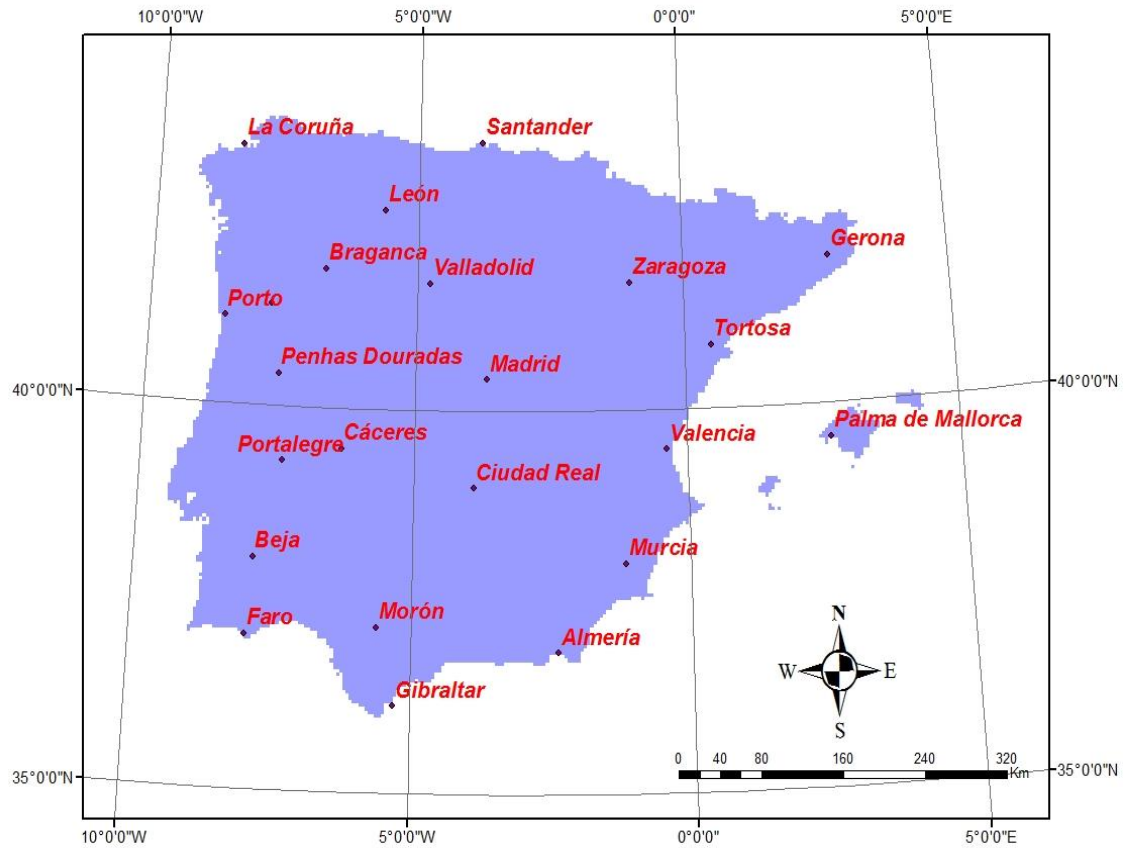
Se tomó como referencia la página web del REVIP-CEDEX, con el fin de describir el procedimiento de muestreo, siendo el siguiente:

1. Durante todos y cada uno de los días de cada mes, el agua de precipitación recogida en el pluviómetro es transferida por el personal de AEMET a una botella de 10 litros (muestra mensual integrada) que se mantiene cerrada herméticamente para evitar la evaporación.
2. El primer día del mes siguiente, se agita el agua acumulada en la botella de 10 litros, y se trasvasa a otra de 0,5 litros hasta su completo llenado, descartándose la cantidad sobrante.
3. Cada 6 meses las botellas almacenadas en las distintas estaciones de AEMET son enviadas al CEDEX para su análisis.

Se utiliza el espectrómetro de Masas Ligeras (IRMS) de doble entrada, Delta Plus Advantage, y un espectrómetro láser (CRDS) Picarro L1102-i, para determinar el contenido isotópico estable del agua.

Los resultados analíticos se expresan como desviación isotópica de la muestra con respecto a una serie de patrones VSMOW-SLAP (Vienna-Standard Mean Ocean Water-Standard Light Antarctic Precipitation). La incertidumbre para los análisis realizados en el CEDEX, tanto por espectrometría de masas como por espectrometría láser, es de  $\pm 0,2\text{‰}$  para  $\delta^{18}\text{O}$  y de  $\pm 1,5\text{‰}$  para  $\delta^2\text{H}$  (REVIP, 2017).

A continuación se muestran la situación de las 15 estaciones de la Red Española de Vigilancia de Isótopos en Precipitación (REVIP) y de las 08 estaciones de la Red Mundial de Isótopos en Precipitación (GNIP) correspondientes a Portugal y Gibraltar.



**Figura 4. Localización de las estaciones GNIP y REVIP.**

NOTA. “Datos tomados de la Red de Vigilancia de Isótopos en Precipitación (REVIP), gestionada por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) en colaboración con la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET)” (REVIP, 2017).

### 3.2. Variables geográficas

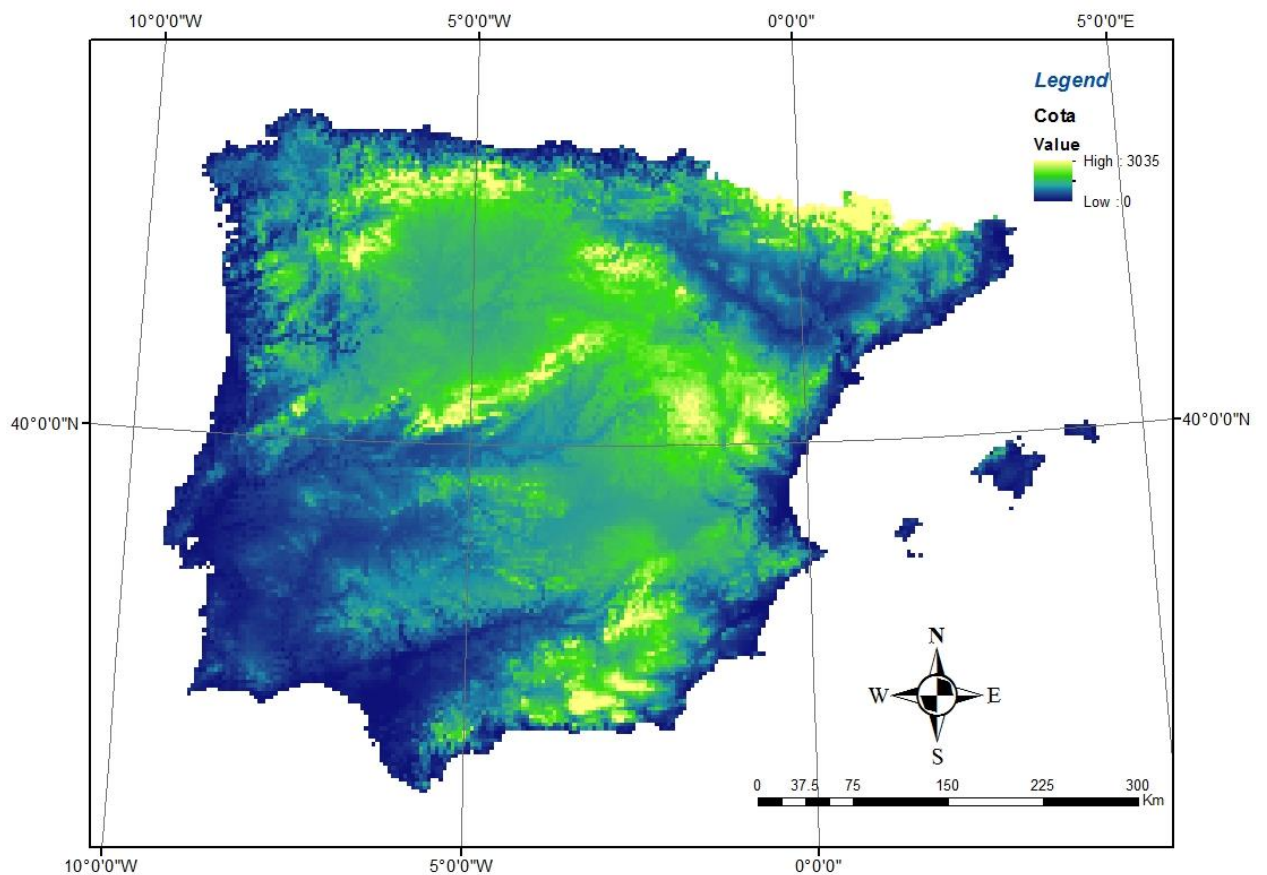
Se trabajó el análisis de los contenidos isotópicos en precipitación en función de las variables geográficas de latitud y altitud, por lo que se procedió a descargar un Modelo de Elevación Digital (MED) de la página del Servicio Geológico de los Estados Unidos – USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). Se descargaron 96 formatos ASCII, cada una de ellas con una extensión de 100 Km x 100 Km y una resolución de 27.778 metros de raster, el cual cubría nuestra área de estudio correspondiente a la Península Ibérica; luego se procedió a unir estas imágenes y a delimitarlas con un Shapefile correspondiente a nuestra zona de estudio. Este procedimiento se realizó con ayuda



*ELABORACIÓN DE MAPAS DE CONTENIDOS ISOTÓPICOS de O-18 EN LA PRECIPITACIÓN SOBRE LA PENÍNSULA IBÉRICA POR MEDIO DE TÉCNICAS GEOESTADÍSTICAS*

de una herramienta GIS. En la misma herramienta GIS se aumentó la resolución espacial, con el fin de evitar problemas de cálculos al estimar futuros valores isotópicos, de 30m x 30m a 5000 m x 5000 m.

Con el resultado de este procedimiento, se pudo obtener información de altitud y latitud de cada celda en la que se desea saber el valor isotópico en precipitación de la península Ibérica, como se muestran en las siguientes imágenes:



**Figura 5 Mapa de altitud de la Península Ibérica**



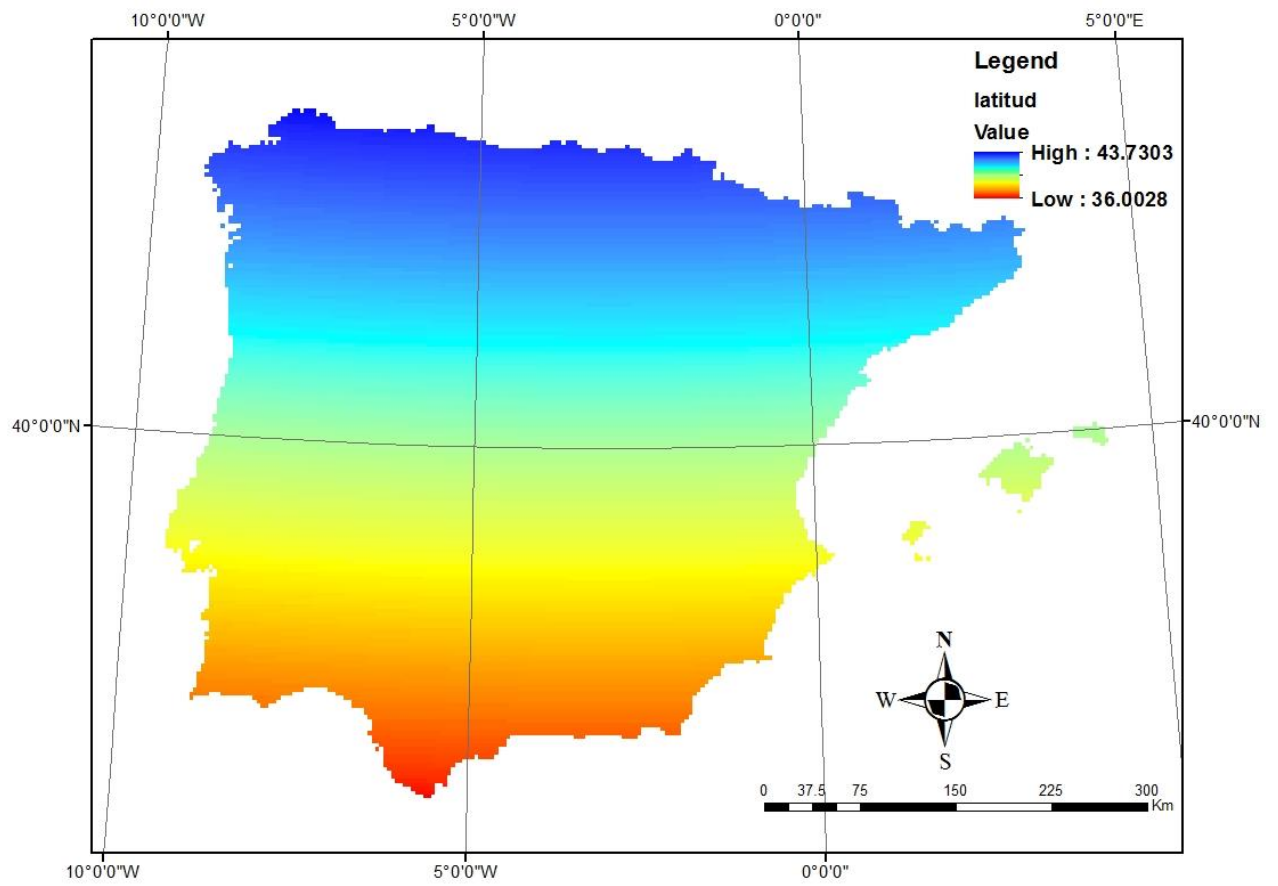


Figura 6 Mapa de latitud de la Península Ibérica

#### **IV. METODOLOGÍA**

La metodología empleada en el siguiente trabajo se inicia por la recopilación y el análisis de los datos de isótopos estables en la precipitación, así como la elaboración de un modelo de elevación digital de donde obtuvimos las variables geográficas de la altitud y latitud.

En la figura N° 07, se muestra el procedimiento empleado para la elaboración de mapas de contenidos isotópicos en la precipitación sobre la península Ibérica.

Una vez que hemos obtenido los datos necesarios para el estudio de los isótopos estables en la precipitación, realizamos una ponderación respecto a la cantidad de precipitación con las que se obtuvieron los datos isotópicos de cada mes, con el fin de eliminar los pesos del contenido isotópico que se presentan con frecuencias extremas que corresponden a precipitaciones con volúmenes escasos. Luego obtenemos los promedios anuales de estas medidas correspondientes a cada estación. Cabe recordar que el promedio anual de los datos fueron trabajados como años normales y no hidrológicos.

De los promedios anuales ponderados determinamos la desviación estándar de cada estación, con el fin de tener una idea clara acerca de la variación de los datos año tras año, y si estos siguen una tendencia que nos pueda ayudar a predecir posibles valores en el futuro.

Luego determinamos el promedio de cada estación, el mismo que corresponde al promedio de todos los años en estudio. Estos se utilizarán para determinar la relación que existe entre los datos isotópicos y las variables geográficas donde se encuentran las estaciones, determinando así que parámetro es más influyente en el fraccionamiento isotópico.

Para la elaboración de las ecuaciones de regresión lineal se asignó a cada estación un peso en base 5 en función a la desviación estándar determinada anteriormente, con el fin de dar más influencia, a la hora de elaborar nuestras ecuaciones de regresión lineal, a aquellas estaciones donde no hay mucha variabilidad temporal de los datos sobre aquellas en las que si las hay.

Después de analizar los datos isotópicos, se optó por realizar la alternativa de Regresión – Kriging para mapear el  $\delta^{18}\text{O}$  sobre la península Ibérica; para ello elaboramos ecuaciones de regresión lineal siguiendo el siguiente proceso:

- 1) Determinamos la relación que existe entre las estaciones de  $\delta^{18}\text{O}$  del nivel del mar y la Latitud. Nombramos estaciones a nivel del mar a aquellas que se encuentran por debajo de los 100 metros de altitud y que no están a más de 6.0 kilómetros de distancia del mar.
- 2) Luego determinamos el valor de  $\delta^{18}\text{O}^*$  que es el valor isotópico sin el efecto de la latitud. Para ello nos planteamos la hipótesis de que existe correlación nula en la estación de Madrid (Latitud de 40.41N). Descontando el efecto de la latitud encontrada en el punto 1.
- 3) Realizamos una ecuación de regresión lineal entre los valores del  $\delta^{18}\text{O}^*$  y la altitud de la ubicación de las estaciones, con el fin de determinar el grado de influencia que tiene la altitud sobre el contenido isotópico.
- 4) Obtenemos una variable estandarizada,  $\delta^{18}\text{O}^{**}$ , que se refiere al valor isotópico sin la influencia de la latitud y altitud. Esto lo realizamos descontando el efecto de la altitud a la ecuación que obtuvimos en el punto 3. Seguimos con nuestra hipótesis de correlación nula para la estación de Madrid (altitud de 667 m.s.n.m.).

Una vez determinada la variable estandarizada  $\delta^{18}\text{O}^{**}$  realizamos el análisis espacial de estos valores mediante un variograma, fijándonos en el comportamiento de las parejas de puntos en el origen del variograma, ya que nos representará mejor la continuidad espacial y de la relación que existe entre las estaciones más cercanas entre sí. Asignamos un modelo matemático al variograma que mejor represente los puntos del variograma, luego estimamos mediante un Kriging Ordinario los valores de nuestra variable estandarizada para toda la península Ibérica. El Kriging Ordinario lo realizamos teniendo en cuenta los parámetros del vecindario de búsqueda del Kriging, que me brindaran una buena estimación y que puedan captar los fenómenos climáticos regionales, ya que los fenómenos climáticos que suceden en una determinada área no tiene nada que ver con los fenómenos climáticos que suceden en un área alejada a la inicial.

Una vez que hemos estimado los valores del  $\delta^{18}O^{**}$  para toda nuestra zona de estudio, procedemos que devolver el efecto de la altitud y latitud a cada uno de los puntos estimados, invirtiendo el procedimiento usado para determinar  $\delta^{18}O^{**}$  hasta llegar al valor  $\delta^{18}O$ . Luego procedemos a la representación de estos valores mediante un SIG.

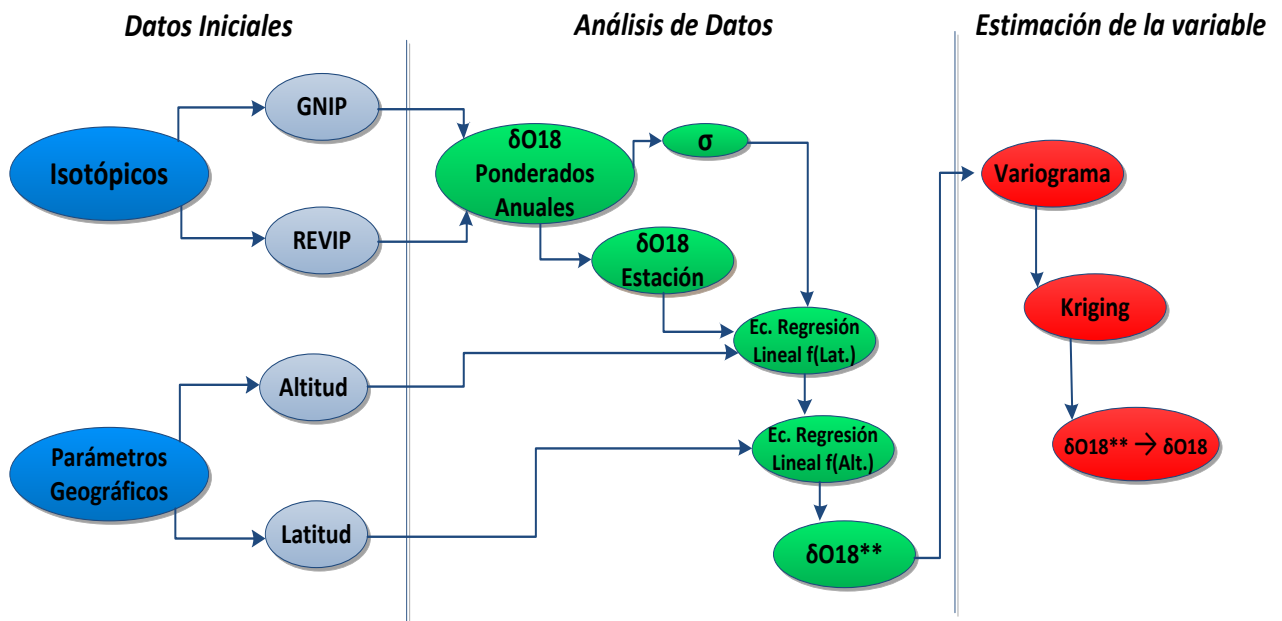


Figura 7 Metodología empleada en nuestro estudio.

#### 4.1. Dominio Espacial Y Temporal

##### 4.1.1. Domino Espacial: Península Ibérica

En esta parte del TFM estableceremos el sistema de proyección en el que se trabajara, ya que el sistema de proyección de los datos de partida debe ser el mismo que el sistema de proyección que se utilizará en el desarrollo del proyecto. Según el artículo 3 del RD 1071/2007, establece que “Se adopta el sistema ETRS89 (European Terrestrial Reference System 1989) como sistema de referencia geodésico oficial en España para la referenciación geográfica y cartográfica en el ámbito de la Península Ibérica y las Islas Baleares. En el caso de las Islas Canarias, se adopta el sistema REGCAN95. Ambos sistemas tiene asociados el elipsoide GRS80 y están materializados por el marco que

define la Red Geodésica Nacional por Técnicas Espaciales, REGENTE, y sus densificaciones”.

Los límites de nuestro dominio espacial de trabajo, es:

- Norte :  $43^{\circ}47'23.6''N$  ,  $7^{\circ}41'17.9''O$  (La Estaca de Bares)
- Sur :  $36^{\circ}0'10''N$  ,  $5^{\circ}36'33''O$  (La Isla de Las Palomas)
- Oeste :  $38^{\circ}46'51''N$  ,  $9^{\circ}29'54''O$  (El Cabo Da Roca)
- Este :  $42^{\circ}19'09''N$  ,  $3^{\circ}19'19''E$  (El Cabo De Creus)



**Figura 8 Imagen satelital de nuestra área de estudio**

#### **4.1.2. Series Temporales de Datos**

En el apartado 3.1 del capítulo III se explicó de donde se habían obtenido los datos de la composición isotópica estable en precipitación con las que elaboraremos los mapas que son objeto de estudio. En la tabla N° 01 se pueden observar las estaciones de la península Ibérica, así como sus coordenadas de ubicación y sus variables geográficas que son la altitud y latitud.

ELABORACIÓN DE MAPAS DE CONTENIDOS ISOTÓPICOS de O-18 EN LA PRECIPITACIÓN SOBRE LA  
PENÍNSULA IBÉRICA POR MEDIO DE TÉCNICAS GEOESTADÍSTICAS

País	Estación	Long (° ' ")	Lat (° ' ")	Lat (WGS 1984) (°)	XUTM ETRS 1989 (Huso 30N)	YUTM ETRS 1989 (Huso 30N)	Cota (m s.n.m.)
<b>España</b>	La Coruña	08 25 10 W	43 22 02 N	43.37	60851.83	4815965.97	58.00
	Santander	03 47 59 W	43 29 30 N	43.49	435335.01	4815813.94	52.00
	Morón	05 36 57 W	37 09 30 N	37.16	267704.57	4115708.51	87.00
	Cáceres	06 20 22 W	39 28 20 N	39.47	212719.14	4374581.40	405.00
	Ciudad Real	03 55 11 W	38 59 22 N	38.99	420343.51	4316080.24	627.00
	Madrid	03 40 41 W	40 24 40 N	40.41	442467.15	4473686.05	667.00
	Valladolid	04 46 00 W	41 39 00 N	41.65	352880.38	4612506.16	735.00
	León	05 38 58 W	42 35 20 N	42.59	282597.39	4718650.48	916.00
	Palma de Mallorca	02 37 35 E	39 33 20 N	39.56	983535.52	4393650.59	3.00
	Almería	02 23 17 W	36 50 47 N	36.85	554562.83	4077703.30	20.00
	Valencia	00 22 52 W	39 28 50 N	39.48	725259.35	4373393.64	11.00
	Tortosa	00 29 29 E	40 49 14 N	40.82	794466.24	4524784.59	48.00
	Murcia	01 10 10 W	38 00 10 N	38.00	660725.69	4207774.11	62.00
	Zaragoza	01 00 29 W	41 39 43 N	41.66	665849.88	4614241.49	247.00
Gerona	02 45 37 E	41 54 42 N	41.91	977897.59	4654982.14	127.00	
<b>Portugal</b>	Faro	07 57 36 W	37 00 36 N	37.01	58583.68	4107499.13	9.00
	Porto	08 35 60 W	41 08 00 N	41.13	29880.44	4568697.45	93.00
	Beja	07 52 00W	38 00 60 N	38.02	72691.46	4218856.33	246.00
	Portalegre	07 25 00 W	39 16 60 N	39.28	119007.61	4357526.89	597.00
	Penhas Douradas	07 32 60 W	40 25 00 N	40.42	113919.08	4483955.29	1380.00
	Vila Real	07 43 60 W	41 18 60 N	41.32	103772.45	4584729.72	481.00
	Braganca	06 43 60 W	41 47 60 N	41.80	189823.17	4634311.38	690.00
<b>Reino Unido</b>	Gibraltar	05 20 60 W	36 09 00 N	36.15	292393.74	4001874.51	5.00

**Tabla 1 Estaciones de mediciones**

En la tabla N° 02 observamos el periodo temporal donde se obtuvieron las proporciones isotópicas estables en la precipitación para el  $\delta^{18}O$ .

País	Estación	Long (° ' ")	Lat (° ' ")	Periodos de Mediciones
<b>España</b>	La Coruña	08 25 10 W	43 22 02 N	2000 - 2015
	Santander	03 47 59 W	43 29 30 N	2000 - 2015
	Morón	05 36 57 W	37 09 30 N	2000 - 2015
	Cáceres	06 20 22 W	39 28 20 N	2000 - 2015
	Ciudad Real	03 55 11 W	38 59 22 N	2000 - 2015
	Madrid	03 40 41 W	40 24 40 N	2000 - 2015
	Valladolid	04 46 00 W	41 39 00 N	2000 - 2015
	León	05 38 58 W	42 35 20 N	2000 - 2015
	Palma de Mallorca	02 37 35 E	39 33 20 N	2000 - 2015
	Almería	02 23 17 W	36 50 47 N	2000 - 2015
	Valencia	00 22 52 W	39 28 50 N	2000 - 2015
	Tortosa	00 29 29 E	40 49 14 N	2000 - 2015
	Murcia	01 10 10 W	38 00 10 N	2000 - 2015
	Zaragoza	01 00 29 W	41 39 43 N	2000 - 2015
Gerona	02 45 37 E	41 54 42 N	2000 - 2015	
<b>Portugal</b>	Faro*	07 57 36 W	37 00 36 N	1978 - 2000
	Porto	08 35 60 W	41 08 00 N	1988 - 2004
	Beja	07 52 00W	38 00 60 N	1988 - 1990
	Portalegre	07 25 00 W	39 16 60 N	1988 - 2004
	Penhas Douradas	07 32 60 W	40 25 00 N	1988 - 2004
	Vila Real	07 43 60 W	41 18 60 N	1988 - 1990
	Braganca	06 43 60 W	41 47 60 N	1988 - 1990
<b>Reino Unido</b>	Gibraltar**	05 20 60 W	36 09 00 N	1961 - 2014

**Tabla 2 Periodo de la tomas de datos de las estaciones**

(\*) No se registraron datos del año 1992

(\*\*)No se registraron datos de los años 1967, 1969, 1970, 1971, 1994, 2007

## 4.2. Tratamientos de Datos

Mediante la descripción de los datos, podremos conocer la distribución de los mismos de una forma rápida, y así tener una primera impresión sobre el comportamiento del  $\delta^{18}\text{O}$  en la precipitación. Esta etapa del estudio nos ayudara a tomar decisiones sobre que técnicas estadísticas podremos aplicar para desarrollar un buen modelo espacial.

Si bien es cierto que un análisis de gráficas de los datos nos ayudara a tener una imagen de cómo son estos, necesariamente se debe complementar esta imagen mediante medidas que, de forma objetiva, describan las características generales del conjunto de datos.

### 4.2.1. Estadísticos Descriptivos

Con el fin de describir adecuadamente la variable en estudio, emplearemos los denominados estadísticos descriptivos, que nos informan acerca de la forma en que se distribuyen los datos. Tenemos dos clases de estadísticos descriptivos: de posición y de dispersión.

#### 4.2.1.1. Estadísticos de Posición

Nos informan acerca de la tendencia central que tienen los datos, siendo las más destacables la media, mediana y moda.

##### - **Media**

La media se obtiene como el promedio de los datos, correspondiendo al centro de gravedad de los datos. Sea un conjunto de datos de una variable cuantitativa,  $x_1, \dots, x_n$ .

La media de los datos es:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

##### - **Mediana**

La mediana es un estadístico de posición de menor sensibilidad que la media a la presencia de casos extremos; es el valor de la variable que deja el mismo número de datos antes y después que él, una vez ordenados estos.



Sea un conjunto de datos de una variable cuantitativa,  $x_1, \dots, x_n$ . Ordenemos la muestra de menor a mayor,  $x_{(1)}, \dots, x_{(n)}$ . El cálculo de la mediana dependerá de si el número de datos,  $n$ , es par o impar:

- a) Si  $n$  es impar, la mediana es el valor que ocupa la posición  $((n+1)/2)$ , una vez que los datos han sido ordenados (en orden creciente o decreciente), porque éste es el valor central. Es decir:  $M_e = x_{((n+1)/2)}$ .
- b) Si  $n$  es par, la mediana es la media aritmética de las dos observaciones centrales. Cuando  $n$  es par, los dos datos que están en el centro de la muestra ocupan las posiciones  $(n/2)$  y  $(n/2) + 1$ . Es decir:  $M_e = (x_{(n/2)} + x_{((n/2)+1)})/2$ .

- **Moda**

En principio la moda se define como el valor más frecuente de los datos. Lo que ocurre es que si éstos son datos de una variable continua o discreta con muchos valores, puede que los datos apenas se repitan. En ese caso se debe agrupar por intervalos, no debe darse un valor como moda, sino un intervalo modal, aquél con mayor frecuencia asociada.

#### 4.2.1.2. Estadísticos de Dispersión

Nos informan acerca de la variabilidad o heterogeneidad en la distribución de los datos. Siendo en algunos casos, la medición de la dispersión más importante que la determinación de la tendencia central de los datos; aunque están relacionadas, ya que lo que pretenden es cuantificar cómo de concentrados o dispersos están los datos respecto a estas medidas.

- **Varianza**

La varianza de una variable aleatoria es una medida de dispersión definida como la esperanza del cuadrado de la desviación de dicha variable respecto a su media.

Dados unos datos de una variable cuantitativa,  $x_1, \dots, x_n$ , la varianza muestral de esos datos es:

$$S_{n-1}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}$$

Cuanto mayor sea la varianza de unos datos, más dispersos, heterogéneos o variables son esos datos. Cuanto más pequeña sea una varianza de unos datos, más agrupados u homogéneos son dichos datos.

Uno de los problemas que habitualmente se le atribuye a la varianza es el hecho de que su unidad de medida no es la misma que la unidad de medida de la variable sobre la que se calcula. Es por ello que a la hora de describir la dispersión de una variable resulta más habitual el empleo de la desviación típica o estándar.

#### - **Desviación Estándar**

La desviación típica o desviación estándar (del inglés *Standard Deviation*), se la define como la raíz cuadrada de la varianza. Su principal virtud es que mantiene la misma unidad de medida que la variable para la que se aplica. La desviación estándar puede ser interpretada como una medida de incertidumbre. Se puede determinar mediante la siguiente fórmula.

$$\sigma = \sqrt{S_{n-1}^2}$$

#### **4.2.2. Ponderación**

Con los datos de partida antes mencionados de los isótopos estables, procedemos a determinar el valor medio final de las desviaciones isotópicas, ponderándolos con la precipitación (tabla Nº 30), con el objetivo de eliminar el peso de los datos isotópicos que se presentan con frecuencia extremos que corresponden a precipitaciones con volúmenes escasos, los cuales no son de gran importancia en hidrología.

En estudios de procesos atmosféricos y climáticos puede ser de interés trabajar con los datos de contenidos isotópicos sin ponderar con la precipitación (Díaz Teijeiro, y otros, 2009).

En el análisis de los datos, hemos tomado los periodos detallados en la tabla Nº 02 correspondientes años normales y no hidrológicos.

AÑO	$P_i$	$O^{18}_i$	$P_i * O^{18}_i$
<b>n</b>	$P_1$	$O^{18}_1$	$P_1 * O^{18}_1$
	$P_2$	$O^{18}_2$	$P_2 * O^{18}_2$
	.	.	.
	.	.	.
	.	.	.
	$P_{12}$	$O^{18}_{12}$	$P_{12} * O^{18}_{12}$

Tabla 3 Forma de ponderar los datos isotópicos

$$\delta^{18}O_n = \frac{\sum(P_i * O^{18}_i)}{\sum(P_i)}$$

Dónde:

$P_i$  : Precipitación acumulada al mes (mm)

$O^{18}_i$  : Proporción Isotópica mensual del Oxígeno 18 (‰)

Luego procedemos a determinar el resultado final de la proporción isotópica estable del  $\delta^{18}O$ , el cual corresponde a la media de todos los valores ponderados anuales de nuestro periodo de estudio para cada estación de medida.

Con respecto al valor medio final de la precipitación, esta corresponde a la media de los valores anuales de nuestro periodo de estudio, que a su vez corresponde a la sumatoria de la precipitación acumulada al mes.

#### 4.2.3. Regresión Lineal

Uno de los aspectos más importantes en el análisis de datos es determinar las relaciones que se dan entre dos variables aleatorias. Estas relaciones están muy frecuentemente ligado al análisis de una variable, llamada variable dependiente (Y), y del efecto que sobre ella tiene una o más variables llamadas variables independientes (X). Determinando así el grado de influencia que tiene la variable independiente sobre la variable dependiente; o si la relación es significativa o no, con el fin de aprovechar esa relación para predecir valores de la variable dependiente a partir de valores

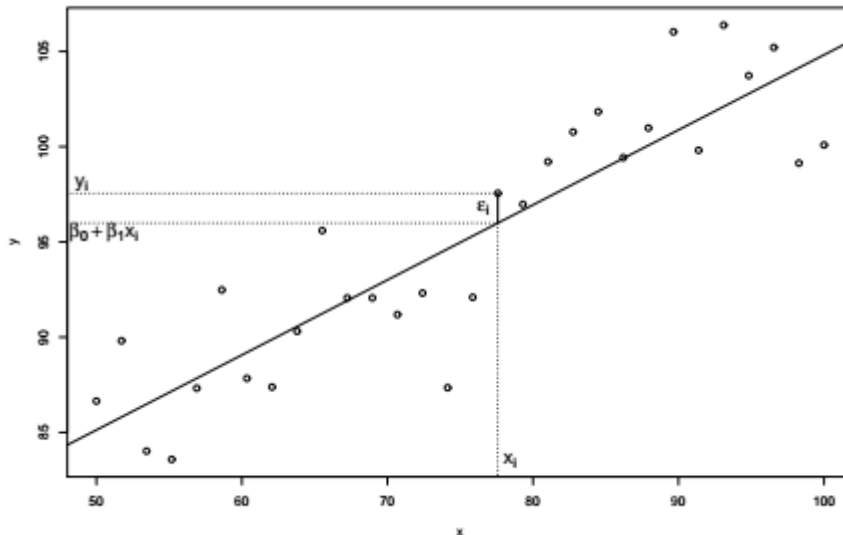
observados de la variable independiente. Un modelo de regresión lineal simple para una variable, Y (variable dependiente), dada otra variable, X (variable independiente), es un modelo matemático que permite obtener una fórmula capaz de relacionar Y con X basada sólo en relaciones lineales, del tipo:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon$$

Donde:

- **Y** representa a la variable dependiente, es decir, a aquella variable que deseamos estudiar en relación con otras.
- **X** representa a la variable independiente, es decir, aquellas que creemos que puede afectar en alguna medida a la variable dependiente. La estamos notando en mayúscula, indicando que podría ser una variable aleatoria, pero habitualmente se considera que es una constante que el investigador puede fijar a su antojo en distintos valores.
- $\varepsilon$  representa el error aleatorio, es decir, aquella cantidad (aleatoria) que provoca que la relación entre la variable dependiente y la variable independiente no sea perfecta, sino que esté sujeta a incertidumbre.
- $\beta_0$  es la ordenada al origen del modelo, es decir, el punto donde la recta intercepta o corta al eje y.
- $\beta_1$  representa la pendiente de la línea y, por tanto, puede interpretarse como el incremento de la variable dependiente por cada incremento en una unidad de la variable independiente.

La Figura Nº 08 representa una nube de puntos y la recta de regresión que los ajusta de unos datos genéricos. Podemos ver el valor concreto de  $\varepsilon = y - E [Y/x=x]$  para un dato, supuesto que hemos obtenido un modelo de regresión. En ella se puede ver también la interpretación de los coeficientes del modelo:



**Figura 9** diagrama de dispersión y línea de las medias hipotéticas

Lo que en primer lugar resultaría deseable de un modelo de regresión es que estos errores aleatorios ocurran en la misma medida por exceso que por defecto, sea cual sea el valor de  $X$ , de manera que  $E[\epsilon/x=x] = E[\epsilon] = 0$  y, por tanto,

$$\begin{aligned} E[Y/x=x] &= \beta_0 + \beta_1 X + E[\epsilon/x=x] \\ &= \beta_0 + \beta_1 X. \end{aligned}$$

Es decir, las medias de los valores de  $Y$  para un valor de  $X$  dado son una recta.

#### 4.2.3.1. Estimación de los Coeficientes de la Regresión Lineal

Si queremos obtener el modelo de regresión lineal que mejor se ajuste a los datos de la muestra, deberemos estimar los coeficientes  $\beta_0$  y  $\beta_1$  del modelo. Para ellos emplearemos el método de los mínimos cuadrados, ya que los estimadores de mínimos cuadrados coinciden con los estimadores máximo-verosímiles de  $\beta_0$  y  $\beta_1$ .

El razonamiento que motiva el método de mínimos cuadrados es el siguiente (Sáez Castillo, 2012):

- Si tenemos una muestra de valores de las variables independientes y dependientes.  $(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$ ,
- Buscaremos valores estimados de  $\beta_0$  y  $\beta_1$ ; que notaremos por  $\hat{\beta}_0$  y  $\hat{\beta}_1$ ; de manera que en el modelo ajustado,  $\hat{y}_x = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 X$ .

- Minimice la suma de los cuadrados de los errores observados. Recordemos que:  $E[Y|X=x] = \beta_0 + \beta_1 X$ .
- luego  $\hat{y}_x$  puede interpretarse de dos formas:
  - Como una predicción del valor que tomará **Y** si **X** = x
  - Como una estimación del valor medio de **Y** cuando **X** = x.
- Concretando, lo que buscamos es minimizar la suma de los cuadrados de los errores.

$$SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - (\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_i))^2$$

Es decir buscamos

$$(\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1) = \arg \left[ \min_{\beta_0, \beta_1} SSE \right]$$

Se llama recta de regresión por mínimos cuadrados (o simplemente recta de regresión) de **Y** dada **X** a la línea que tiene la **SSE** más pequeña de entre todos los modelos lineales (Sáez Castillo, 2012).

En este sentido, se define como medida de la calidad del ajuste de la recta de regresión el error estándar del ajuste como:

$$S_e = \sqrt{\frac{SSE}{n-2}} = \sqrt{\frac{\sum_i (y_i - (\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x))^2}{n-2}} = \sqrt{\frac{SS_{yy} - \hat{\beta}_1 SS_{xy}}{n-2}}$$

Cuanto mayor sea esta cantidad, peor son las predicciones de la recta de regresión.

Es importante que recordemos que  $\hat{\beta}_0$  y  $\hat{\beta}_1$  son sólo estimaciones de  $\beta_0$  y  $\beta_1$ , estimaciones basadas en los datos que se han obtenido en la muestra.

Una forma de hacernos conscientes de que se trata de estimaciones y no de valores exactos (es imposible conocer el valor exacto de ningún parámetro poblacional) es proporcionar las estimaciones de los errores estándar de las estimaciones de  $\beta_0$  y  $\beta_1$ . Se conoce que dichas estimaciones son:

$$s.e.(\hat{\beta}_1) = \sqrt{\frac{s_e^2}{SS_{xx}}}$$

$$s. e. (\hat{\beta}_0) = \sqrt{s_e^2 \left( \frac{1}{n} + \frac{\bar{x}^2}{SS_{xx}} \right)}$$

#### 4.2.3.2. El Coeficiente de Correlación Lineal

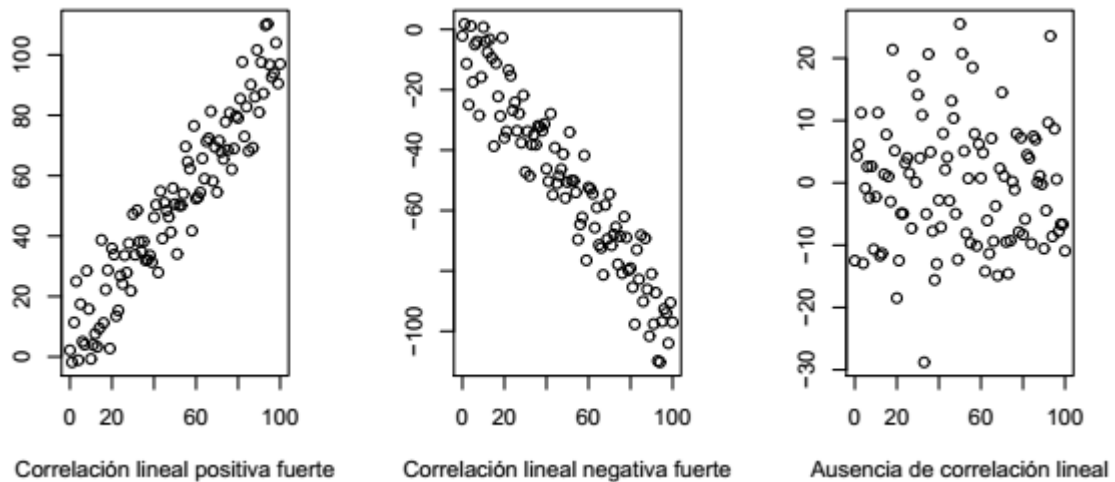
El coeficiente  $\hat{\beta}_1$  mide en cierto modo la relación que existe entre la variable dependiente y la variable independiente, ya que se interpreta como el incremento que sufre **Y** por cada incremento unitario de **X**. Sin embargo, es una medida sujeta a la escala de las variables **X** e **Y**, de manera que se hace difícil poder comparar distintos  $\hat{\beta}_1$ s entre sí.

El coeficiente de correlación lineal ofrece una medida cuantitativa de la fortaleza de la relación lineal entre **X** e **Y** en la muestra, pero que a diferencia de  $\hat{\beta}_1$ , es adimensional, ya que sus valores siempre están entre -1 y 1, sean cuales sean las unidades de medida de las variables (Sáez Castillo, 2012). Dada una muestra de valores de dos variables  $(x_1; y_1), \dots, (x_n; y_n)$ , el coeficiente de correlación lineal muestral  $r$  se define como.

$$r = \frac{SS_{xy}}{\sqrt{SS_{xx}SS_{yy}}} = \frac{\sqrt{SS_{xx}}}{\sqrt{SS_{yy}}} \hat{\beta}_1$$

Como comentábamos, la interpretación del valor de  $r$  es la siguiente:

- $r$  cercano o igual a 0 implica poca o ninguna relación lineal entre **X** e **Y**.
- Cuanto más se acerque a 1 ó -1, más fuerte será la relación lineal entre **X** e **Y**.
- Si  $r = \pm 1$ , todos los puntos caerán exactamente en la recta de regresión.
- Un valor positivo de  $r$  implica que **Y** tiende a aumentar cuando **X** aumenta, y esa tendencia es más acusada cuanto más cercano está  $r$  de 1.
- Un valor negativo de  $r$  implica que **Y** disminuye cuando **X** aumenta, y esa tendencia es más acusada cuanto más cercano está  $r$  de -1.



**Figura 10** valores de “*r*” y sus implicaciones

No podemos olvidar que el coeficiente de correlación lineal muestral, *r*, mide la correlación entre los valores de **X** y de **Y** en la muestra. Existe un coeficiente de correlación lineal similar pero que se refiere a todos los posibles valores de la variable. Evidentemente, *r* es un estimador de este coeficiente poblacional.

Dadas dos variables **X** e **Y**, el coeficiente de correlación lineal poblacional, **ρ**, se define como:

$$\rho = \frac{E[(X - EX)(Y - EY)]}{\sqrt{VarXVarY}} = \frac{\sqrt{VarX}}{\sqrt{VarY}} \beta_1$$

#### 4.2.3.3. Coeficiente de Determinación Lineal – R<sup>2</sup>

Este coeficiente valora hasta qué punto la variable independiente contribuye a predecir la variable dependiente. Para eso necesitamos que la recta explique **Y** en función de **X** porque **Y** tiene datos que presentan una cierta variabilidad, la cual la medimos como:

$$SS_{yy} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$$



De tal manera que cuanto más varíen los datos de  $Y$  mayor será  $SS_{yy}$ . Por otra parte, cuando ajustamos por la recta de regresión  $\hat{y}_x = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 X$ , medimos el error que cometemos en el ajuste con:

$$SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_x)^2$$

Las dos situaciones límite que se puedan presentar son:

- Si  $X$  no tiene ningún tipo de relación lineal con  $Y$ , entonces  $\rho = 0$ .
- Si la relación lineal entre  $X$  e  $Y$  es total, entonces  $\rho = 1$ .

Lo que deseamos es cuantificar lo cercano que estamos a cualquiera de estas dos situaciones. Dado que  $SSE$ , que es la medida del error de la recta de regresión, puede ir de 0 (mejor situación posible) a  $SS_{yy}$  (peor situación posible).

Se define el coeficiente de determinación lineal como.

$$r^2 = 1 - \frac{SSE}{SS_{yy}}$$

La interpretación de  $r^2$  es la medida en que  $X$  contribuye a la explicación de  $Y$  en una escala de 0 a 1, donde el 0 indica que el error es el total de la variación de los valores de  $Y$  y el 1 es la precisión total, el error 0.

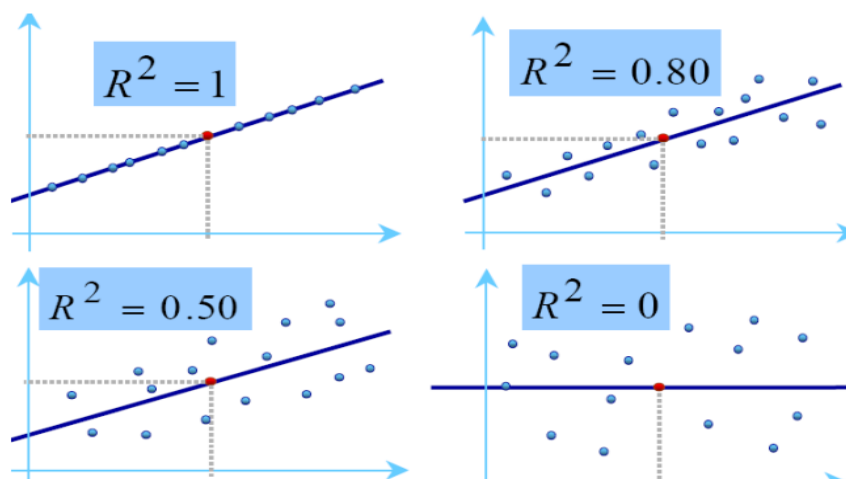


Figura 11: Representación gráfica del  $R^2$ , en función a la dispersión de los datos

#### 4.2.4. Contraste de Hipótesis

Una hipótesis es una suposición de algo posible o imposible para sacar de ello una o más consecuencias y sirve para iniciar una investigación o una argumentación.

Un análisis de hipótesis examina dos hipótesis opuestas sobre una población: la hipótesis nula y la hipótesis alternativa. La manera en que se configuran estas hipótesis depende de lo que se intenta demostrar.

- **Hipótesis Nula ( $H_0$ )**

La hipótesis nula establece que un parámetro de población es igual a un valor. La hipótesis nula suele ser una afirmación inicial que los investigadores especifican basándose en investigaciones previas o en su conocimiento, siendo una afirmación que no se rechaza salvo que el análisis de los datos demuestre lo contrario.

- **Hipótesis Alternativa ( $H_1$ )**

La hipótesis alternativa establece que el parámetro de población es diferente del valor del parámetro de población en la hipótesis nula. La hipótesis alternativa es lo que usted podría pensar que es cierto o espera probar que es cierto.

#### 4.2.5. Análisis Espacial

##### 4.2.5.1. Elaboración y Selección de Variogramas

En el análisis estructural realizaremos la estimación del variograma, ya que es una de las partes más importantes de la geoestadísticas.

Mediante el variograma podremos obtener información de la variable de estudio en un punto, a partir del conocimiento de otros puntos que se encuentran cerca de dicho punto (Moral García, 2003). El método empleado en la estimación de puntos va a tener en cuenta el variograma, ya que refleja el grado de correlación espacial de la variable (RODRIGO ILARRI, 2004).

Para estimar el variograma se debe conocer bien el fenómeno, con el fin de precisar los patrones de variabilidad espacial que puedan esperarse y su dependencia con la distancia (Moral García, 2003), ya que a mayor distancia **h** entre dos puntos donde se

mida un atributo  $z$ , mas distintos serán los valores del atributo en estudio de forma que, por consecuencia, mayor será el variograma. Debido a que el grado de persistencia de la variable cambia con la orientación del vector  $h$ , el variograma va a depender de la distancia y de la orientación de  $h$ . Por lo que para un vector  $h$  con una tolerancia  $\Delta h$ , es la media de las diferencias cuadráticas entre todas las parejas de datos separados por un vector  $u \pm \Delta h$ . (RODRIGO ILARRI, 2004).

$$\gamma(u) = \frac{1}{2N_h} \sum (Z(x) - Z(x + h \pm \Delta h))^2$$

donde  $\gamma$  es el variograma,  $z$  representa la variable en estudio y  $N_h$  es el número de parejas situadas dentro de la zona de estudio separadas por el vector  $h$  con una tolerancia  $\Delta h$ .

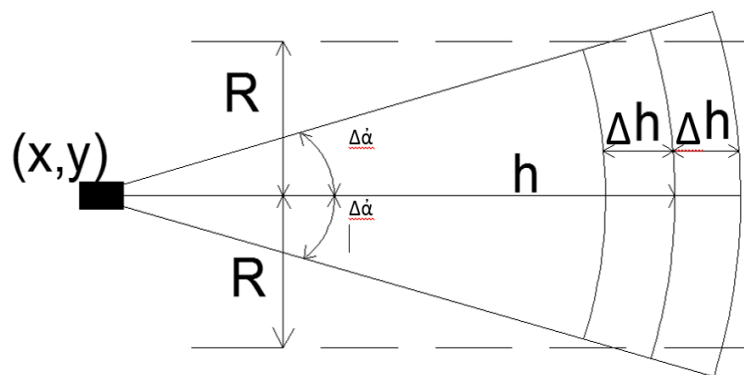


Figura 12 Rango de búsqueda para los pares de puntos del variograma.

En la figura N° 12 se muestra la región a considerar para el cálculo del valor del variograma, correspondiente a la que esta dentro de los limites del  $\Delta h$ . y una tolerancia direccional  $\Delta\alpha$ .

#### 4.2.5.2. Partes del Variograma

El variograma es una función monótona con tendencia a crecer, ya que al aumentar la distancia  $u$ , aumenta la diferencia  $|Z(x) - Z(x + h \pm \Delta h)|$ . Por lo que estará formada de varias etapas hasta que se vuelva una función estacionaria.

### a) Meseta

Es el valor límite que alcanza el variograma, que generalmente equivale a la varianza de  $Z$ . La meseta se alcanza para un valor  $u$  conocido como rango.

### b) Rango

El rango determina la zona de influencia en torno a un punto, más allá del cual la autocorrelación es nula. El incremento del variograma con la distancia indica como varia la influencia de una muestra al aumentar la distancia con respecto a ésta. Alcanzada la meseta, para  $u$ =rango, nos indicara que no hay correlación entre muestras separadas a una distancia mayor que el rango (Moral García, 2003).

### c) El Efecto Pepita

Hasta ahora lo que se pretende representar es la variación espacial de una variable regionalizada, ya que es un atributo continuo demasiado irregular como para que sea modelizado con una función matemática simple. Esta representación de la variación espacial viene dada por la siguiente ecuación:  $Z(x) = m + \varepsilon'(x) + \varepsilon''(x)$ . Donde  $Z(x)$  es la variable de estudio en un punto  $x$ ,  $m$  representa la función determinística (tendencia espacial)  $\varepsilon'(x)$  la componente correlacionada espacialmente pero localmente variable, y  $\varepsilon''(x)$  representa el error residual distribuido normalmente o ruido aleatorio. Si se distingue una tendencia espacial, se puede eliminar y tratar a los residuos como variable regionalizada (Moral García, 2003). Por lo que el efecto pepita (*nugget effect*) viene a ser representada por el error al modelizar la variable regionalizada en estudio, y se presenta en distancias cortas de nuestro variograma.

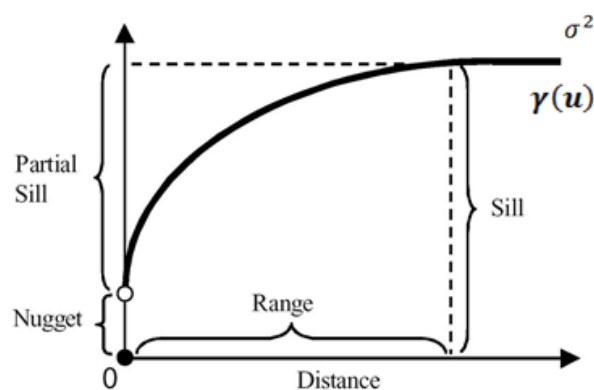


Figura 13 Partes de un variograma

#### 4.2.5.3. Variogramas Teóricos

Luego de determinar los puntos que componen nuestro variograma, debemos asignarle un modelo teórico a dichos puntos, que permita su utilización en el esquema de las técnicas geoestadísticas de estimación. Por lo que será necesaria la extensión del variograma al origen, lo que vendría hacer las distancias próximas a cero; ya que esta cercanía al origen caracteriza la continuidad y la regularidad espacial de la variable en estudio. Cuando una variable es muy regular en el origen mostrando un comportamiento cuadrático, se dice que es extraordinariamente continua. La continuidad no será extrema, si mostrara un comportamiento lineal. Cuando el comportamiento no es nada continuo y no se puede determinar la forma de la misma, entonces la variable no tendrá una correlación espacial.

Es conveniente elegir los variogramas teóricos en base a modelos ya conocidos, y no créalos debido a su dificultad que esto representa. Estos modelos se pueden combinar linealmente para obtener otros, pero no se pueden sustraerse ni definirse por intervalos (Moral García, 2003).

Los modelos básicos más empleados se desarrollan construyendo matemáticamente una función aleatoria y calculando su variograma teóricamente, imponiéndose la condición de funciones condicionadas positivas.

- **Modelo Efecto Pepita**

Corresponde a un fenómeno con comportamiento aleatorio, por la que la correlación entre los valores de la variable no existe, con independencia de su separación. **M** es el valor de la meseta.

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & \text{si } h = 0 \\ 1 & \text{para los otros casos} \end{cases}$$

- **Modelo esférico**

Muestra una creciente con tendencia lineal hasta una distancia “a” donde se estabiliza. Para el ajuste de los parámetros al modelo, la tangente en el origen alcanza la meseta para una distancia de 2/3 a.

$$\gamma(h) = \begin{cases} M\left(\frac{3h}{2a} - \frac{1}{2}\frac{h^3}{a^3}\right) & \text{si } h \leq a \\ 1 & \text{para los otros casos} \end{cases}$$

- **Modelo Exponencial**

Alcanza la meseta asintóticamente. Se considera que el rango “a” es la distancia para la cual el valor del variograma es del 95% de la meseta. Muestra un crecimiento lineal próximo al origen, de forma más rápida para luego estabilizarse gradualmente.

$$\gamma(h) = M\left(1 - \exp\left(-\frac{3h}{a}\right)\right)$$

- **Modelo Gaussiano**

Usualmente se emplea para modelar fenómenos muy continuos (Moral García, 2003). Muestra un modelo parabólico cerca del origen. Constituye el único modelo con un punto de inflexión.

$$\gamma(h) = M\left(1 - \exp\left(-\frac{3h^2}{a^2}\right)\right)$$

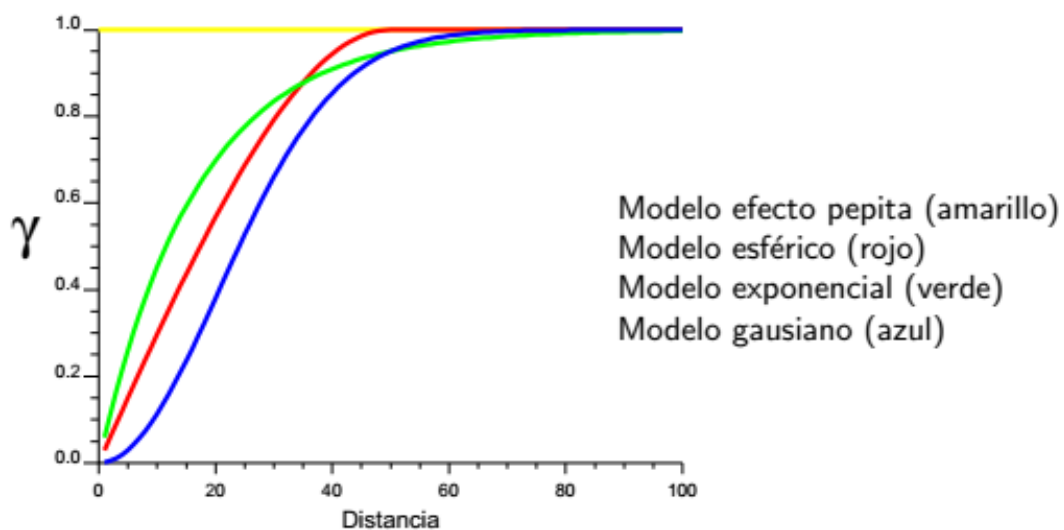


Figura 14 Modelos de Variogramas

Al seleccionar un modelo de variograma, estamos suponiendo la existencia de continuidad espacial. Este paso es muy importante ya que en la estimación nos dará resultados de muestras próximas muy precisas, si el fenómeno analizado es muy continuo; y si no lo es la obtención de estimaciones precisas pueden requerir la utilización de datos que estén a diversas distancias.

- **Estructuras Imbricadas**

Con el fin de modelar el variograma experimental con el variograma teórico, debemos de seleccionar un modelo básico que se ajuste a los datos disponibles. Por lo que es necesaria la utilización de dos o más modelos básicos para tener el mejor ajuste posible.

Cualquier combinación lineal de modelos condicionados positivos con coeficientes positivos, serán también un modelo condicionado positivo.

$$\gamma(h) = \sum_{i=1}^n |w_i| * \gamma_i(h)$$

No es necesario que los modelos básicos que se elijan para un modelo complejo sean todos del mismo tipo.

Tener en cuenta que si un modelo básico y otro imbricado se ajusta de igual forma al variograma experimental, respondiendo al principio de parsimonia, se debe escoger al modelo más simple, ya que la utilización de más estructuras imbricadas no es garantía de mejores resultados.

#### **4.2.5.4. Elección de los Parámetros del Modelo**

Para una adecuada obtención del variograma teórico debemos determinar una serie de parámetros del modelo seleccionado. Para lo que nos será de mucha ayuda la utilización de un software gráfico que nos permita una mejor interactividad, teniendo en cuenta las siguientes recomendaciones.

Según estudios pasados, se han demostrado que lo más importante en la determinación del modelo no es la forma analítica, si no la determinación de los rasgos

más importantes del fenómeno estudiado. Por orden de importancia primero es el efecto pepita, la pendiente en el origen, el rango, la meseta y la anisotropía (Moral García, 2003).

- **El efecto pepita y la pendiente en el origen.** El comportamiento del modelo en el origen es importante cuando se realiza en ajuste en el variograma, ya que influye bastante en el proceso de estimación. El efecto pepita se calcula extrapolando a partir de los primeros valores del variograma hasta el eje vertical, la utilización de muestreos a distancias muy reducidas puede ayudar a determinar valores precisos del efecto pepita. La pendiente puede calcularse a partir de 3 o 4 primeros valores del variograma.
- **El rango.** Representa el valor para lo cual el variograma se estabiliza. Para variables estacionarias suele coincidir con la varianza, pero en tendencias en gran escala esto no puede suceder. A medida que se tiene más datos, el rango del variograma experimental tiende a incrementarse.
- **La meseta.** Los modelos sin efecto pepita son los más fáciles de ajustar. En los modelos imbricados se suele igualar la varianza muestral a la suma de todas las mesetas de los modelos básicos.

A pesar de la existencia de varios métodos para justificar objetivamente la elección de un determinado modelo de un variograma, una decisión subjetiva bien documentada puede ser suficiente al determinar un modelo frente a cualquier prueba (Moral García, 2003).

#### 4.2.6. Estimación

El objetivo de un estudio geoestadístico es la caracterización de la variable en estudio en aquellos puntos no muestreados, partiendo de valores en puntos donde se conoce sus valores para luego construir un modelo de continuidad espacial; el mismo que nos ayudará a estimar aquellos valores en sitios no muestreados que deseamos conocer.



#### 4.2.6.1. Métodos de Estimación

En geoestadística, los métodos de estimación que se emplean están basados en combinaciones lineales ponderadas.

$$\text{Estimador} = z^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i * Z_i$$

Donde  $Z_1, Z_2, \dots, Z_n$ , son los  $n$  datos disponibles,  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$  son los pesos asignados a los datos  $Z_i$  y  $Z^*$  es el valor estimado.

Una buena comprensión de del fenómeno en estudio, así como de la geología del área experimental, permitirán determinar cuáles y cuantos son los datos muestrales que deben emplearse. Los pesos están estandarizados para que sumados siempre den 1.

- **Estimación Global y Local**

Una estimación global es la que se realiza dentro de una amplia zona de estudio, dentro de la cual existen diversos puntos muestrales.

Una estimación local se realiza en un área de estudio muy pequeña, en donde hay pocos puntos muestrales o ninguno, el cual obliga a seleccionar datos muestrales fuera del área en estudio.

El objetivo de una estimación global es la determinación de las características sobre toda el área en estudio, por lo que se realiza en las primeras fases de los trabajos; por lo que para satisfacer cualquier duda en el estudio es recomendable realizar estimaciones locales. Cuando las estimaciones son locales, además del agrupamiento de datos se debe considerar la distancia al punto a estimar. Las muestras más próximas al punto estimado tendrán unos pesos mayores que los más alejados.

Respecto al uso del kriging para la estimación global, los pesos obtenidos en el mismo pueden emplearse para la desagregación de las muestras, con objeto de realizar una estimación sobre la totalidad de la zona en estudio. La ventaja de esta alternativa es que, si la modelización del variograma ha sido correcta, se

tendrá en cuenta el patrón de continuidad espacial del atributo objeto de estudio (Moral García, 2003).

- **Estimación Puntual y de Bloque**

En base al área o región donde se realiza la estimación, se distingue entre estimación puntual, cuando la región es un pixel, y la estimación en bloque cuando el tamaño es mayor. El método de estimación dependerá del tamaño de lo que se desea estimar. En los trabajos relacionados con ciencia de la tierra el tamaño de las muestras es de gran importancia, ya que hay una relación entre dicho tamaño y la distribución de sus valores.

Al realizarse una estimación en bloque, la varianza de los datos se reduce y la distribución se hace más simétrica. Aunque existen diversos procedimientos matemáticos para ajustar una distribución, de tal forma que se reduzca su varianza mientras la media se mantiene inalterada, sin embargo, dependen de asunciones no verificables.

#### **4.2.7. La estimación Geoestadística: EL KRIGING**

Este método geoestadístico intenta optimizar la interpolación mediante la división de la variación espacial en tres componentes:

- a) La variación determinística; diferentes niveles o tendencias que pueden tratarse como información primaria.
- b) Las variaciones autocorrelacionadas espacialmente, pero difíciles de explicar físicamente.
- c) El ruido no correlacionado.

En las variaciones espaciales correlacionadas se tratan en funciones como el variograma, optimizando el peso y buscando los radios precisos de búsqueda de datos. Este método muestra una gran flexibilidad para la interpolación, incorporando información secundaria.

Los algoritmos de regresión lineal por mínimos cuadrados, denominados kriging, estima el valor desconocido de un atributo  $z$  en el punto de coordenadas  $u$ , a partir de  $n$  valores conocidos de  $z$ , cuyas coordenadas son  $u_{\alpha}$ ; con  $\alpha = 1, \dots, n$ .

#### 4.2.7.1. Propiedades Generales del KRIGING

El kriging es un método muy superior a los demás métodos de estimación, debido a que sus características son muy deseables. Los rasgos fundamentales son:

a) El kriging es un estimador BLUE:

<b>B</b>	<b>Best</b>	=	Error mínimo	:	$\sigma_E^2$ mínimo
<b>L</b>	<b>Linear</b>	=	Estimación lineal	:	$Z^* = \sum w_i Z(X_i)$
<b>U</b>	<b>Unbiased</b>	=	Insesgado	:	$E[Z^*] = E[Z]$
<b>E</b>	<b>Estimator</b>				

La minimización del error se realiza suponiendo que se conoce el variograma con exactitud. Pero esto no se da debido a que la estimación del variograma es un proceso difícil y no cuantificable.

- b) El kriging es un estimador exacto. Es decir:  $Z^*(x) = Z(x)$ , para todos los puntos muestrales. La varianza del kriging en esos puntos es nula  $\sigma_E^2(x) = 0$ , o sea, la incertidumbre es nula. Es por esta característica que se le valora más que el método del ajuste polinómico mediante mínimos cuadrados.
- c) Las ecuaciones del kriging, por tanto sus pesos, no dependen de los valores medidos de las variables, si no de sus posiciones y del variograma. Esto es interesante para algunas aplicaciones prácticas. Particularmente, la varianza del error de la estimación solo depende del variograma y de los pesos, solución de las ecuaciones del kriging, por tanto, independiente de los valores medidos (Moral García, 2003).

#### 4.2.7.2. Tipos de Kriging

Todos los estimadores del tipo kriging son variantes del estimador lineal básico:

$$Z^*(x) - m(x) = \sum_{i=1}^n w_i [Z(x_i) - m(x_i)]$$

Donde  $w_i$  son los pesos asignados a los datos  $Z(x_i)$ , los valores esperados de las variables aleatorias  $Z(x)$  y  $Z(x_i)$  son  $m(x)$  y  $m(x_i)$  respectivamente.

Cumpliendo con las condiciones de que el kriging es un estimador insesgado y con un error mínimo, se tiene que: (Moral García, 2003)

$$E[Z(x)] = m(x)$$

En función al modelo anterior, podemos describir los siguientes tipos de kriging.

##### a) Kriging Simple.

Considera que la media,  $m(x)$ , es conocida y constante en toda el área experimental.  
 $m(x) = m$ .

##### b) Kriging Ordinario

Considera las variaciones locales de la media, limitando el dominio de estacionariedad de la misma en un ámbito local:  $m(x) = constante$ , pero desconocida.

##### c) Kriging con un Modelo de Tendencia (Kriging Universal)

Considera la media desconocida, pero variando suavemente dentro de cada entorno local y, por tanto, en toda el área de estudio. El modelo de tendencia se modela como una combinación lineal de funciones,  $f_i(x)$ :

$$m(x) = \sum_{j=0}^k a_j(x) f_j(x)$$

Donde  $a_j(x)$  constantes pero desconocidas.

Por convención,  $f_0(x) = 1$ , por lo que cuando  $k=0$ , equivale al kriging ordinario.

#### 4.2.7.3. El kriging Ordinario

Este tipo del kriging es muy usado, ya que en la práctica la media no es uniforme en toda el área de estudio y siempre varía localmente, y además, no se conoce.

El estimador lineal es una combinación de las  $n$  variables aleatorias,  $Z(x_i)$ , más la media local constante.

$$Z_{KO}^*(x) = \sum_{i=1}^n w_i Z(x_i) + \left[ 1 - \sum_{i=1}^n w_i \right] m(x)$$

Los  $n$  pesos  $w_i$  deben determinarse minimizando la varianza del error, con la restricción de ser una estimación insesgada.

La minimización de la varianza y con la condición de sesgo nulo, requiere la definición de la Lagrangiana, consistente en una función de pesos,  $w_i$ , y un parámetro de Lagrange,  $\lambda$ .

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1$$

Por la que la expresión del estimador por kriging ordinario se modifica tal que tiene la forma:

$$Z^*(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i)$$

#### 4.2.7.4. Entorno y Puntos Muestrales Para la Estimación

En una estimación local, se debe decidir los datos muestrales que nos brinden los mejores resultados, sin tener de usar todos los datos disponibles en nuestra área de estudio. Para ello procederemos de diferentes maneras, fijándonos en unos parámetros.

##### a) Tamaño del Entorno Alrededor del Punto a Estimar (*Neighbourhood*).

Usualmente se piensa que el sí usamos el todos los datos de nuestra área en estudio tendremos una mejor interpolación, pero esto no es así, ya que los puntos muestrales

lejos a los puntos que se desea estimar aportan una información muy escasa. Por lo que el kriging es un estimador eminentemente local.

Como un punto de partida, la determinación del tamaño de del entorno es el rango del variograma; por lo que los puntos más cercanos al origen representan una mejor dependencia espacial entre los mismos.

**b) Número Mínimo de Puntos Muestrales a Considerar en una Estimación (Neighbours)**

Para una adecuada interpolación se recomienda tener una cantidad suficiente de puntos. El entorno del área alrededor del punto a interpolar se verá reducido si existe una escasa cantidad de puntos muestrales, por lo que es aceptable usar hasta 2 o 3 puntos siempre que no se afecte el área que se desea interpolar.

**c) Número Máximo de Puntos Muestrales a Considerar en la Estimación**

Se puede emplear un número alto de puntos muestrales, haciendo que el peso de cada punto sea tan pequeño que podrían eliminarse dichos puntos; por lo que no hay razón de aumentar tanto el número de puntos muestrales.

**4.2.8. SGeMS - Stanford Geostatistical Modeling Software**

El software de modelado geoestadístico de Stanford, SGeMS, fue desarrollado en la Universidad de Stanford, siendo el sucesor natural de GSLib (Geostatistical Software Library) la que se realizó en la misma universidad y por el mismo grupo de investigación. Implementa varios algoritmos de geoestadística para el modelado de sistemas terrestres y, más generalmente, fenómenos distribuidos en el espacio-tiempo (R E M Y, y otros, 2009).

El SGeMS fue desarrollado con el fin de cumplir dos objetivos:

- a) El primero, proporcionar al usuario un software fácil de usar que ofrece una amplia gama de herramientas de geoestadística: se aplican los algoritmos de geoestadística más comunes, además de desarrollos más recientes como la

simulación de estadísticas de varios puntos. El usuario se familiariza fácilmente con el software gracias a su interfaz gráfica, ya que esta es no invasiva y brinda la posibilidad de visualizar directamente conjuntos de datos y resultados en un entorno interactivo 3D completo.

- b) Segundo objetivo era diseñar un software que respondiera a las necesidades de los usuarios especializados de ampliar las capacidades de SGeMS, ya que la mayoría de las operaciones realizadas utilizando la interfaz gráfica también se pueden ejecutar mediante programación. SGeMS posee un soporte integrado para el lenguaje de scripting de Python, que permite la creación de macros simples hasta completar las aplicaciones anidadas con una interfaz gráfica independiente. Las nuevas características se pueden agregar convenientemente a SGeMS a través de un sistema de complementos, es decir, piezas de software que no se pueden ejecutar por sí mismos, sino que complementan un software principal.

Respecto a las ecuaciones, estas son las mismas que ya se detallaron anteriormente, tanto para el análisis estructural, variograma, como para la estimación de valores, Kriging Ordinario.

En la imagen N° 14, se pueden apreciar las partes que componen la ventana principal del software. Las que son:

- a) La barra del menú principal, el mismo que me permite gestionar el proyecto.
- b) El panel de algoritmos, nos permite seleccionar y ejecutar la herramienta geoestadística y la determinación de los parámetros que se van a emplear.
- c) El panel de visualización, lugar donde visualizaremos los objetos.
- d) El panel de comandos, nos permite controlar la ejecución del software e interactuar con él; esta parte es muy usada por los usuarios con conocimiento en programación.

ELABORACIÓN DE MAPAS DE CONTENIDOS ISOTÓPICOS de O-18 EN LA PRECIPITACIÓN SOBRE LA PENÍNSULA IBÉRICA POR MEDIO DE TÉCNICAS GEOESTADÍSTICAS

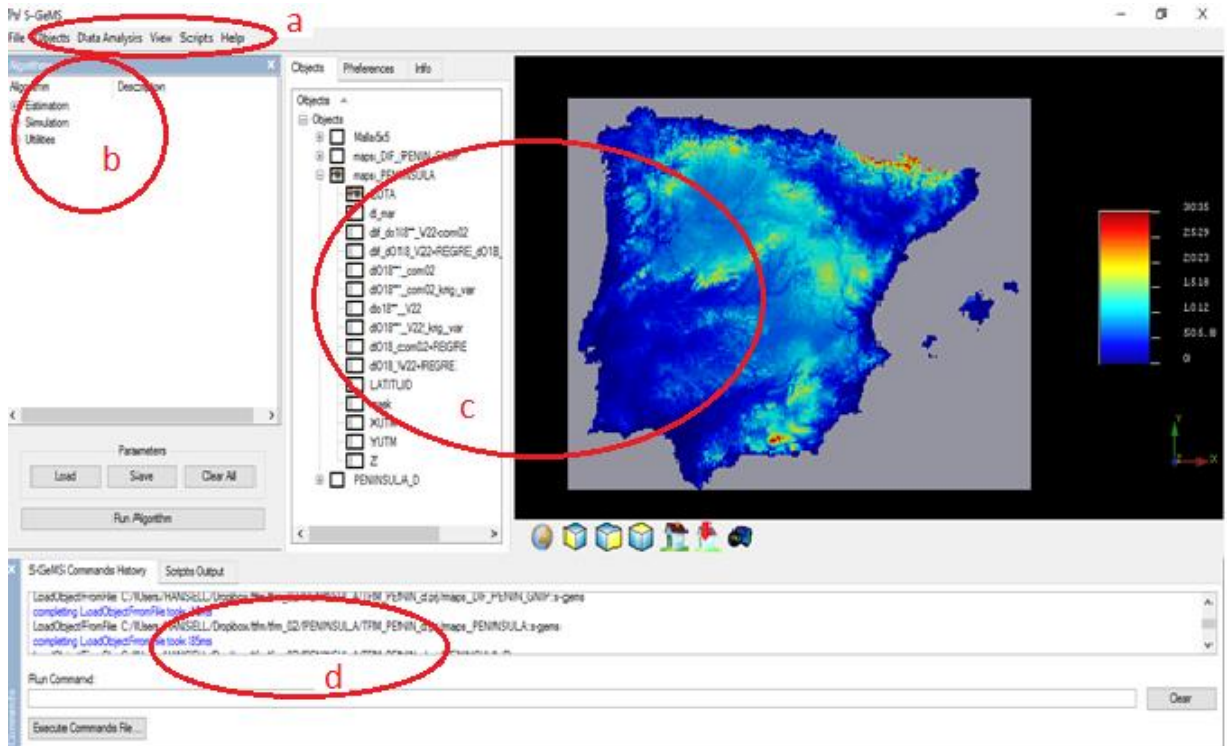


Figura 15 Vista del SeGMS



## **V. RESULTADOS**

En esta parte del proyecto nombraremos e interpretaremos los resultados obtenidos luego del desarrollo de la metodología descrita en el capítulo anterior. Respecto a la toma de datos isotópicos, estos se obtuvieron de la REVIP y de la GNIP como se detalla en los apartados 3.1 y 4.1.2 del presente informe.

Siguiendo con la metodología, se procedió a la ponderación de los datos isotópicos con la cantidad de precipitación correspondiente a cada mes, como se detalla en el apartado 4.2.2 para cada estación. De donde pudimos observar el comportamiento isotópico a lo largo del periodo temporal.

### **5.1. Representaciones Gráficas de las Estaciones**

Antes de ponderar los datos isotópicos, procedemos a graficar los resultados con el fin de observar su tendencia en el periodo de estudio.

Se realizaron gráficas que representan el promedio de meses para los datos isotópicos y para las precipitaciones correspondientes al mismo mes, con el fin de determinar la relación del contenido isotópico y de la intensidad de precipitación, correspondientes al mes en que fueron tomados dichos datos. Del mismo modo se realizó gráficas que representan los promedio por estaciones, con estas gráficas determinamos la tendencia del contenido isotópico en periodos húmedos (invierno y otoño) y en periodos secos (primavera y verano). Y una representación de los promedios anuales con sus respectivas medidas isotópicas, con el fin de observar si existe tendencia de los contenidos isotópicos a lo largo de los periodos en estudio.

Las gráficas de cada estación se detallan en el apartado 8.1 de Anexos, en ellas podemos apreciar los comportamientos mensuales, estacionales y anuales de los periodos de estudios de cada estación.

## 5.2. Ponderación de Datos Isotópicos

En esta parte del proyecto se sigue con el procedimiento detallado en el apartado 4.2.2, los cuales los resultados se detallan en el cuadro Nº 05, posterior a esto se encontraron las medias de cada estación, las cuales corresponden a las medias de todos los años en estudio los mismos que se detallan en el cuadro Nº 04

País	Estación	Cota (m s.n.m.)	Prec. Media (mm)	$\delta^{18}\text{O}$ pond. (‰)
España	La Coruña	58.00	962.88	-5.18
	Santander	52.00	1021.64	-5.72
	Morón	87.00	520.80	-4.92
	Cáceres	405.00	520.04	-6.27
	Ciudad Real	627.00	389.51	-7.37
	Madrid	667.00	366.43	-7.20
	Valladolid	735.00	425.64	-7.97
	León	916.00	581.72	-8.44
	Palma de Mallorca	3.00	457.39	-6.08
	Almería	20.00	186.19	-5.61
	Valencia	11.00	435.67	-5.30
	Tortosa	48.00	489.42	-5.43
	Murcia	62.00	255.10	-5.39
	Zaragoza	247.00	322.24	-6.31
	Gerona	127.00	571.97	-5.96
Portugal	Faro	9.00	386.20	-4.70
	Porto	93.00	1069.29	-4.58
	Beja	246.00	594.44	-5.17
	Portalegre	597.00	802.48	-5.88
	Penhas Douradas	1380.00	1487.68	-7.67
	Vila Real	481.00	772.00	-6.37
	Braganca	690.00	662.67	-7.56
Reino Unido	Gibraltar	5.00	629.94	-4.62

Tabla 4 Medias de isotopos estables y de precipitación de cada estación de la península Ibérica.



### 5.3. Desviación Estándar de los Datos

En esta parte del proyecto se determinó la desviación estándar de los datos correspondientes a la tabla N° 05, con el fin de ver la variabilidad de estos a lo largo del periodo de estudio. Luego en base a la desviación estándar de cada estación asignamos un peso en base 5, el mismo que tendrá la estación más estable o la que presente una desviación estándar menor, si bien la estación de Braganca presenta la desviación estándar más baja se optó por escoger como referencia la estación de Santander por presentar una mayor cantidad de datos. La estimación de los pesos sigue la relación de  $((\sigma \text{ de Santander} / \sigma_i) * 5)$ . Los resultados se detallan en la tabla N° 06

Estación	Desviación Estandar	Peso
<b>ESPAÑA</b>		
Almería	1.05	2
Cáceres	0.49	4
Ciudad Real	0.80	2
Gerona	0.73	2
La Coruña	0.85	2
León.	1.04	2
Madrid.	0.86	2
Morón.	0.51	4
Murcia	1.22	1
Palma de Mallorca	0.67	3
Santander	0.36	5
Tortosa.	0.64	3
Valencia	0.69	3
Valladolid	0.72	2
Zaragoza.	0.72	3
<b>OTROS</b>		
GIBRALTAR	0.97	2
<b>PORTUGAL</b>		
FARO	0.83	2
PORTALEGRE	0.55	3
VILA REAL	0.43	4
PENHAS DOURADAS	0.48	4
PORTO	0.74	2
BRAGANCA	0.31	6
BEJA	0.80	2

Tabla 6 Desviación estándar y pesos asignados a cada estación

#### 5.4. Isótopos Estables Ponderados

Una vez determinada la desviación estándar y los pesos de cada estación, procedemos a determinar las relaciones que tiene con las variables geográficas, para lo cual clasificamos las estaciones según su ubicación y vertientes.

En el cuadro N<sup>o</sup> 07 se muestra la clasificación hecha a las estaciones.

País	Estación	Cota (m.s.n.m.)	Prec. Media (mm)	$\delta^{18}\text{O}$ pond. (‰)	Desviación Estándar ( $\sigma$ )	Pesos (5)
España	<b>1. Vertiente atlántica</b>					
	<b>1.a. Costeras</b>					
	La Coruña	58.00	962.88	-5.18	0.85	2
	Santander	52.00	1021.64	-5.72	0.36	5
	<b>1.b. Continentales</b>					
	Morón	87.00	520.80	-4.92	0.51	4
	Cáceres	405.00	520.04	-6.27	0.49	4
	Ciudad Real	627.00	389.51	-7.37	0.80	2
	Madrid	667.00	366.43	-7.20	0.86	2
	Valladolid	735.00	425.64	-7.97	0.72	2
	León	916.00	581.72	-8.44	1.04	2
	<b>2. Vertiente Mediterránea</b>					
	<b>2.a. Insulares</b>					
	Palma de Mallorca	3.00	457.39	-6.08	0.67	3
	<b>2.b. Costeras</b>					
	Almería	20.00	186.19	-5.61	1.05	2
	Valencia	11.00	435.67	-5.30	0.69	3
<b>2.c. Continentales</b>						
Tortosa	48.00	489.42	-5.43	0.64	3	
Murcia	62.00	255.10	-5.39	1.22	1	
Zaragoza	247.00	322.24	-6.31	0.72	3	
Gerona	127.00	571.97	-5.96	0.73	2	
Portugal	<b>1. Vertiente atlántica</b>					
	<b>1.a. Costeras</b>					
	Faro	9.00	386.20	-4.70	0.83	2
	Porto	93.00	1069.29	-4.58	0.74	2
	<b>1.b. Continentales</b>					
	Beja	246.00	594.44	-5.17	0.80	2
	Portalegre	597.00	802.48	-5.88	0.55	3
	Penhas Douradas	1380.00	1487.68	-7.67	0.48	4
Vila Real	481.00	772.00	-6.37	0.43	4	
Braganca	690.00	662.67	-7.56	0.31	6	
Reino Unido	<b>1. Vertiente Mediterránea</b>					
	<b>1.a. Costeras</b>					
Gibraltar	5.00	629.94	-4.62	0.97	2	

Tabla 7 Clasificación según la ubicación de las estaciones

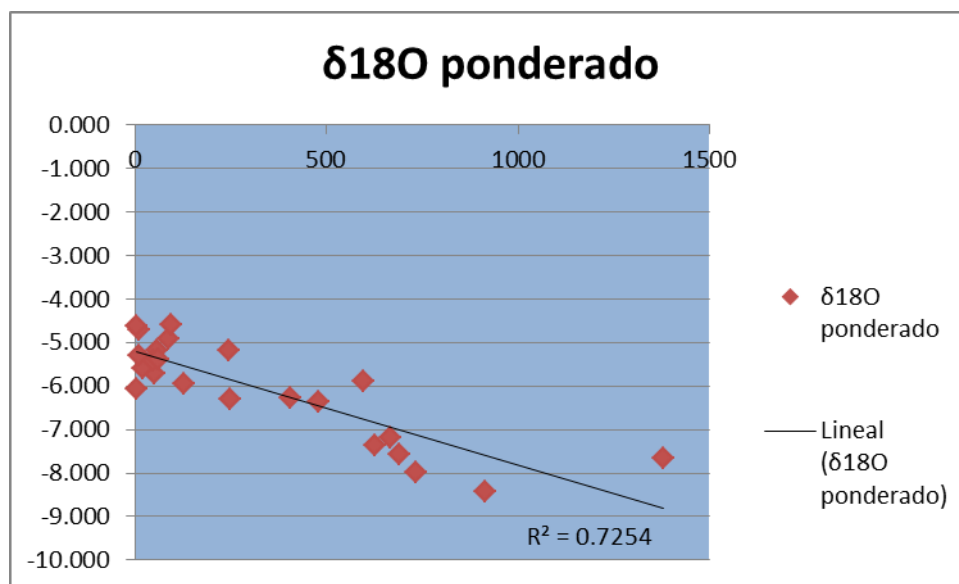
Con respecto a su ubicación se clasificó teniendo en cuenta si son costeras, continentales o insulares. Se les denominó estaciones costeras a aquellas que están por debajo de los 100 metros de altitud y menos a 6 kilómetros de distancia al mar, continentales son aquellas que pasan los 100 metros de altura y están ubicadas a más de 6 kilómetros de distancia al mar, y por último insulares son aquellas que se ubican en islas.

### 5.5. Relación entre $\delta^{18}\text{O}$ y los Variables Geográficas

Se realiza un análisis entre los valores isotópicos de las estaciones con los variables geográficas (altitud, latitud y cercanía al mar) de las estaciones, con el fin de determinar que parámetro es más influyente y poder establecer un orden al momento de realizar nuestras ecuaciones de regresión lineal. Debemos mencionar que el análisis de estas relaciones se realizó sin brindar el peso a las estaciones en función de las desviaciones estándar de cada estación.

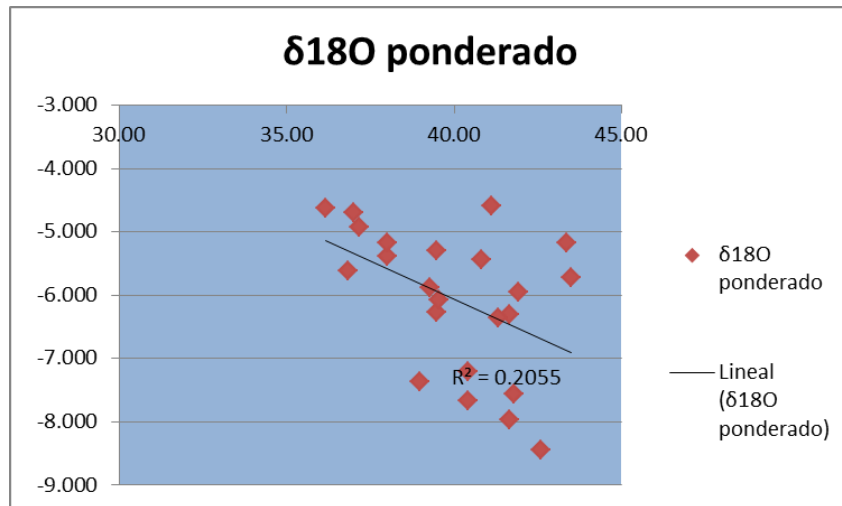
#### 5.5.1. $\delta^{18}\text{O}$ Vs Altitud

Entre el isótopo  $\delta^{18}\text{O}$  y la altitud donde se encuentran las estaciones, se pudo determinar que existe una relación muy fuerte ya que el coeficiente de correlación lineal, R, es de 0.852 y su  $R^2$  es de 0.725.



### 5.5.2. $\delta^{18}\text{O}$ Vs Latitud

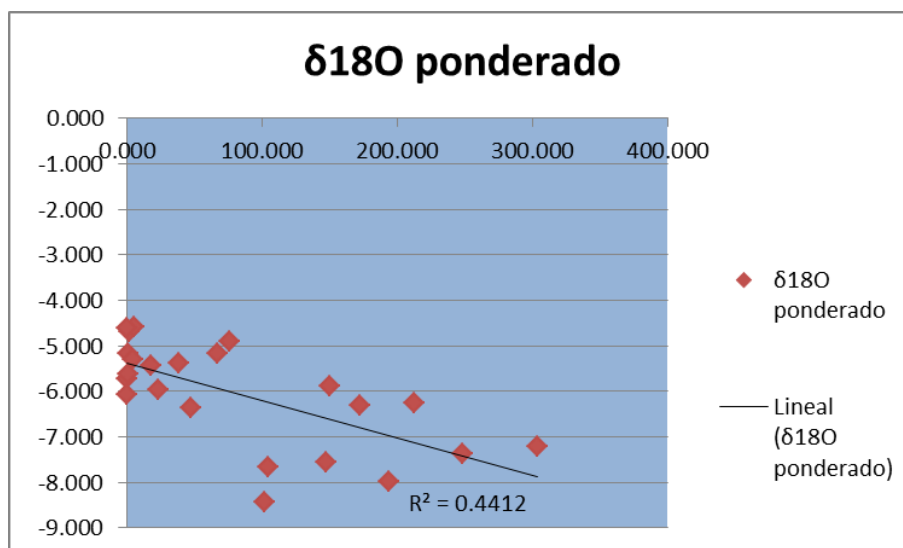
Entre el isótopo  $\delta^{18}\text{O}$  y la latitud donde se encuentran las estaciones, se pudo determinar que existe una relación moderada no tan fuerte como la que presenta la altitud, ya que el coeficiente de correlación lineal, R, es de 0.453 y su  $R^2$  es de 0.206.



Gráfica 2  $\delta^{18}\text{O}$  ponderado Vs Latitud

### 5.5.3. $\delta^{18}\text{O}$ Vs Distancia al Mar

Entre el isótopo  $\delta^{18}\text{O}$  y la distancia al mar donde se encuentran las estaciones, se pudo determinar que existe una relación moderada no tan fuerte como la que presenta la altitud y a la vez más fuerte que con la latitud, ya que el coeficiente de correlación lineal, R, es de 0.664 y su  $R^2$  es de 0.4412.



Gráfica 3  $\delta^{18}\text{O}$  ponderado Vs Distancia al mar

## 5.6. Ecuaciones de Regresión Lineal

Una vez determinada las relaciones que existe entre  $\delta^{18}O$  y los variables geográficas, establecemos nuestro orden de cómo elaboraremos nuestras ecuaciones de regresión lineal.

Para la elaboración de estas ecuaciones daremos más peso a las estaciones en las que la desviación estándar es menor, ya que estas nos garantizan un comportamiento más estable de los datos. Descartando así posibles errores que se pudieran haber suscitado en la toma de datos o a fenómenos climáticos no muy comunes que se dan solo en un determinado lugar y tiempo, y no sobre toda nuestra área de estudio.

Como ya se había indicado, hemos optado por realizar una metodología de regresión – Kriging para mapear el  $\delta^{18}O$  sobre la península Ibérica. Para ello el primer paso es elaborar las ecuaciones de regresión lineal, con el fin de ir descontando la influencia de las variables geográficas como la altitud y latitud. Este procedimiento se realiza con el fin de obtener una variable estandarizada del isótopo estable al que llamaremos  $\delta^{18}O^{**}$ , el mismo que no tendrá la influencia de la latitud y altitud. Para después estimar los valores del  $\delta^{18}O^{**}$  sobre nuestra área de estudio, a los que después devolveremos los efectos ocasionados por la altitud y latitud, obteniendo así los valores  $\delta^{18}O$  deseados sobre nuestra área de estudio.

### 5.6.1. Regresión Lineal con las Variables geográficas

Como se pudo ver en el apartado 5.5 existe una relación muy marcada del  $\delta^{18}O$  con la latitud y más aun con la altura donde se origina, esto responde al efecto de la continental, a medida que van ingresando al continente el contenido isotópico se va empobreciendo, lo que asumimos es que ese empobrecimiento o fraccionamiento isotópico es originado por efectos de la altura y latitud, y que llegara a un punto en donde no guarde relación el  $\delta^{18}O$  con los variables geográficas (latitud y altitud). Asumiendo que la correlación nula será en la estación de Madrid (Lat. 40.41N y Alt. 667 m.s.n.m.), descontaremos el efecto de los variables geográficas desde las estaciones que se encuentran cerca del mar hasta la estación de Madrid con el fin de obtener nuestra variable estandarizada  $\delta^{18}O^{**}$ .



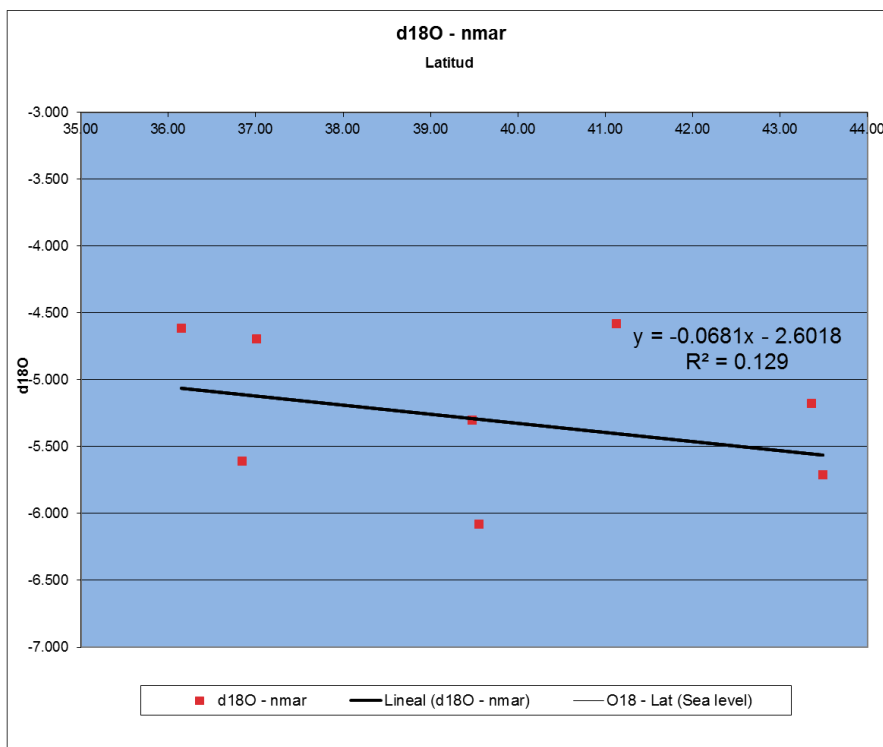
Los pasos para determinar nuestra variable estandarizada se detallan en la introducción del capítulo IV, cuyos resultados son los siguientes:

**1) Regresión de las Estaciones a Nivel del Mar del  $\delta^{18}O$  y la Latitud.**

Con las estaciones señaladas en la tabla N° 08 realizamos una regresión lineal con el fin de observar la relación del  $\delta^{18}O$  con la latitud de las estaciones cerca al mar.

	Estación	Cota (m.s.n.m.)	Prec. Media (mm)	$\delta^{18}O$ pond. (‰)	Desviación Estándar ( $\sigma$ )	Pesos (5)
<b>Península</b>	<b>Estaciones a Nivel del Mar</b>					
	La Coruña	58.00	962.88	-5.18	0.85	2
	Santander	52.00	1021.64	-5.72	0.36	5
	Palma de Mallorca	3.00	457.39	-6.08	0.67	3
	Almería	20.00	186.19	-5.61	1.05	2
	Valencia	11.00	435.67	-5.30	0.69	3
	Faro	9.00	386.20	-4.70	0.83	2
	Porto	93.00	1069.29	-4.58	0.74	2
	Gibraltar	5.00	629.94	-4.62	0.97	2

**Tabla 8 Estaciones ubicadas cerca al mar.**



**Gráfica 4 Relación del  $\delta^{18}O$  Vs Lat. Cerca al mar**

De la gráfica Nº 04 podemos decir que la ecuación de regresión lineal entre el  $\delta^{18}\text{O}$  y la latitud de las estaciones a nivel del mar es:

$$\delta^{18}\text{O} = -0.0681\text{Lat} - 2.6018, R = -0.3592; R^2 = 0.129$$

## 2) Obtenemos $\delta^{18}\text{O}^*$

$\delta^{18}\text{O}^*$  corresponde a la variable estandarizada sin el efecto de la latitud, tomando como referencia la correlación nula en la estación "El Retiro" de Madrid (Lat. 40.41N). A la ecuación obtenida en la parte 1 descontamos la influencia de la tendencia de la latitud, por lo que sumamos un término de  $0.0681 * (\text{Lat.} - 40.41)$ . Por lo que nuestra ecuación  $\delta^{18}\text{O}^*$  será.

$$\delta^{18}\text{O}^* = \delta^{18}\text{O} + 0.0681x(\text{Lat} - 40.41)$$

## 3) Regresión de $\delta^{18}\text{O}^*$ y la Altitud

La transformación de  $\delta^{18}\text{O}^*$  lo realizamos en todas las estaciones, como se muestran en la tabla Nº 09, y realizamos una ecuación de regresión lineal entre estos valores y la altitud de cada estación. Con el fin de determinar su relación. De la gráfica Nº 05 podemos decir que la ecuación de regresión lineal entre el  $\delta^{18}\text{O}^*$  y la altitud de las estaciones es:

$$\delta^{18}\text{O}^* = -0.0023\text{Alt} - 5.3494, R = -0.8557; R^2 = 0.7322$$

## 4) Obtenemos $\delta^{18}\text{O}^{**}$

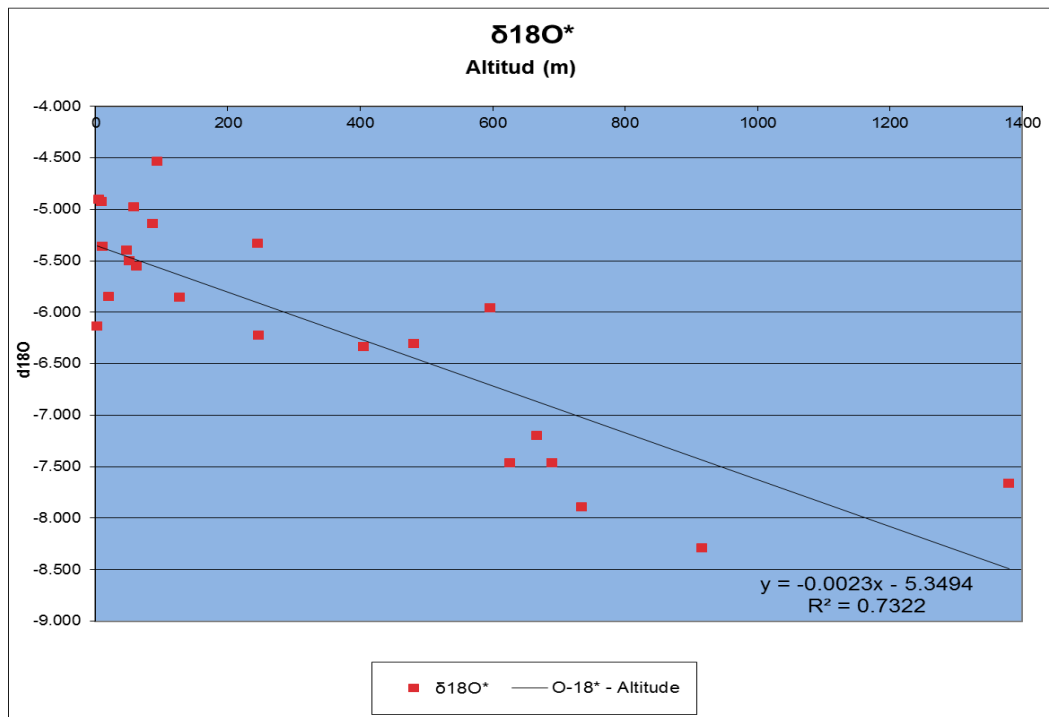
$\delta^{18}\text{O}^{**}$  corresponde a la variable estandarizada sin el efecto de la latitud y altitud, tomando como referencia la correlación nula en la estación "El Retiro" de Madrid (Lat. 40.41N y altitud 667 m.s.n.m.). A la ecuación obtenida en la parte 3 descontamos la influencia de la tendencia de la latitud, por lo que sumamos un término de  $0.0023 * (\text{Alt.} - 667)$ . Por lo que nuestra ecuación  $\delta^{18}\text{O}^{**}$  será.

$$\delta^{18}\text{O}^{**} = \delta^{18}\text{O}^* + 0.0023x(\text{Alt} - 667)$$

ELABORACIÓN DE MAPAS DE CONTENIDOS ISOTÓPICOS de O-18 EN LA PRECIPITACIÓN SOBRE LA PENÍNSULA IBÉRICA POR MEDIO DE TÉCNICAS GEOESTADÍSTICAS

	Estación	Cota (m.s.n.m.)	Prec. Media (mm)	$\delta^{18}\text{O}$ pond. (‰)	$\delta 18\text{O}^*$	Pesos (5)
<b>Península</b>	La Coruña	58.00	962.88	-5.18	-4.98	2
	Santander	52.00	1021.64	-5.72	-5.51	5
	Morón	87.00	520.80	-4.92	-5.14	4
	Cáceres	405.00	520.04	-6.27	-6.33	4
	Ciudad Real	627.00	389.51	-7.37	-7.46	2
	Madrid	667.00	366.43	-7.20	-7.20	2
	Valladolid	735.00	425.64	-7.97	-7.89	2
	León	916.00	581.72	-8.44	-8.29	2
	Palma de Mallorca	3.00	457.39	-6.08	-6.14	3
	Almería	20.00	186.19	-5.61	-5.85	2
	Valencia	11.00	435.67	-5.30	-5.37	3
	Tortosa	48.00	489.42	-5.43	-5.40	3
	Murcia	62.00	255.10	-5.39	-5.55	1
	Zaragoza	247.00	322.24	-6.31	-6.22	3
	Gerona	127.00	571.97	-5.96	-5.85	2
	Faro	9.00	386.20	-4.70	-4.93	2
	Porto	93.00	1069.29	-4.58	-4.53	2
	Beja	246.00	594.44	-5.17	-5.34	2
	Portalegre	597.00	802.48	-5.88	-5.96	3
	Penhas Douradas	1380.00	1487.68	-7.67	-7.67	4
Vila Real	481.00	772.00	-6.37	-6.30	4	
Braganca	690.00	662.67	-7.56	-7.47	6	
Gibraltar	5.00	629.94	-4.62	-4.91	2	

Tabla 9 Valores del  $\delta^{18}\text{O}^*$  para todas las estaciones



Gráfica 5 Relación del  $\delta^{18}\text{O}^*$  Vs Altitud

ELABORACIÓN DE MAPAS DE CONTENIDOS ISOTÓPICOS de O-18 EN LA PRECIPITACIÓN SOBRE LA PENÍNSULA IBÉRICA POR MEDIO DE TÉCNICAS GEOESTADÍSTICAS

En la tabla N<sup>o</sup> 10 se muestra el resumen de todas las variables estandarizadas que se han creado, siendo las más importante  $\delta^{18}\text{O}^{**}$  ya que esta sin efecto de la latitud y altitud, y es a quien realizaremos un análisis de continuidad espacial.

País	Estación	Cota (m.s.n.m.)	Prec. Media (mm)	$\delta^{18}\text{O}$ pond. (‰)	$\delta^{18}\text{O}^*$	$\delta^{18}\text{O}^{**}$	Pesos (5)
España	<b>1. Vertiente atlántica</b>						
	<b>1.a. Costeras</b>						
	La Coruña	58.00	962.88	-5.18	-4.98	-6.38	2
	Santander	52.00	1021.64	-5.72	-5.51	-6.92	5
	<b>1.b. Continentales</b>						
	Morón	87.00	520.80	-4.92	-5.14	-6.47	4
	Cáceres	405.00	520.04	-6.27	-6.33	-6.94	4
	Ciudad Real	627.00	389.51	-7.37	-7.46	-7.56	2
	Madrid	667.00	366.43	-7.20	-7.20	-7.20	2
	Valladolid	735.00	425.64	-7.97	-7.89	-7.73	2
	León	916.00	581.72	-8.44	-8.29	-7.72	2
	<b>2. Vertiente Mediterránea</b>						
	<b>2.a. Insulares</b>						
	Palma de Mallorca	3.00	457.39	-6.08	-6.14	-7.67	3
	<b>2.b. Costeras</b>						
	Almería	20.00	186.19	-5.61	-5.85	-7.34	2
	Valencia	11.00	435.67	-5.30	-5.37	-6.88	3
<b>2.c. Continentales</b>							
Tortosa	48.00	489.42	-5.43	-5.40	-6.83	3	
Murcia	62.00	255.10	-5.39	-5.55	-6.94	1	
Zaragoza	247.00	322.24	-6.31	-6.22	-7.19	3	
Gerona	127.00	571.97	-5.96	-5.85	-7.10	2	
Portugal	<b>1. Vertiente atlántica</b>						
	<b>1.a. Costeras</b>						
	Faro	9.00	386.20	-4.70	-4.93	-6.44	2
	Porto	93.00	1069.29	-4.58	-4.53	-5.86	2
	<b>1.b. Continentales</b>						
	Beja	246.00	594.44	-5.17	-5.34	-6.30	2
	Portalegre	597.00	802.48	-5.88	-5.96	-6.12	3
	Penhas Douradas	1380.00	1487.68	-7.67	-7.67	-6.03	4
	Vila Real	481.00	772.00	-6.37	-6.30	-6.73	4
Braganca	690.00	662.67	-7.56	-7.47	-7.41	6	
Reino Unido	<b>1. Vertiente Mediterránea</b>						
	<b>1.a. Costeras</b>						
Gibraltar	5.00	629.94	-4.62	-4.91	-6.43	2	

Tabla 10 Resultados de la Variable Estandarizada  $\delta^{18}\text{O}^{**}$

## 5.7. Variograma

Luego de obtener los resultados  $\delta^{18}\text{O}^{**}$  representados en la tabla N° 10, realizamos un análisis espacial de estos valores mediante un variograma, fijándonos mucho en los pares de puntos que se forman al origen del variograma, ya que estos representaran mejor la continuidad espacial de la variable estandarizada y la relación que existe entre las variables más cercanas entre sí.

### 5.7.1. Variograma Experimental

En la figura N° 16 se muestran los parámetros de búsqueda de pares de puntos para nuestro variograma. Realizaremos un variograma experimental omnidireccional.

Los parámetros para nuestro variograma es el Number of Lags es 5, con una separación de 120 Km y una tolerancia de 27 Km. Lo que indica que tendrá una distancia total de  $5 \times 120 \text{ Km} = 600 \text{ Km}$ . El ángulo de búsqueda es de  $180^\circ$  lo que nos indica que nuestra variable tendrá las mismas propiedades para cualquier distancia de búsqueda, descartando la anisotropía.

Input the parameters for variogram computation

Load Parameters... Save

**Lags**

Number of lags 5  
Lag separation 120000  
Lag tolerance 27000

**Directions**

Number of directions 1

Angles are in degrees.  
Use a tolerance tol > 90 to  
indicate an omni-directional  
variogram

	azimuth	dip	tolerance	bandwidth	measure type	head indic. cutoff	tail indic. cutoff
1	0	0	180	10	variogram		

< Back Next > Close

Figura 16 Parámetros de búsqueda para el variograma

En la figura N° 17 se muestra el variograma de la variable estandarizada  $\delta^{18}\text{O}^{**}$ , donde observamos que una continuidad espacial que parte desde el origen y a una distancia de 600 Km. Esta distancia es aceptable ya que a nosotros nos interesa determinar la continuidad a una menor distancia, por que al momento de realizar el Kriging estableceremos un vecindario de búsqueda razonable, capaz de representar los fenómenos climatológicos regionales.

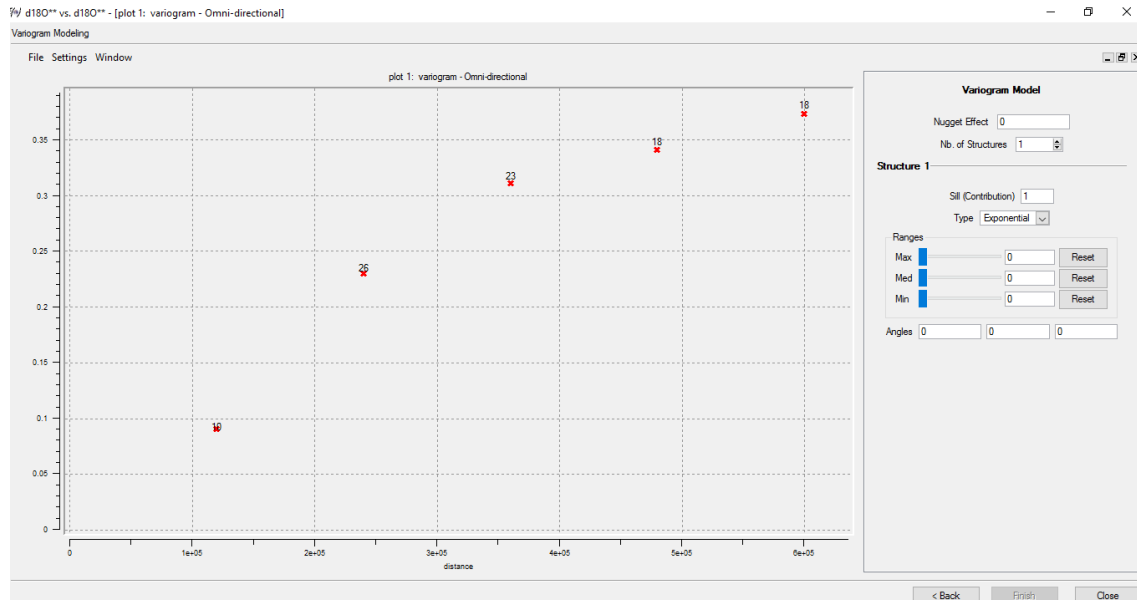


Figura 17 variograma de los  $\delta^{18}\text{O}^{**}$

### 5.7.2. Variograma Teórico

En esta parte del trabajo asignaremos un modelo matemático a nuestro variograma experimental que acabamos de encontrar. Se le ajustaran los parámetros del modelo matemático hasta que se ajuste bien a nuestros pares de puntos encontrados en el variograma experimental. El modelo matemático que mejor se ajuste a nuestro variograma será el que mejor represente la continuidad espacial de la variable estandarizada  $\delta^{18}\text{O}^{**}$ .

De las figuras N° 18 a la 21 se observan los modelos matemáticos que más se ajustan a nuestro variograma, de estos debemos elegir el que más represente la continuidad espacial de nuestra variable. No se representó en ninguno de los modelos el efecto pepita.

# ELABORACIÓN DE MAPAS DE CONTENIDOS ISOTÓPICOS de O-18 EN LA PRECIPITACIÓN SOBRE LA PENÍNSULA IBÉRICA POR MEDIO DE TÉCNICAS GEOESTADÍSTICAS

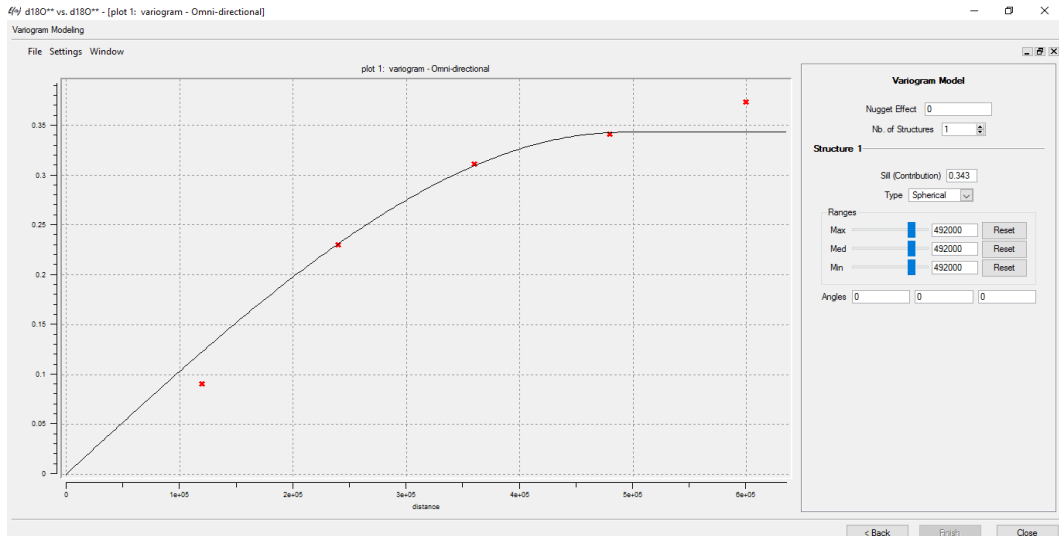


Figura 18 Modelo Esférico

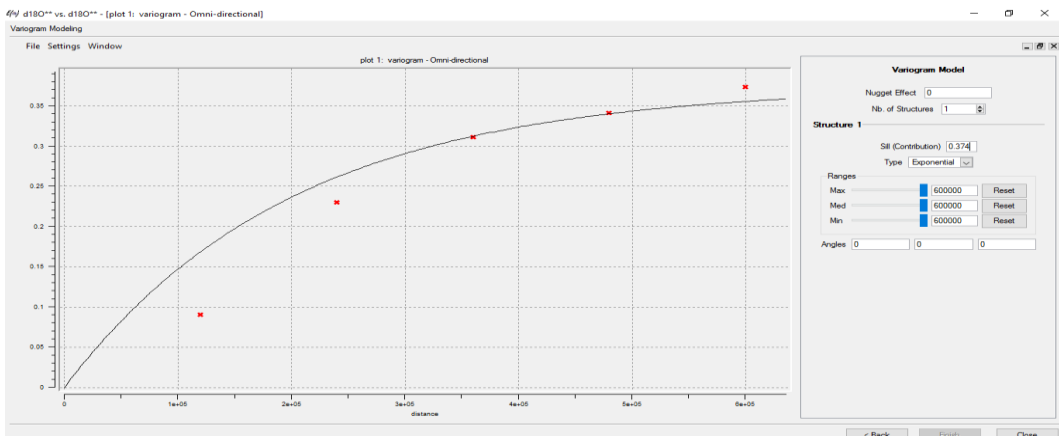


Figura 19 Modelo Exponencial

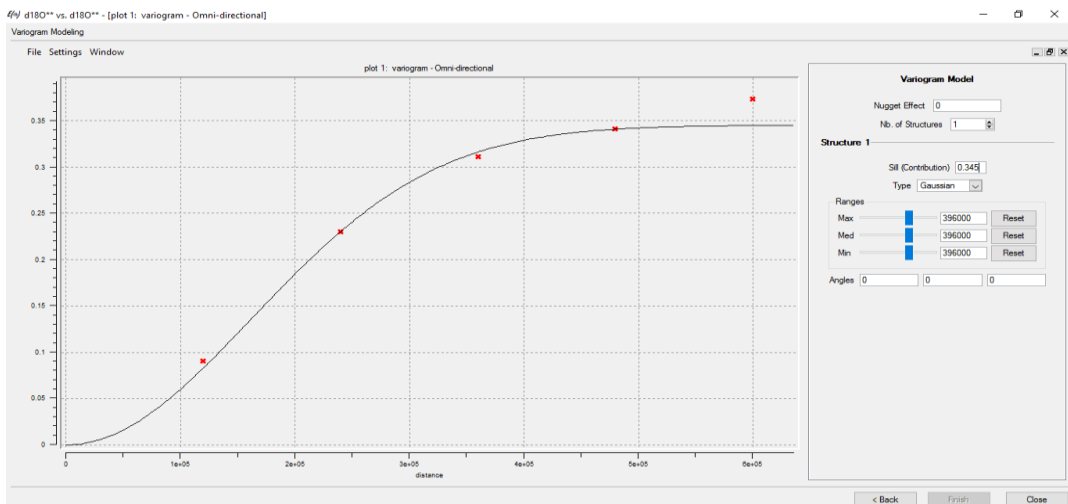
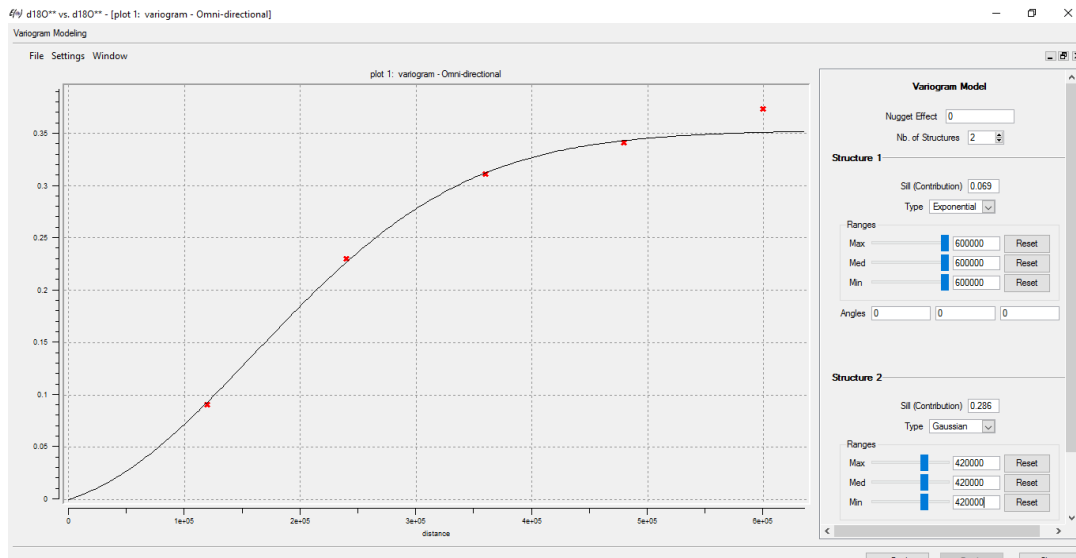


Figura 20 Modelo Gaussiano



**Figura 21 Variograma Imbricado entre un Gaussiano y Exponencial**

De los 4 modelos matemáticos presentados, optamos por el variograma imbricado, pues representa mejor la continuidad espacial en el origen hasta una distancia aceptable que utilizaremos como vecindario de búsqueda en nuestro kriging.

El Variograma imbricado está compuesto por dos modelos matemáticos, uno gaussiano con un alcance a la meseta “sill” de 0.286 y otro exponencial con un alcance a la meseta “sill” de 0.069, ambos sin efecto pepita. Según referencias bibliográficas ambos Sill deben sumar un valor muy parecido a la varianza de la variable en estudio (Moral García, 2003), si bien esto no es una regla pero se recomienda que sea tomado en cuenta. La sumatoria de ambos Sill nos da 0.355 y la varianza del  $\delta^{18}O^{**}$  es de 0.308, por lo que consideramos aceptable a la recomendación. La ecuación del variograma sería el siguiente:  $\gamma(h) = 0 + 0.069Exp_{600000} + 0.286Gaus_{420000}$

### 5.8. Estimación: KRIGING

Esta parte del trabajo estimaremos los valores de la  $\delta^{18}O^{**}$  mediante un Kriging Ordinario para toda nuestra área de estudio. Será necesario el variograma seleccionado en el apartado anterior, ya que este indicara como debe interpolarse la variable en estudio. Se tendrán en cuenta los parámetros del vecindario de búsqueda del Kriging, siendo estos los que me brinden una buena estimación captando los fenómenos climáticos regionales, ya que los fenómenos climáticos que suceden en una determinada área no tienen nada que ver con los fenómenos climáticos que suceden en un área alejada a la inicial. Por ejemplo los fenómenos climáticos que suceden en



Gerona – España no tienen nada que ver con los fenómenos climáticos que suceden en Faro – Portugal.

### 5.8.1. Parámetros del Kriging

Mediante los parámetros del vecindario de búsqueda para la estimación en el kriging, indicaremos cual es área de búsqueda que cada punto a estimar necesita para encontrar estaciones que les brinde información para encontrar el valor estimado. Para ello indicaremos el número mínimo y máximo de estaciones necesarias para interpolar. Como mínimo indicamos 2 estaciones, esto quiere decir que no interpolará si en el área de búsqueda no encuentra por lo menos 2 estaciones dando como resultado el valor de una celda vacía; como máximo indicamos 4 estaciones, esto quiere decir que para la interpolación siempre se van a buscar 4 estaciones a pesar que si ya se cuenta con el mínimo requerido. Optamos por indicar el número máximo de 4 estaciones por que no pretendemos suavizar las estimaciones, indicando que las estaciones guardan relación respecto a los fenómenos climáticos.

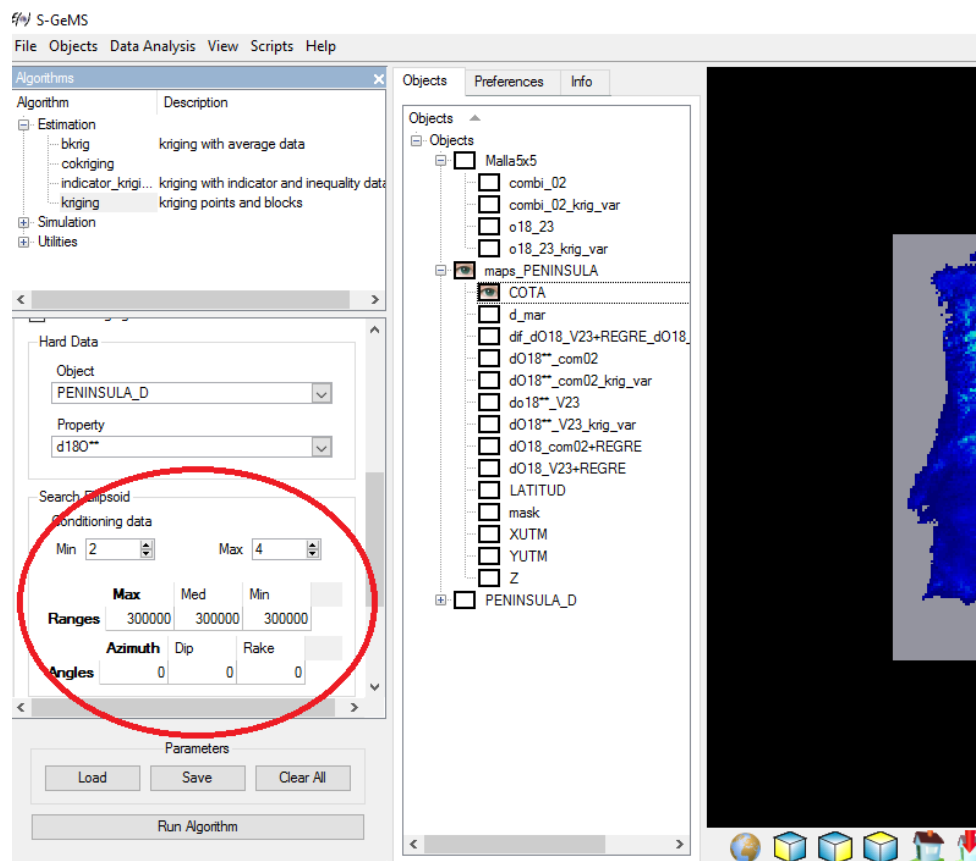


Figura 22 Parámetros de búsqueda para la interpolación del Kriging

Respecto al vecindario de búsqueda indicamos cual es la distancia del eje mayor y eje menor del área de búsqueda, siendo estas iguales por lo que será un área correspondiente a un círculo. Optamos por indicar que sea la distancia menor posible que nos permita interpolar sobre el área de estudio, siendo esta de 300 Km. Lo que se pretendió con poner la menor distancia posible, fue de tratar de captar los fenómenos climáticos regionales, ya que como se había dicho antes, estos fenómenos no son lo mismo en toda el área de estudio.

Los parámetros del vecindario de búsqueda se detallan en la figura N° 22 y el ingreso de los datos del variograma seleccionado se detallan en la figura N° 23.

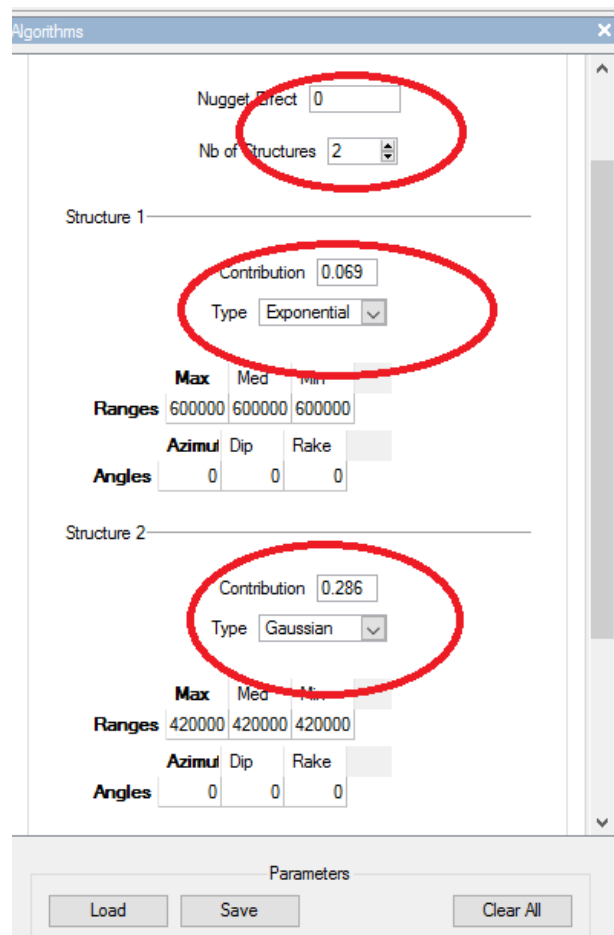


Figura 23 Variograma Imbricado seleccionado para la estimación

### 5.8.2. Valores Estimados

Una vez seleccionado nuestros parámetros de búsqueda en el kriging e introducido los parámetros del variograma seleccionado. Procedemos a estimar los valores sobre nuestra área de estudio, el mismo que nos dará una cuadrícula de valores estimados correspondiente a la malla de trabajo que hemos establecido anteriormente y que se detallan en la figura N° 24, los mismos que fueron extraídos mediante el empleo de una herramienta GIS. Las estimaciones se realizan en un plano 2D, por lo que los casilleros correspondientes a 3D se obvian en este trabajo.

The image shows a dialog box titled "Create new cartesian grid". It contains the following fields and values:

- Grid name: Malla de trabajo
- Grid Dimensions:
  - Number of cells in X: 250
  - Number of cells in Y: 178
  - Number of cells in Z: 1
- Cell Size:
  - Size in X: 5000
  - Size in Y: 5000
  - Size in Z: 0
- Origin Coordinates:
  - Ox: -90469.1699
  - Oy: 984850.9892
  - Oz: 0

Buttons: "Create Grid" and "Cancel".

Figura 24 Área de estimación en el Kriging

En la figura N° 25 se muestran los valores estimados correspondientes a nuestra área en estudio, empleando un variograma Imbricado y con los parámetros de búsqueda indicados en el apartado 5.8.1. Para esto se empleó la herramienta SGeMS, el cual se detalla en el apartado 4.2.8.

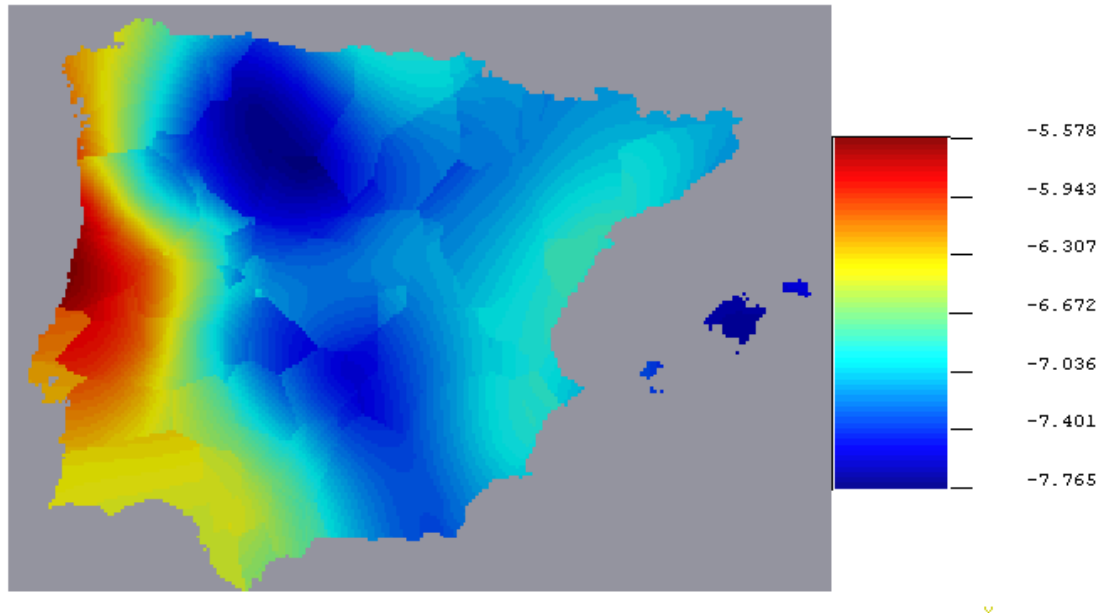


Figura 25 Valores Estimados del  $\delta^{18}\text{O}^{**}$

### 5.9. Determinación del Valor $\delta^{18}\text{O}$

Una vez que hemos estimado los valores del  $\delta^{18}\text{O}^{**}$  en nuestra área de estudio, teniendo en cuenta todos los conceptos sobre los parámetros empleados en la estimación, procedemos a determinar el valor del  $\delta^{18}\text{O}$ , para lo cual se le devuelve el efecto de los variables geográficas de la latitud y altitud a cada uno de los puntos estimados. Para ello invertimos el procedimiento que empleamos que empleamos para encontrar el valor de la variable estandarizada  $\delta^{18}\text{O}^{**}$ , hasta llegar al valor deseado del  $\delta^{18}\text{O}$ . El procedimiento termina en la representación de los valores encontrados en un SIG que ayude a una mejor visualización de los datos.

Para la obtención de la variable estandarizada  $\delta^{18}\text{O}^{**}$ , se siguió el procedimiento indicado en la N<sup>o</sup> 26, donde el valor de  $\delta^{18}\text{O}^{**}$  responde a la ecuación:

$$\delta^{18}\text{O}^{**} = \delta^{18}\text{O} + 0.0681x(\text{Lat} - 40.41) + 0.0023x(\text{Alt} - 667)$$

De donde despejaremos  $\delta^{18}\text{O}$  en función de  $\delta^{18}\text{O}^{**}$  y de los variables geográficas Altitud y Latitud, obteniendo así el valor final del  $\delta^{18}\text{O}$  en nuestra área de estudio.

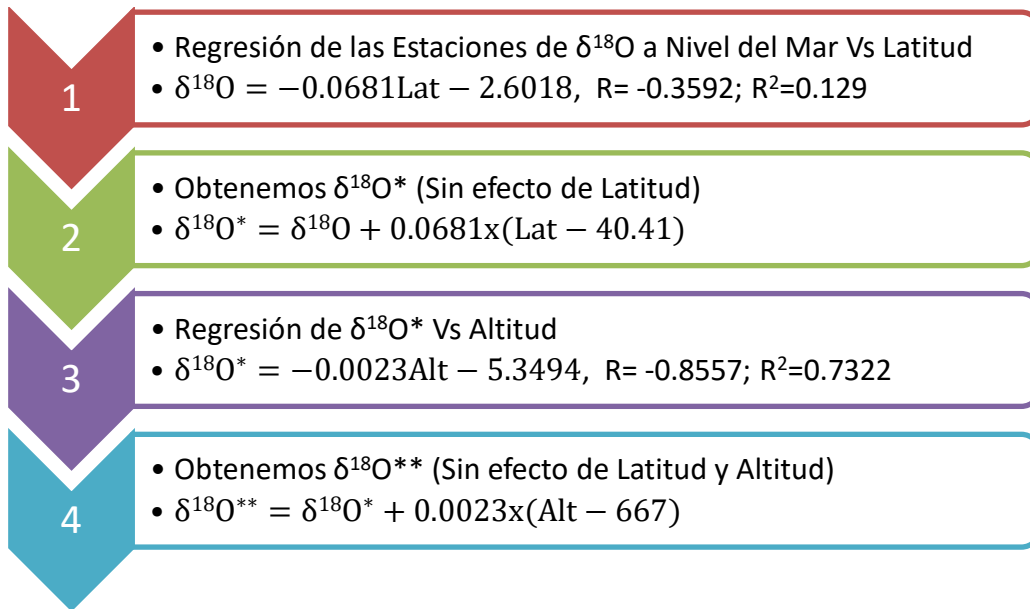


Figura 26 Procedimiento para obtener  $\delta^{18}\text{O}^{**}$

Despejando el valor de  $\delta^{18}\text{O}^{**}$  tenemos:

$$\delta^{18}\text{O} = \delta^{18}\text{O}^{**} - 0.0681x(\text{Lat} - 40.41) - 0.0023x(\text{Alt} - 667)$$

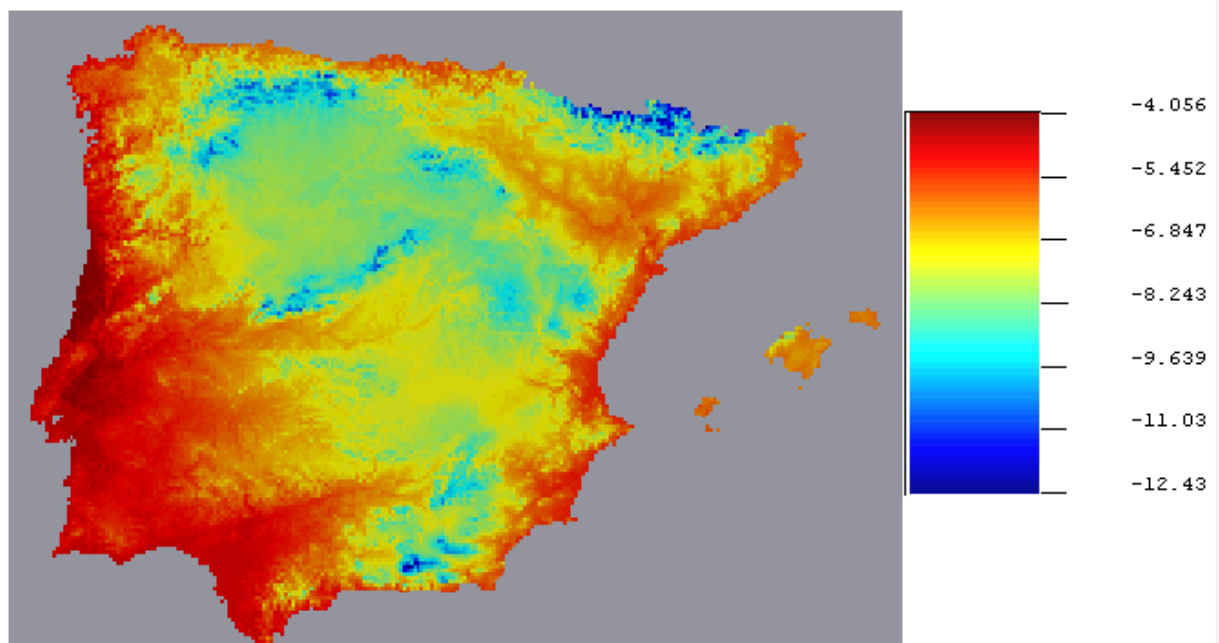


Figura 27 Valor del  $\delta^{18}\text{O}$

## 5.10. Otras Actividades

### 5.10.1. Análisis con Estaciones Adicionales

En esta parte del trabajo realizaremos el mismo procedimiento hecho anteriormente para poder obtener el valor del  $\delta^{18}\text{O}$  sobre la península Ibérica, pero adicionando estaciones que no están dentro de nuestra área de estudio pero su localización es cercana a la misma, por lo que asumimos que habrá relación climatológica en aquellas estaciones cercanas a las adicionales. Para ellos hemos adicionado 4 estaciones más; la de Mónaco, Algiers, Avignon y Dax. Las mismas que se muestran en la tabla Nº 11.

	Estación	Long (° ' ")	Lat (° ' ")	Lat (WGS 1984) (°)	Cota	Dist. Mar
<b>Otras</b>	Monaco	07 25 25 E	43 43 57 N	43.73	2.00	0.10
	Algiers-CN	03 03 08 E	36 46 48 N	36.78	180.00	1.50
	Avignon	04 49 12 E	43 57 00 N	43.95	30.00	60.00
	Dax	01 04 00 W	43 41 00 N	43.68	9.00	30.00

**Tabla 11 Ubicación de las estaciones adicionales**

Las mismas de las cuales se contó con los periodos de tiempo detallado en la tabla Nº 12.

	Estación	Long (° ' ")	Lat (° ' ")	Periodos de Mediciones
<b>Otras</b>	Monaco	07 25 25 E	43 43 57 N	1999 - 2014
	Algiers-CN*	03 03 08 E	36 46 48 N	1998 - 2005
	Avignon	04 49 12 E	43 57 00 N	1997 - 2013
	Dax	01 04 00 W	43 41 00 N	1999 - 2004

**Tabla 12 Periodo de datos de las estaciones adicionales**

\* No se registraron datos para el año 2003.

Se realizó la ponderación de las mediciones de isotopos con la precipitación y luego se determinó sus valores en cada estación, del mismo modo que para los datos sobre la península.

Se analizaron los valores de  $\delta^{18}\text{O}$  a lo largo del periodo estudiado, con el fin de observar su evolución y comportamiento durante variaciones mensuales, estacionales y anuales. Dichas gráficas de muestran en el apartado Nº 8.2 de anexos.

Luego de evaluar la variación temporal de los isótopos en el periodo temporal, determinamos el valor del  $\delta^{18}\text{O}$  de cada estación:

	Estación	Cota	Prec. Media (mm)	$\delta^{18}\text{O}$ pond.
<b>Otras</b>	Monaco	2.00	637.06	-5.11
	Algers-CN*	180.00	512.61	-3.98
	Avignon	30.00	605.21	-6.26
	Dax	9.00	1140.87	-5.37

Tabla 13 Medias de isótopos estables y de precipitación de cada estación Adicional

Estación	$\delta^{18}\text{O}$ pond.																		MEDIA HISTÓRICA
	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	
<b>OTROS</b>																			
MONACO			-4.19	-4.34	-2.43	-4.72	-4.51	-4.20	-5.17	-2.91	-2.20	-7.84	-7.39	-7.03	-5.31	-6.66	-6.60	-6.22	-5.11
ALGIERS-CN		0.71	-2.97	-2.99	-5.38	-6.07		-4.81	-6.37										-3.98
AVIGNON	-4.60	-5.75	-6.76	-5.53	-5.24	-6.64	-7.40	-5.39	-5.52	-5.89	-5.42	-7.33	-8.00	-7.52	-6.36	-6.91	-6.15		-6.26
DAX			-5.39	-6.19	-4.88	-5.01	-5.98	-4.80											-5.37

Tabla 14 Datos anuales ponderados de las estaciones

Estación	Desviación Estandar	Peso
		5
<b>OTROS</b>		
MONACO	1.74	1
ALGIERS-CN	2.47	1
AVIGNON	0.96	2
DAX	0.59	3

Tabla 15 Desviación estándar y pesos asignados a cada estación

En el tabla Nº 14 y 15 se muestran la evolución de los isótopos  $\delta^{18}\text{O}$  a lo largo del periodo temporal en estudio, y sus respectivas desviaciones estándar de cada estación, los mismos que nos sirve para asignarle un peso respecto a aquella donde la desviación es menor, siendo la misma que en el proceso anterior, estación de Santander. La tabla Nº 15 vendría a ser el complemento de la tabla Nº 07, a partir de la cual se elaborarán nuestras ecuaciones con el fin de determinar  $\delta^{18}\text{O}^{**}$ . A continuación se muestran el procedimiento y las ecuaciones necesarias para llegar a determinar el  $\delta^{18}\text{O}^{**}$ .

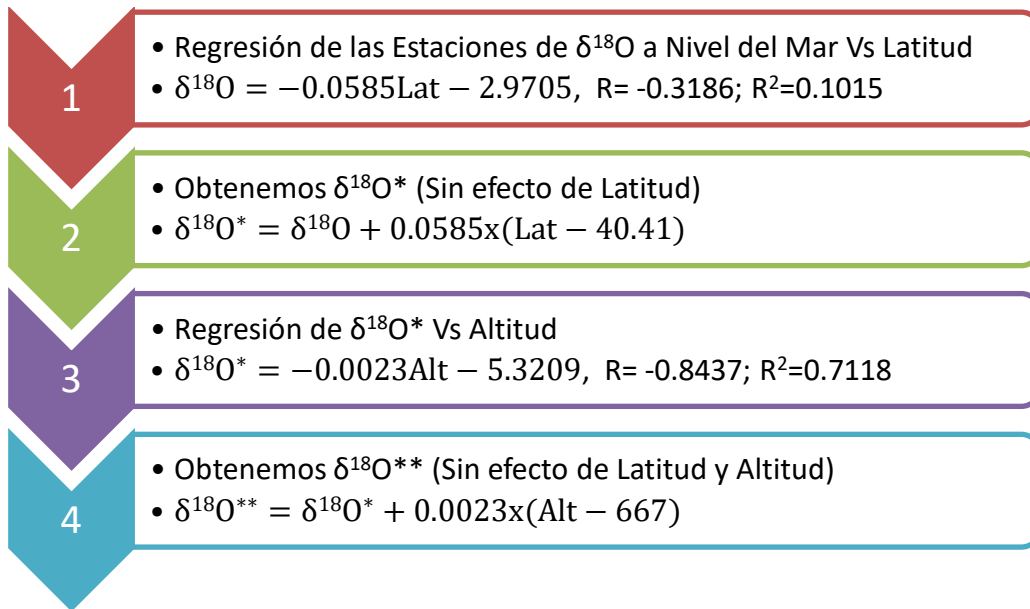


Figura 28 Procedimiento para obtener  $\delta^{18}\text{O}^{**}$

País	Estación	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^{18}\text{O}^*$	$\delta^{18}\text{O}^{**}$
España	La Coruña	-5.18	-5.01	-6.41
	Santander	-5.72	-5.54	-6.95
	Morón	-4.92	-5.11	-6.44
	Cáceres	-6.27	-6.32	-6.93
	Ciudad Real	-7.37	-7.45	-7.54
	Madrid	-7.20	-7.20	-7.20
	Valladolid	-7.97	-7.90	-7.75
	León	-8.44	-8.31	-7.74
	Palma de Mallorca	-6.08	-6.13	-7.66
	Almería	-5.61	-5.82	-7.31
	Valencia	-5.30	-5.36	-6.87
	Tortosa	-5.43	-5.41	-6.83
	Murcia	-5.39	-5.53	-6.92
	Zaragoza	-6.31	-6.23	-7.20
	Gerona	-5.96	-5.87	-7.11
Portugal	Faro	-4.70	-4.90	-6.41
	Porto	-4.58	-4.54	-5.86
	Beja	-5.17	-5.31	-6.28
	Portalegre	-5.88	-5.95	-6.11
	Penhas Douradas	-7.67	-7.67	-6.03
	Vila Real	-6.37	-6.31	-6.74
	Braganca	-7.56	-7.48	-7.43
Reino Unido	Gibraltar**	-4.62	-4.87	-6.39
OTRAS	Monaco	-5.11	-4.91	-6.44
	Algiers-CN*	-3.98	-4.20	-5.32
	Avignon	-6.26	-6.05	-7.52
	Dax	-5.37	-5.18	-6.70

Tabla 16 Valores isotópicos de cada estación.



Con la variable estandarizada  $\delta^{18}\text{O}^{**}$  determinamos la continuidad espacial mediante un variograma, la misma que se muestra en la figura Nº 30 el cual se encontró mediante los parámetros indicados en la figura Nº 29, el cual se determinó siguiendo los mismo criterios con los datos de la península Ibérica

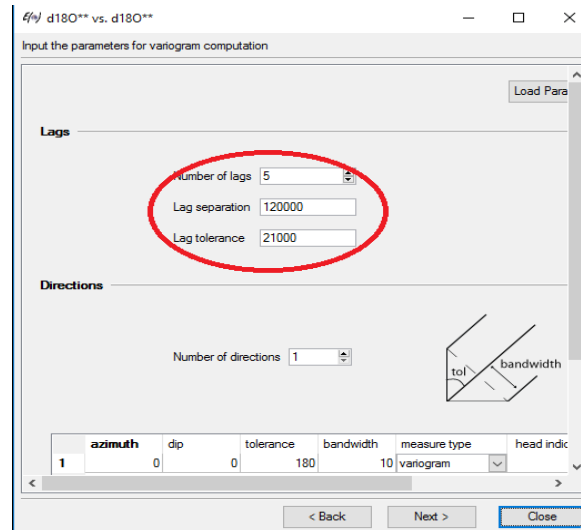


Figura 29 Parámetros del Variograma

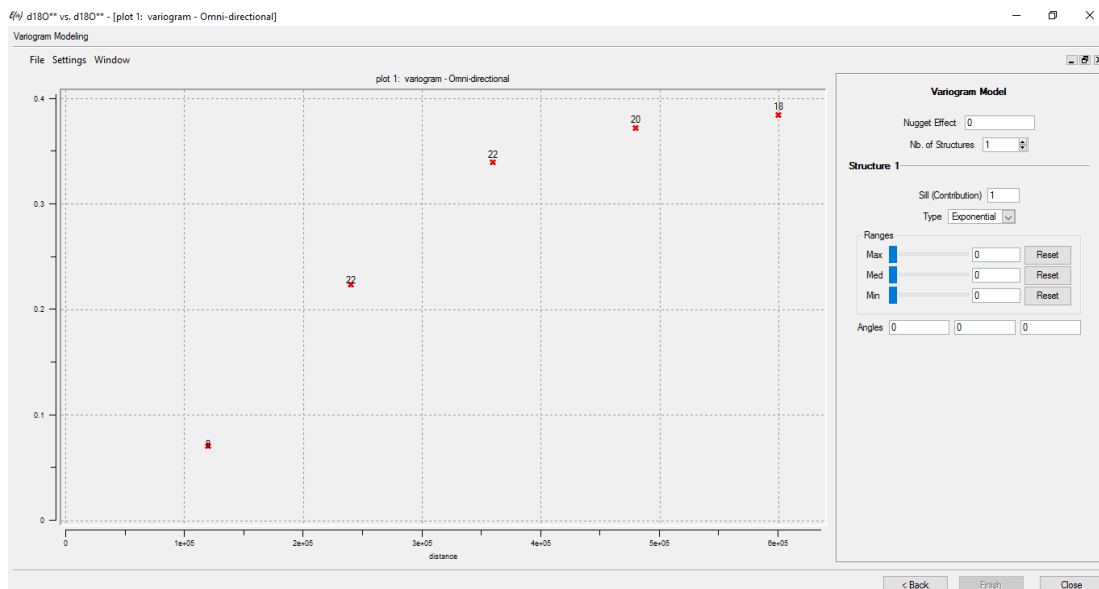


Figura 30 Variograma con todas las estaciones

Al variograma de la figura Nº 30 le asignamos un modelo matemático que represente mejor la continuidad espacial, ajustándose a los pares de puntos encontrados en el variograma experimental. Desde la figura Nº 31 a la 34 se muestran los modelos que más se ajustan a nuestro variograma, siguiendo las recomendaciones empleadas en la

ELABORACIÓN DE MAPAS DE CONTENIDOS ISOTÓPICOS de O-18 EN LA PRECIPITACIÓN SOBRE LA PENÍNSULA IBÉRICA POR MEDIO DE TÉCNICAS GEOESTADÍSTICAS

elaboración del primer mapa. La varianza del  $\delta^{18}\text{O}^{**}$  es 0.38, siendo una referencia que nos indica hasta dónde empezar nuestra meseta.

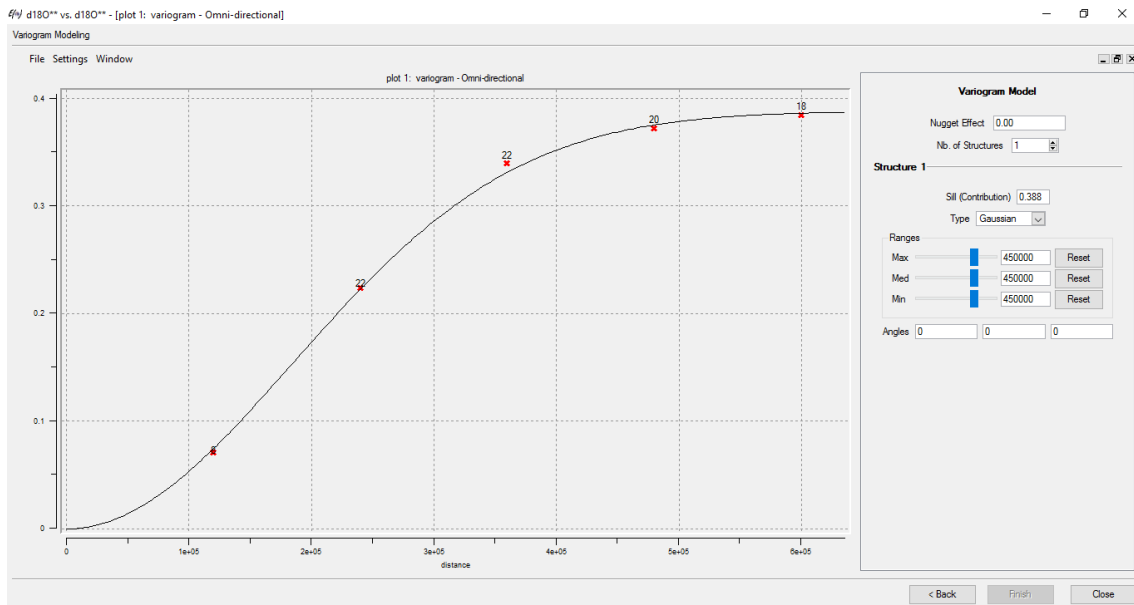


Figura 31 Modelo Gaussiano

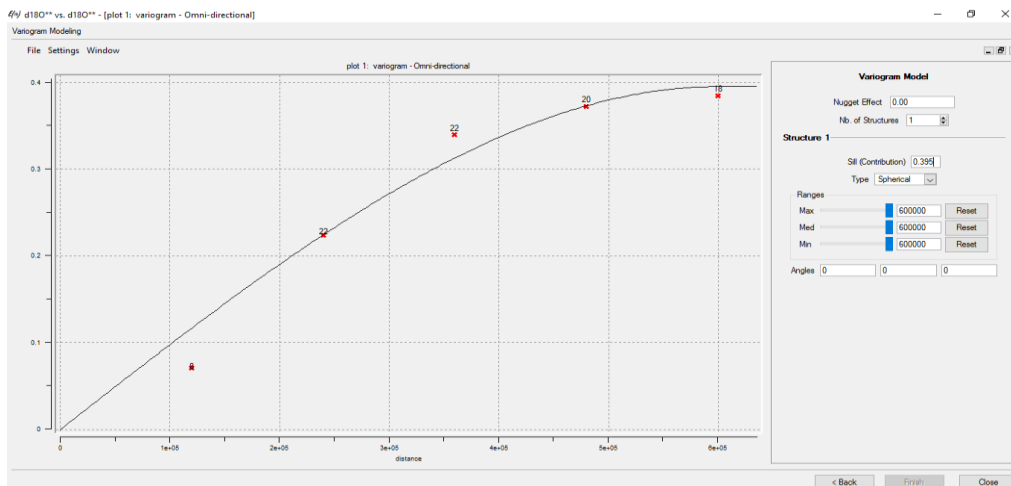
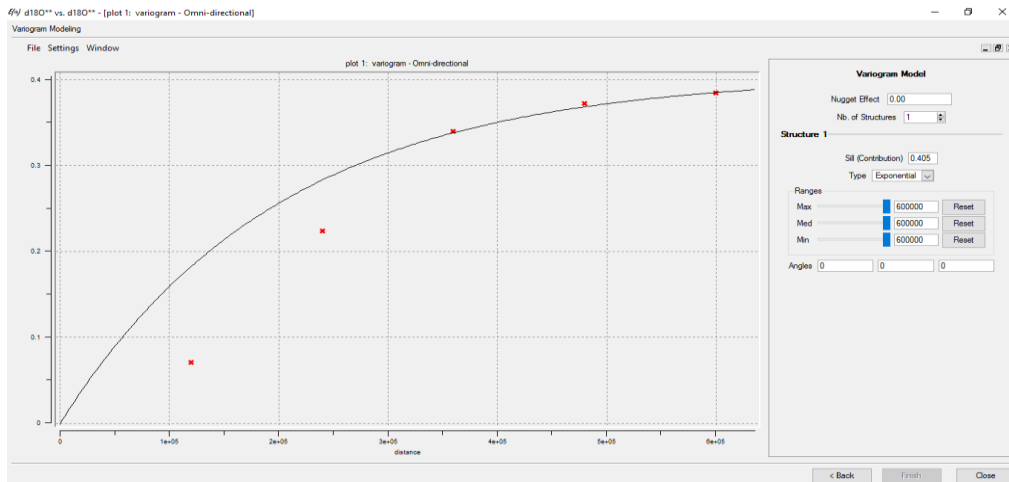
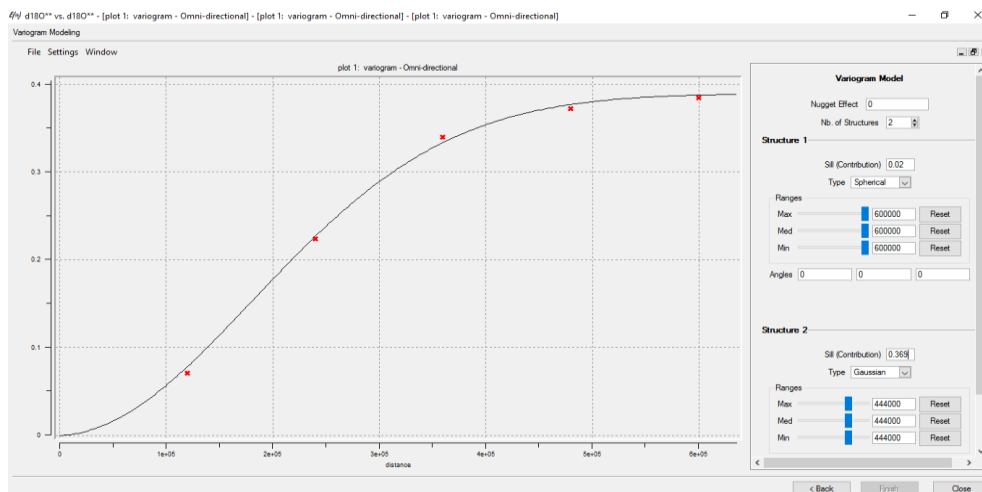


Figura 32 Modelo Esférico

## ELABORACIÓN DE MAPAS DE CONTENIDOS ISOTÓPICOS de O-18 EN LA PRECIPITACIÓN SOBRE LA PENÍNSULA IBÉRICA POR MEDIO DE TÉCNICAS GEOESTADÍSTICAS



**Figura 33 Modelo Exponencial**



**Figura 34 Modelo Imbricado (Gaussiano + Esférico)**

De los modelos mostrados, escogemos al que mejor se ajusta a nuestro variograma. Observamos que el modelo gaussiano y el imbricado se ajustan mucho a nuestras pares de puntos encontrados, por lo que nos quedamos con el modelo gaussiano, ya que es el más simple y me ofrece los mismos resultados. Quedando la ecuación del variograma de la siguiente manera:  $\gamma(h) = 0 + 0.388Gaus_{450000}$

Una vez determinado nuestro variograma con su respectivo modelo matemático, procedemos a estimación de los valores  $\delta^{18}O^{**}$  mediante el Kriging, para lo cual es necesario establecer los parámetros de búsqueda, los cuales serán los mismos que los empleados en la elaboración del primer mapa. Como se muestran en la figura N° 35. Luego procedemos a la estimación del  $\delta^{18}O^{**}$  sobre nuestra área de estudio.

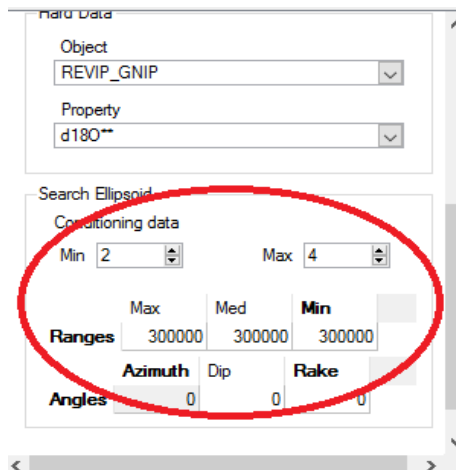


Figura 35 Parámetros de búsqueda del Kriging

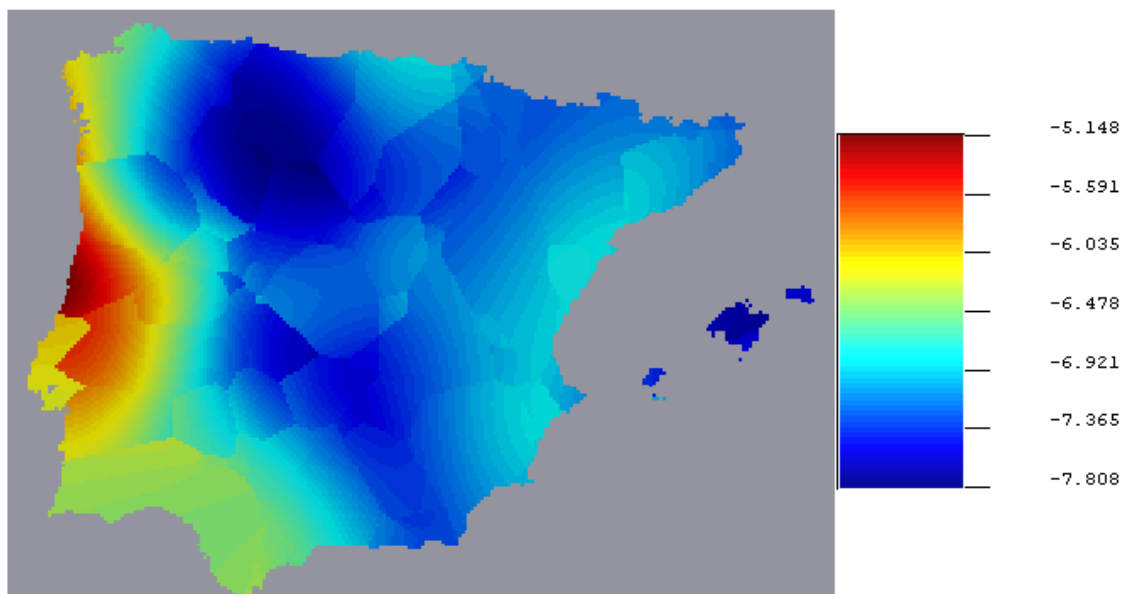


Figura 36 Valores estimados del  $\delta^{18}\text{O}^{**}$

Una vez determinado los valores estimados de nuestra variable estandarizada  $\delta^{18}\text{O}^{**}$ , procedemos a encontrar el valor  $\delta^{18}\text{O}$  despejándolo de la ecuación de donde obtuvimos  $\delta^{18}\text{O}^{**}$ , así nuestro valor deseado del  $\delta^{18}\text{O}$  tendrá los efectos de los variables geográficas altitud y latitud.  $\delta^{18}\text{O}^{**}$  se definía bajo la ecuación:

$$\delta^{18}\text{O}^{**} = \delta^{18}\text{O} + 0.0585x(\text{Lat} - 40.41) + 0.0023x(\text{Alt} - 667)$$

De la ecuación anterior despejamos el valor de  $\delta^{18}\text{O}$  en función de  $\delta^{18}\text{O}^{**}$  y de los variables geográficas de latitud y altitud. Teniendo:

$$\delta^{18}\text{O} = \delta^{18}\text{O}^{**} - 0.0585x(\text{Lat} - 40.41) - 0.0023x(\text{Alt} - 667)$$

Esta ecuación la desarrollamos sobre todos los puntos de nuestra área de estudio y tenemos:

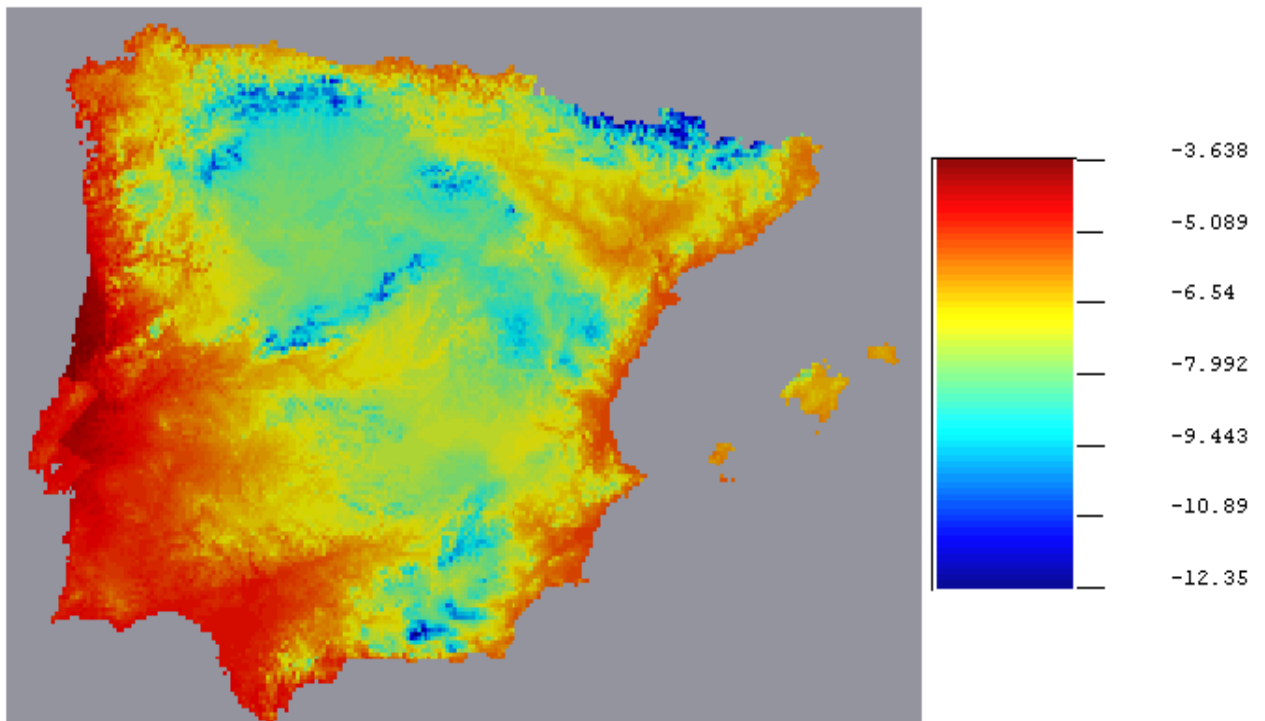
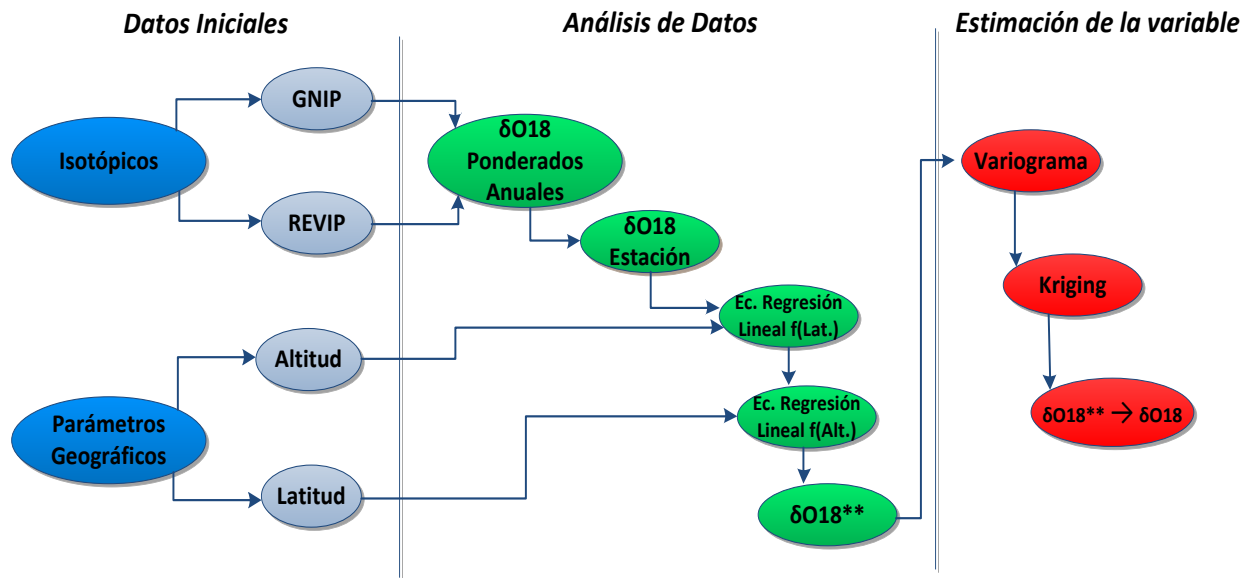


Figura 37 Valor del  $\delta^{18}\text{O}$

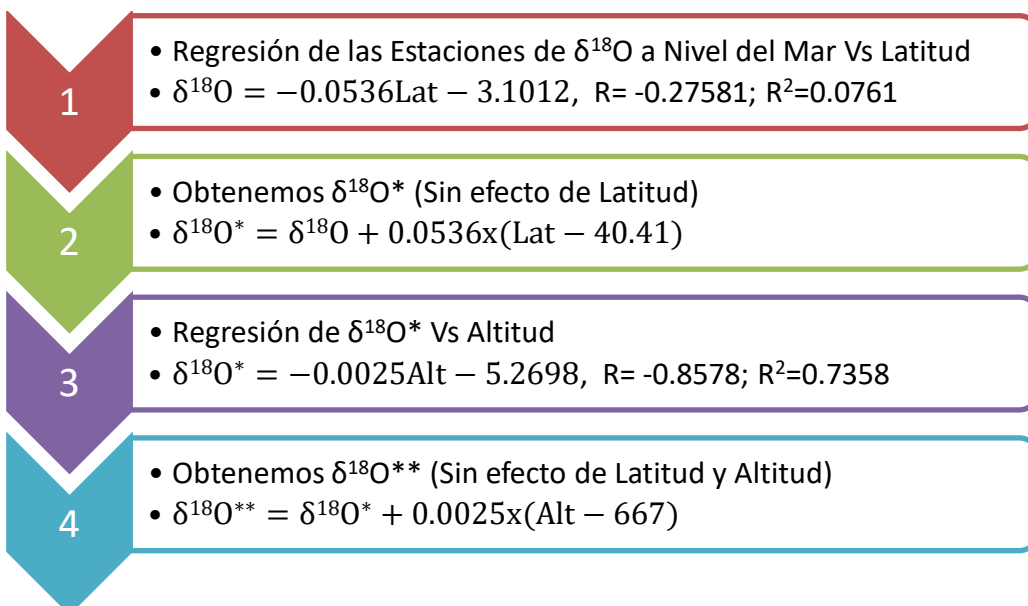
#### 5.10.2. Análisis sin peso de la desviación estándar

En esta parte del trabajo obtendremos el valor del  $\delta^{18}\text{O}$  sobre la península Ibérica empleando el mismo procedimiento, pero sin el peso que se dio a cada estación en función de la desviación estándar. Quedando el procedimiento como se detalla en la figura Nº 38. Respecto a los datos de promedios ponderados de cada estación, son los mismos que se detallan en la tabla Nº 4. Al momento de clasificar las estaciones según su ubicación, se siguió el mismo criterio que en los otros casos como se detalla en el apartado 5.4 del presente trabajo. Quedando la clasificación final como se muestra en la tabla Nº 07, pero sin el efecto de los pesos de cada estación hecho en función de las desviaciones estándar.



**Figura 38** procedimiento empleado sin brindar el peso a las estaciones

Con las clasificaciones hecha a cada estación según su ubicación, como se detalla en la tabla Nº 07, determinamos las ecuaciones de regresión lineal, a fin de obtener nuestra variable estandarizada  $\delta^{18}\text{O}^{**}$ , que como ya sabemos no posee el efecto de la altitud ni latitud. A continuación se muestran el procedimiento y las ecuaciones necesarias para llegar a determinar el  $\delta^{18}\text{O}^{**}$ .



**Figura 39** Procedimiento para obtener  $\delta^{18}\text{O}^{**}$

ELABORACIÓN DE MAPAS DE CONTENIDOS ISOTÓPICOS de O-18 EN LA PRECIPITACIÓN SOBRE LA PENÍNSULA IBÉRICA POR MEDIO DE TÉCNICAS GEOESTADÍSTICAS

País	Estación	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^{18}\text{O}^*$	$\delta^{18}\text{O}^{**}$
España	La Coruña	-5.18	-5.02	-6.54
	Santander	-5.72	-5.55	-7.09
	Morón	-4.92	-5.09	-6.54
	Cáceres	-6.27	-6.32	-6.98
	Ciudad Real	-7.37	-7.44	-7.54
	Madrid	-7.20	-7.20	-7.20
	Valladolid	-7.97	-7.91	-7.74
	León	-8.44	-8.32	-7.70
	Palma de Mallorca	-6.08	-6.13	-7.79
	Almería	-5.61	-5.80	-7.42
	Valencia	-5.30	-5.35	-6.99
	Tortosa	-5.43	-5.41	-6.96
	Murcia	-5.39	-5.52	-7.03
	Zaragoza	-6.31	-6.24	-7.29
	Gerona	-5.96	-5.88	-7.23
Portugal	Faro	-4.70	-4.88	-6.53
	Porto	-4.58	-4.55	-5.98
	Beja	-5.17	-5.30	-6.35
	Portalegre	-5.88	-5.94	-6.12
	Penhas Douradas	-7.67	-7.67	-5.88
	Vila Real	-6.37	-6.32	-6.78
	Braganca	-7.56	-7.49	-7.43
Reino Unido	Gibraltar**	-4.62	-4.85	-6.50

**Tabla 17 valores de la variable estandarizada  $\delta^{18}\text{O}^{**}$**

Con la variable estandarizada  $\delta^{18}\text{O}^{**}$  determinamos la continuidad espacial mediante un variograma, la misma que se muestra en la figura Nº 41 el cual se encontró mediante los parámetros indicados en la figura Nº 40, el cual se determinó siguiendo los mismo criterios hechos anteriormente.

ELABORACIÓN DE MAPAS DE CONTENIDOS ISOTÓPICOS de O-18 EN LA PRECIPITACIÓN SOBRE LA PENÍNSULA IBÉRICA POR MEDIO DE TÉCNICAS GEOESTADÍSTICAS

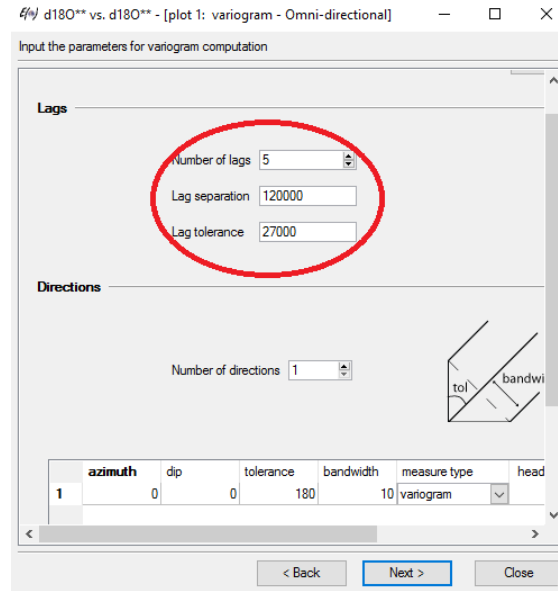


Figura 40 Parámetros del Variograma

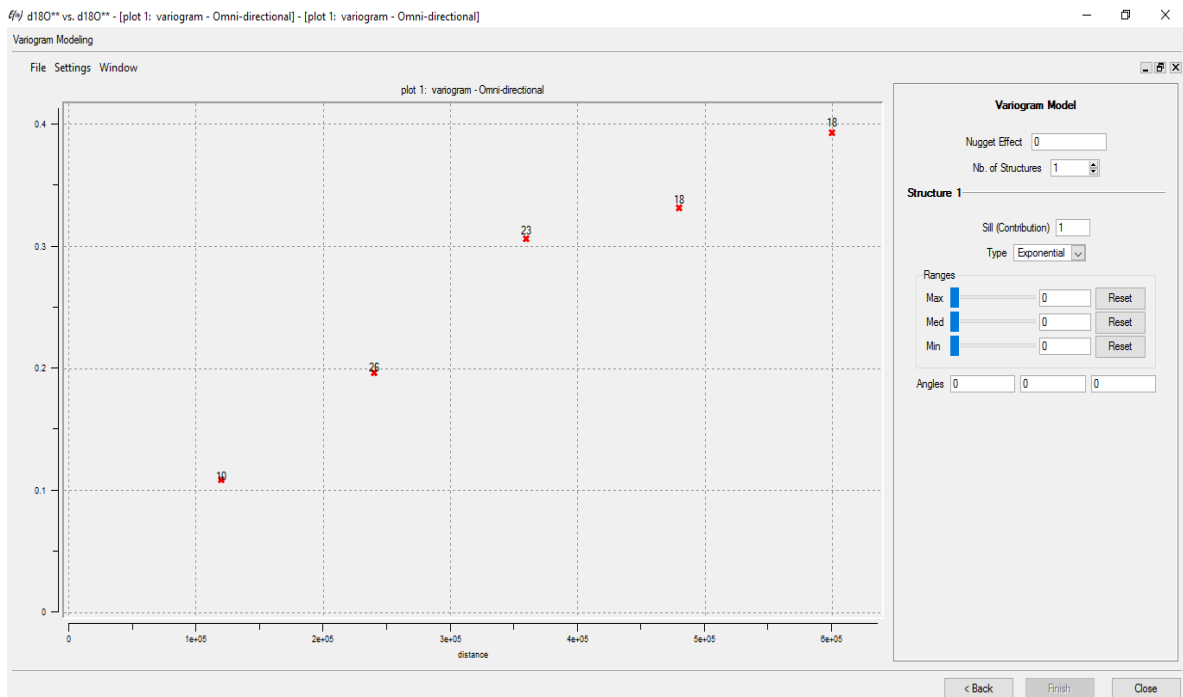


Figura 41 Variograma con todas las estaciones

Al variograma de la figura Nº 41 le asignamos un modelo matemático que represente mejor la continuidad espacial, ajustándose a los pares de puntos encontrados en el variograma experimental. Desde las figura Nº 42 a la 45 se muestran los modelos que más se ajustan a nuestro variograma, siguiendo las recomendaciones empleadas en la elaboración del primer mapa. La varianza del  $\delta^{18}\text{O}^{**}$  es 0.3105, siendo una referencia que nos indica hasta dónde empezar nuestra meseta.



ELABORACIÓN DE MAPAS DE CONTENIDOS ISOTÓPICOS de O-18 EN LA PRECIPITACIÓN SOBRE LA PENÍNSULA IBÉRICA POR MEDIO DE TÉCNICAS GEOESTADÍSTICAS

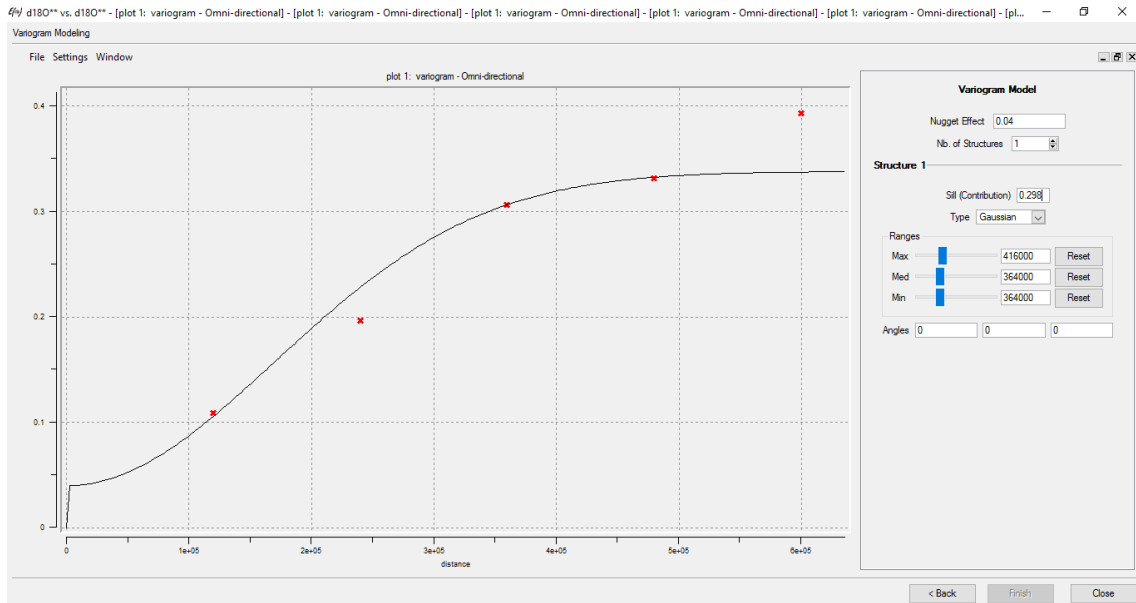


Figura 42 Modelo Gaussiano

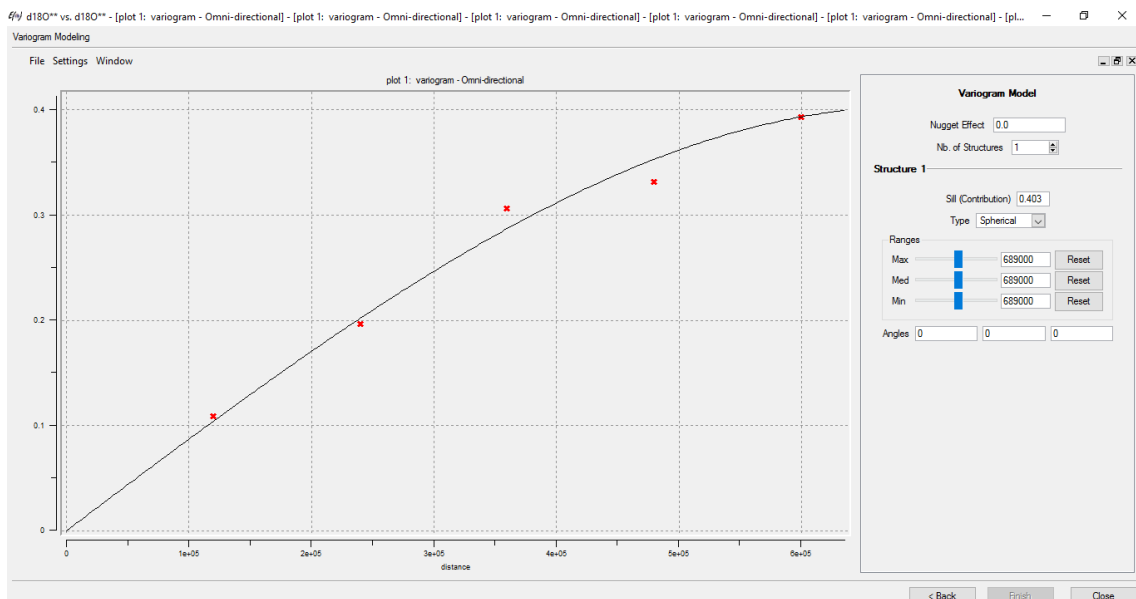
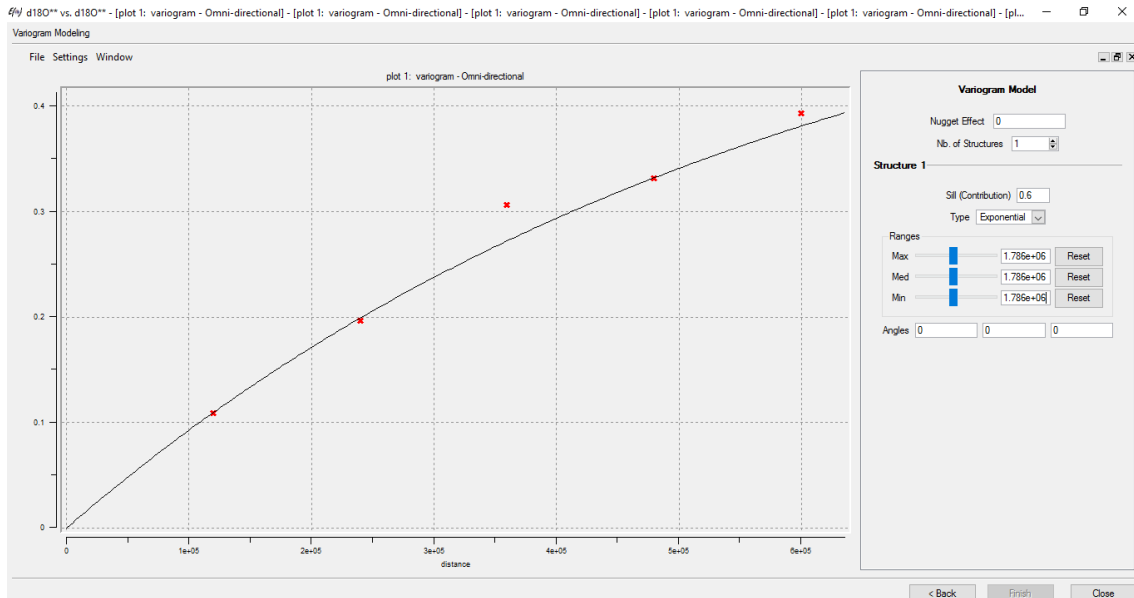
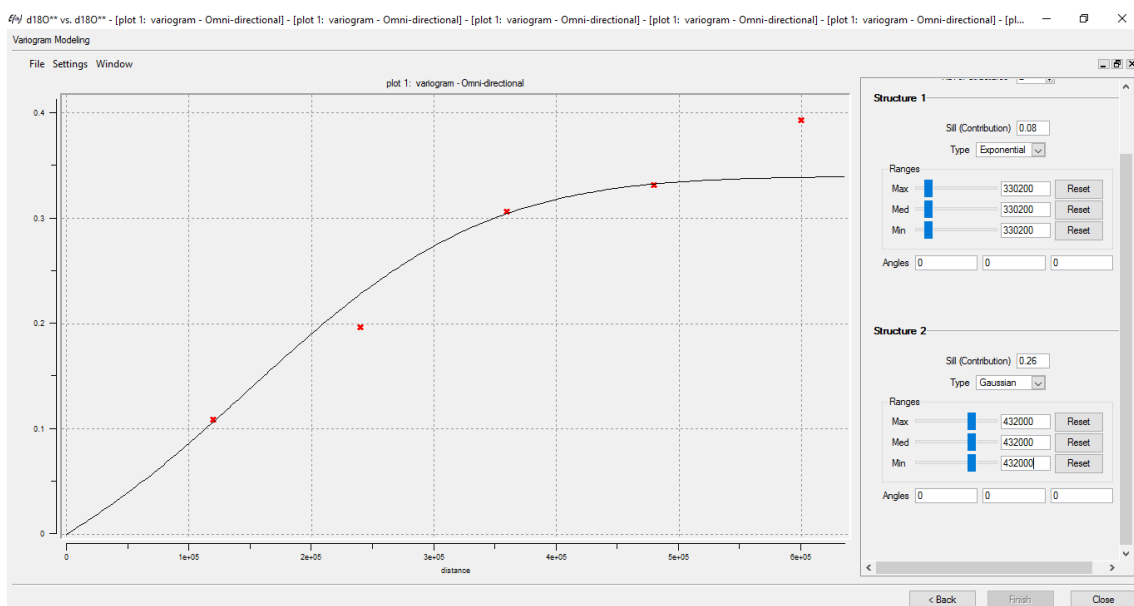


Figura 43 Modelo Esférico

## ELABORACIÓN DE MAPAS DE CONTENIDOS ISOTÓPICOS de O-18 EN LA PRECIPITACIÓN SOBRE LA PENÍNSULA IBÉRICA POR MEDIO DE TÉCNICAS GEOESTADÍSTICAS



**Figura 44 Modelo Exponencial**



**Figura 45 Modelo Imbricado (Gaussiano + Exponencial)**

De los 4 modelos matemáticos presentados, optamos por el variograma imbricado, pues representa mejor la continuidad espacial de las parejas de puntos encontrados.

El Variograma imbricado está compuesto por dos modelos matemáticos, uno gaussiano con un alcance a la meseta "sill" de 0.26 y otro exponencial con un alcance a la meseta "sill" de 0.08, ambos sin efecto pepita. Según referencias bibliográficas ambos Sill deben sumar un valor muy parecido a la varianza de la variable en estudio (Moral García, 2003), si bien esto no es una regla pero se recomienda que sea tomado

en cuenta. La sumatoria de ambos Sill nos da 0.34 y la varianza del  $\delta^{18}\text{O}^{**}$  es de 0.3105, por lo que consideramos aceptable a la recomendación. Quedando la ecuación de la siguiente manera:  $\gamma(h) = 0 + 0.08\text{Exp}_{330200} + 0.26\text{Gaus}_{432000}$

Una vez determinado nuestro variograma con su respectivo modelo matemático, procedemos a estimación de los valores  $\delta^{18}\text{O}^{**}$  mediante el Kriging, para lo cual es necesario establecer los parámetros de búsqueda, los cuales serán los mismos que los empleados en la elaboración del primer mapa. Como se muestran en la figura Nº 46. Luego procedemos a la estimación del  $\delta^{18}\text{O}^{**}$  sobre nuestra área de estudio.

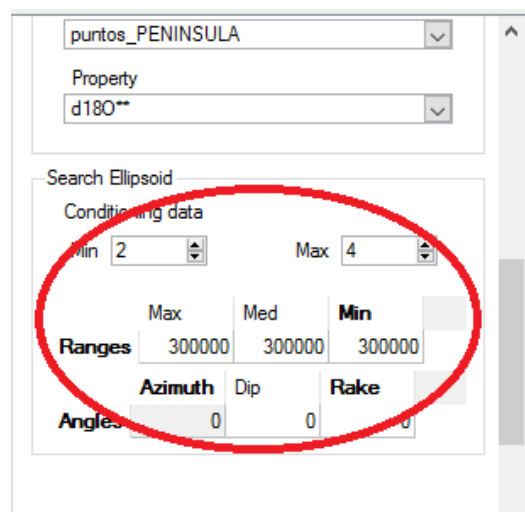


Figura 46 Parámetros de búsqueda del Kriging

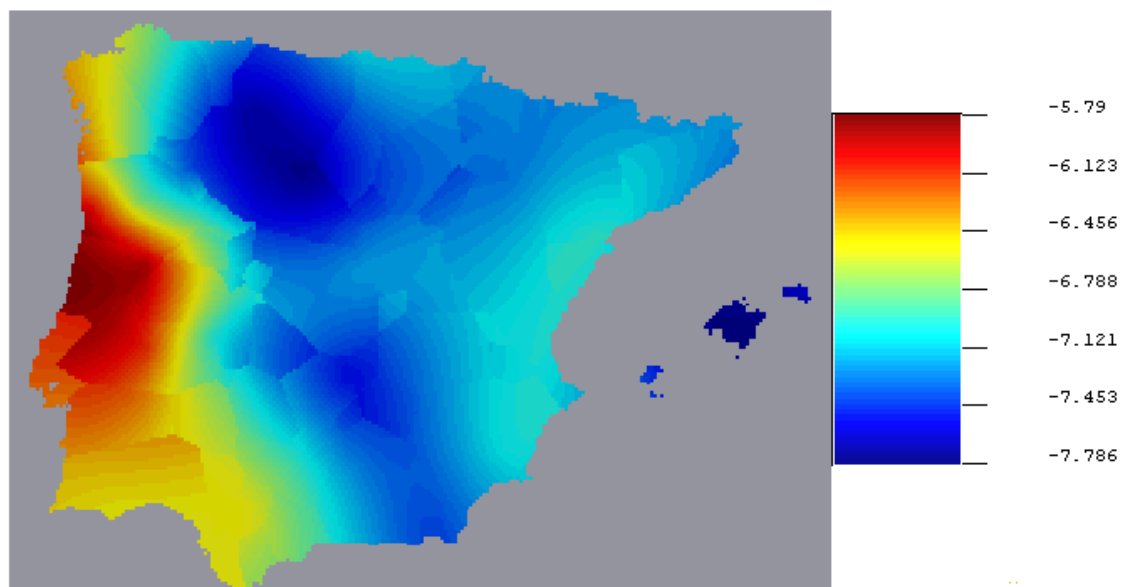


Figura 47 Valores estimados del  $\delta^{18}\text{O}^{**}$

Una vez determinado los valores estimados de nuestra variable estandarizada  $\delta^{18}\text{O}^{**}$ , procedemos a encontrar el valor  $\delta^{18}\text{O}$  despejándolo de la ecuación de donde obtuvimos  $\delta^{18}\text{O}^{**}$ , así nuestro valor deseado del  $\delta^{18}\text{O}$  tendrá los efectos de los variables geográficas altitud y latitud.  $\delta^{18}\text{O}^{**}$  se definía bajo la ecuación:

$$\delta^{18}\text{O}^{**} = \delta^{18}\text{O} + 0.0536x(\text{Lat} - 40.41) + 0.0025x(\text{Alt} - 667)$$

De la ecuación anterior despejamos el valor de  $\delta^{18}\text{O}$  en función de  $\delta^{18}\text{O}^{**}$  y de los variables geográficas de latitud y altitud. Teniendo:

$$\delta^{18}\text{O} = \delta^{18}\text{O}^{**} - 0.0536x(\text{Lat} - 40.41) - 0.0025x(\text{Alt} - 667)$$

Esta ecuación la desarrollamos sobre todos los puntos de nuestra área de estudio y tenemos:

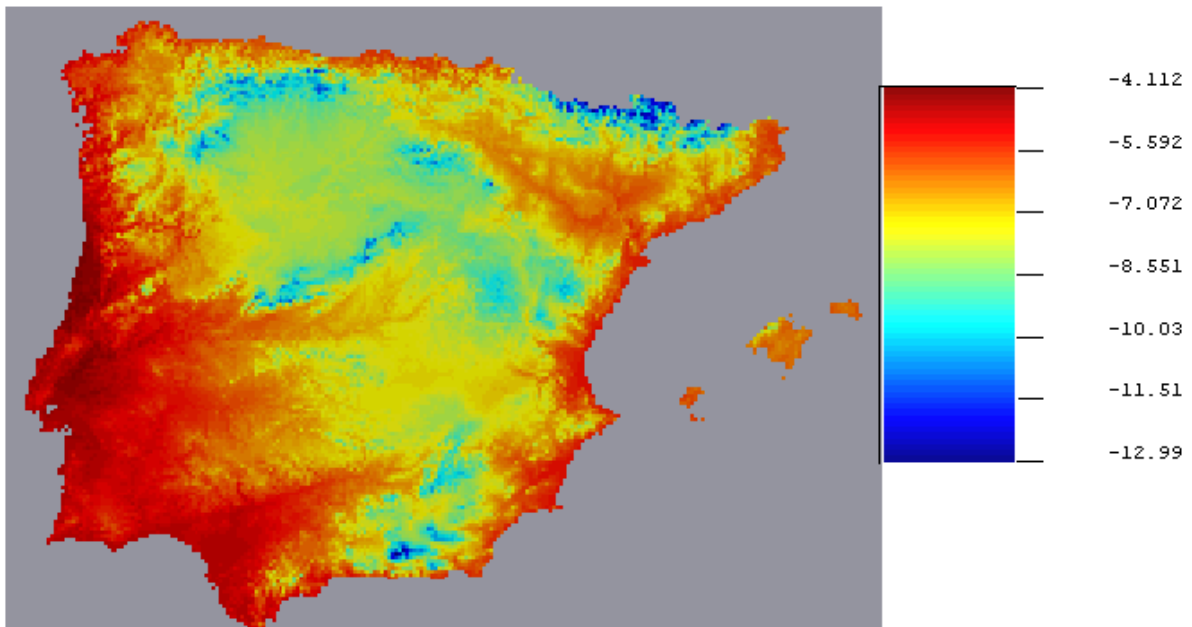


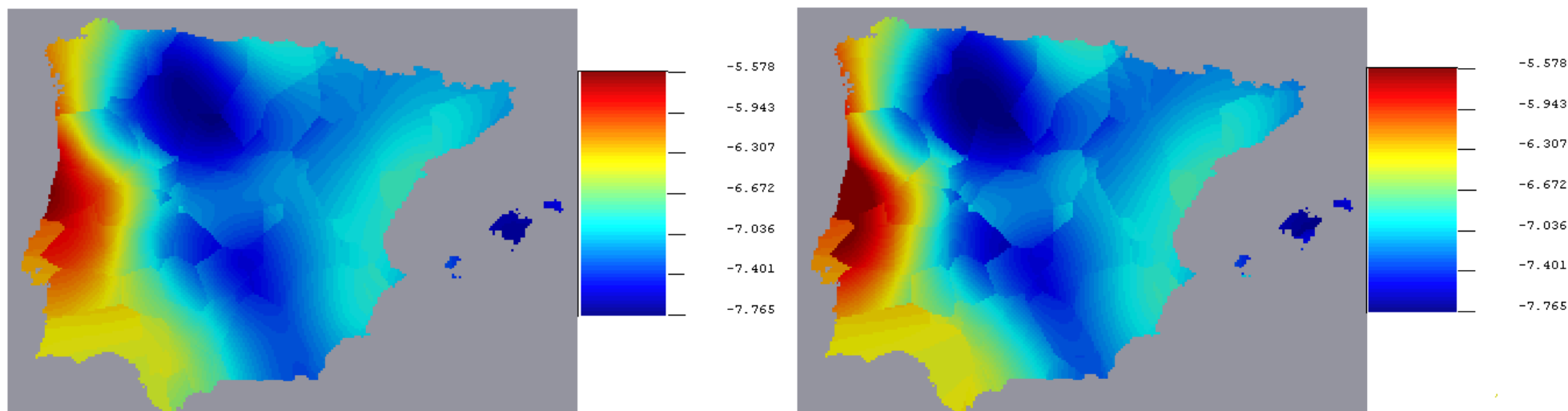
Figura 48 Valor del  $\delta^{18}\text{O}$

### 5.11. Comparación de Planos

En esta parte del trabajo compararemos los resultados obtenidos con las diferentes metodologías que se desarrollaron, como: 1) mapas realizados con estaciones donde se les asignó un peso, en función de la desviación estándar de valores anuales de cada estación, 2) mapas donde se agregó 4 estaciones fuera de la península y se le asignó un peso en función a su desviación estándar de valores anuales de cada estación, 3) mapas realizados con estaciones de la península donde no se le asignó un peso en función a la desviación estándar de valores anuales de cada estación. Es preciso que para la comparación de los resultados de los mapas estos deban estar en las mismas escalas, ya que nos facilitaran un mejor análisis visual.

Primero compararemos los planos que se realizaron brindando un peso a las estaciones de la península Ibérica con el plano donde se agregaron 04 estaciones fuera de la península Ibérica. Cabe recordar que la metodología empleada para la elaboración de los mapas es el mismo, pero al aumentar el número de estaciones al momento de obtener nuestra variable estandarizada  $\delta^{18}\text{O}^{**}$ , harán que estas sean distintas, debido a que se formularan diferentes ecuaciones de regresión lineal. La comparación entre los mapas lo realizaremos en base a la escala de los mapas hechos solo con las estaciones en la península Ibérica, por ser de mayor interés.

Segundo compararemos los planos que se realizaron brindando un peso a las estaciones de la península Ibérica con el plano donde no se les asignó ningún peso a las estaciones, en función de la desviación estándar de los valores anuales de cada estación, de la península Ibérica. Cabe recordar que la metodología empleada para la elaboración de los mapas es diferente, ya que al momento de obtener nuestra variable estandarizada,  $\delta^{18}\text{O}^{**}$ , se emplearon distintas ecuaciones de regresión lineal, brindándonos valores distintos del  $\delta^{18}\text{O}^{**}$ . La comparación entre los mapas lo realizaremos en base a la escala de los mapas hechos con las estaciones donde se les asignó un peso a las estaciones, por ser de mayor interés en este trabajo de investigación.



**Figura 49 Valores comparados del  $\delta^{18}\text{O}^{**}$**

Comparación de mapas con valores del  $\delta^{18}\text{O}^{**}$ . El de la Izquierda se obtuvo con las estaciones que se ubican dentro de la península Ibérica y el de la derecha con las mismas estaciones más 4 adicionales que se ubican fuera de la península Ibérica. Ambos mapas se desarrollaron asignando un peso a las estaciones en función de la desviación estándar de los valores anuales de cada estación.

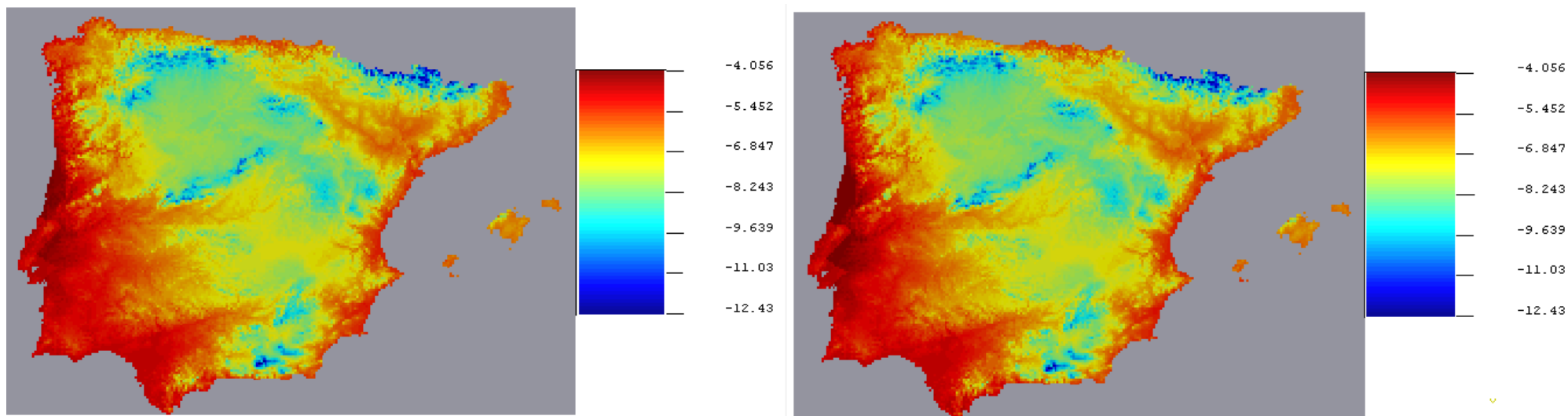


Figura 50 Valores comparados del  $\delta^{18}\text{O}$

Comparación de mapas con valores del  $\delta^{18}\text{O}$ . El de la izquierda se obtuvo con las estaciones que se ubican dentro de la península Ibérica y el de la derecha con las mismas estaciones más 4 adicionales que se ubican fuera de la península Ibérica.

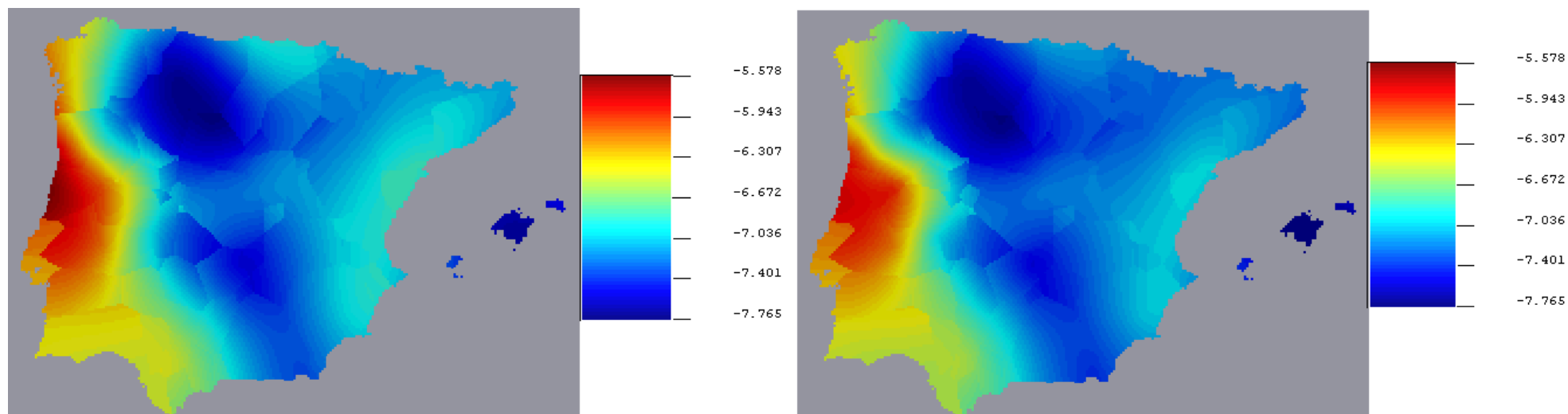


Figura 51 Valores comparados del  $\delta^{18}\text{O}$

Comparación de mapas con valores del  $\delta^{18}\text{O}^{**}$ . El de la izquierda se obtuvo con las estaciones que se ubican dentro de la península Ibérica y se le asignó un peso a las estaciones en función de la desviación estándar de los valores anuales de cada estación, y el de la derecha se desarrolló con las mismas estaciones pero no se le asignó ni un peso a las mismas.



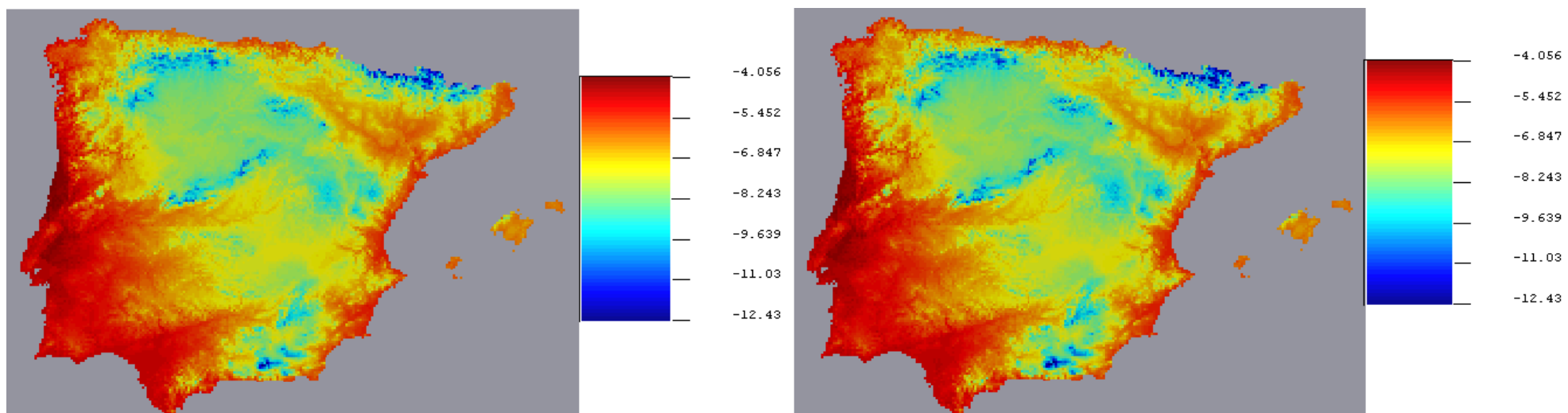


Figura 52 Valores comparados del  $\delta^{18}\text{O}$

Comparación de mapas con valores del  $\delta^{18}\text{O}$ . El de la izquierda se obtuvo con las estaciones que se ubican dentro de la península Ibérica y se le asignó un peso a las estaciones en función de la desviación estándar de los valores anuales de cada estación, y el de la derecha se desarrolló con las mismas estaciones pero no se le asignó ni un peso a las mismas.

➤ Resumen de los Mapas Obtenidos

	ESTACIONES	Modelo	Variable	Valor Mínimo	Valor Máximo	Δ	Observaciones
<b>CON PESO</b>	P. I.	Imbricado (Gaussiano + Exponencial)	$\delta^{18}\text{O}^{**}$	-7.765	-5.578	2.187	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Presenta una variación más local de los datos estimados.</li> </ul>
			$\delta^{18}\text{O}$	-12.43	-4.056	8.374	
	P. I. + Adicionales	Gaussiano	$\delta^{18}\text{O}^{**}$	-7.808	-5.148	2.66	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Presenta una variación más continua de los datos estimados.</li> <li>• Cerca de las estaciones adicionales, presenta una mayor variabilidad de los datos estimados.</li> <li>• Al introducir los datos adicionales, estos hacen que los datos estimados sean más pesados.</li> </ul>
			$\delta^{18}\text{O}$	-12.35	-3.638	8.712	
<b>SIN PESO</b>	P. I.	Imbricado (Gaussiano + Exponencial)	$\delta^{18}\text{O}^{**}$	-7.786	-5.79	1.996	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Presenta una variación más continua de los datos estimados.</li> <li>• En la parte Este la precipitación es más ligera, las precipitaciones presentan un menor contenido isotópico.</li> </ul>
			$\delta^{18}\text{O}$	-12.99	-4.112	8.878	

Tabla 18 Resumen de los mapas obtenidos

## VI. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

Luego de desarrollar los contenidos y los objetivos planteado en el presente trabajo, se presentan las conclusiones finales y algunas líneas futuras de investigación relacionadas a este TFM.

### 6.1. Conclusiones

- Con respecto a artículos y congresos consultados, es el primer mapa de  $\delta^{18}\text{O}$  sobre la península completa (los anteriores eran solo para España) con una serie de datos prolongado con respecto a los últimos trabajos publicados. Además se han efectuado las regresiones de forma que disminuye los residuos allí donde la varianza del dato es menor.
- En este trabajo de investigación demostramos la aplicabilidad del método de regresión – Kriging para elaborar mapas de contenido isotópico  $\delta^{18}\text{O}$  en la precipitación usando datos de la REVIP y GNIP sobre la península Ibérica. El procedimiento requirió identificar las relaciones existentes entre el  $\delta^{18}\text{O}$  con la latitud y altitud, para luego obtener una variable normalizada donde las tendencias debido a estas variables geográficas no tienen influencia. Se espera que otras correlaciones espaciales, debido a las condiciones climáticas, sean captadas por el kriging ordinario, permitiendo la variación espacial de los valores medios.
- Al analizar los registros de datos de los  $\delta^{18}\text{O}$  a los largo del periodo temporal, se observó que existe una relación inversamente proporcional entre el contenido isotópico del  $\delta^{18}\text{O}$  y la intensidad de la precipitación. De forma que, cuando menor es la intensidad de la precipitación mayor será el contenido isotópico del  $\delta^{18}\text{O}$ , y cuando mayor es la intensidad de la precipitación menor será el contenido isotópico  $\delta^{18}\text{O}$ . Esto cumple con lo dicho por (Herráez, 2008) y por (Dansgaard, 1981).
- Al observar la variabilidad estacional del contenido isotópico de  $\delta^{18}\text{O}$  en la precipitación. notamos que durante las estaciones de baja intensidad de precipitación el contenido isotópico es elevado, siendo las estaciones de verano y primavera las que registran un mayor valor isotópico. Durante las estaciones con registros de intensidad de precipitación elevada el contenido isotópico es

bajo, siendo estas las estaciones de invierno y otoño. Fenómeno que ya se había percatado (Fritz, y otros, 1980) en su publicación *"Handbook of Environmental Isotope Geochemistry"*

- Respecto a la tendencia anual del contenido isotópico, este no muestra una tendencia clara y continua durante el periodo estudiado. Esto se ve reflejado en la desviación estándar hecha a cada una de las estaciones, siendo la estación de Santander la que más estable se muestra en el periodo temporal. Esta es una de las razones por la que se optó en asignarle un peso a cada estación a la hora de realizar la regresión lineal. Con este procedimiento estamos dando menos incidencia en aquellas estaciones que presentan una variabilidad elevada en el periodo temporal, ya sea por posibles errores de medición o pudieran ser atribuido a fenómenos climatológicos que se presentan en un determinado lugar y tiempo, y no sobre toda nuestra área de estudio.
- Se pudo obtener un buen ajuste de un modelo de variograma Imbricado, compuesto por dos modelos matemáticos a los datos de las estaciones sobre la península Ibérica, obteniendo un mapa de  $\delta^{18}\text{O}$  que reproduce exactamente estos datos. El variograma imbricado está compuesto por un modelo gaussiano en un 80.56% y un exponencial en un 19.44% dado un alcance total de 0.355 de variograma. Respecto a los datos donde se incluye las 4 estaciones adicionales, se le ajusto un modelo de variograma gaussiano, siendo este el que mejor representa a los datos isotópicos.
- El Kriging ordinario nos brinda un mapa que refleja todo aquello que no ha sido captado por las regresiones y que incluyen fundamentalmente el efecto de las condiciones climáticas locales, ocasionadas por la frecuencia y origen de los frentes (son eventos que generan la precipitación). En estos mapas observamos que, en la parte central de la península Ibérica, los datos muestran que la precipitación es más ligera (con valores isotópicos menores), y hay lluvias con mayor carga isotópica en la parte Oeste de la península, respecto a la parte Este se muestra que las precipitaciones son más de origen local.
- Al introducir más estaciones en la obtención de mapas de contenido isotópico sobre la península Ibérica, esto hace que los valores estimados sean más extremos, en la parte donde las precipitaciones son ligeras se hacen más

ligeras, y en la parte donde son pesadas se hacen más pesadas. Si bien se observa que los datos estimados cerca a las estaciones adicionales son más variables, el efecto que estas estaciones adicionales ocasiona, se refleja sobre toda el área de estudio, ya que para obtener nuestra variable normalizada sin el efecto de la latitud y altitud se emplean todas las estaciones a la vez.

- En relación al último mapa desarrollado en el apartado 5.10.2, podemos decir que los mapas desarrollados con estaciones donde se le asignó un peso a cada estación en función de su desviación estándar de los valores anuales, captan mejor el efecto local como se muestra en la figura Nº 51. Se ve claramente en la misma figura que el contenido isotópico de la parte Este de la península Ibérica, no capta los posibles fenómenos locales de esa zona que en los demás mapas si se mostraban.

## **6.2. Líneas Futuras De Investigación**

Por ser este trabajo de investigación, no existe un procedimiento establecido de cómo tratar los datos o de cómo elaborar los mapas con una mejor representación del contenido isotópico, por lo que brindamos algunas recomendaciones para futuras investigación relacionadas con los objetivos de este TFM.

- Caracterizar el variograma cerca del origen, ya que esto representara mejor los efectos locales de los fenómenos climatológicos.
- Trabajar con modelos de variograma que mejor se ajusten a los datos estudiados, pudiendo ser desde variogramas de un modelo matemático o variogramas con estructuras imbricadas.
- Incluir más estaciones de la GNIP.
- Incluir en el análisis isotópico al Deuterio, debido a la buena correlación que posee con el  $\delta^{18}\text{O}$  (Díaz Teijeiro, y otros, 2009).
- Realizar Co – Kriging, aprovechando la dependencia del  $\delta^{18}\text{O}$  a otras variables como presión de vapor, temperatura, distancia al mar.
- Debemos tener cuidado con el tratamiento de datos al tratar de obtener una mayor correlación, ya que estos siempre deben de justificar en la observación y tener sentido físico, evitando la sobreparametrización.

## VII. BIBLIOGRAFÍA

aguaysig aguaysig [En línea] // aguaysig. - 08 de 10 de 2010. - 18 de 01 de 2017. - <http://www.aguaysig.com>.

Bardasano L. [y otros] Study of Surface Water Mixing by Isotopic Balance Techniques and Cartography of  $\delta^{18}\text{O}$  in Precipitation, at the Jarama and Lozoya Rivers (Madrid, Spain). [Informe]. - Leipzig, Germany : Joint European Stable Isotope Users Meeting - JESIUM 2012, 2012.

Bardasano L., L. Rodríguez Arévalo y Villarroja F. Study of Water Reservoirs at Different Hydrological and Climatic Systems in Spain Based on a Map of Isotopic Distribution in Precipitation [Conferencia] // 9th International Symposium on Environmental Geochemistry. - Aveiro : SEGH, 2012. - págs. 281-282.

Bowen G. y Wilkinson B. Spatial distribution of D18O in meteoric precipitation [Publicación periódica] // Geological Society of America.. - 2002. - págs. 315-318.

Bowen G.J. y Wilkinson B. Spatial distribution of Isotope  $^{18}\text{O}$  in meteoric precipitation [Publicación periódica] // Geology. - 2002. - págs. 315 - 318.

Bowen Gabriel [y otros] Stable isotope ratios of tap water in the contiguous United States [Publicación periódica] // WATER RESOURCES RESEARCH. - 2007. - págs. 1-12.

Bowen Gabriel y Revenaugh Justin INTERPOLATING THE ISOTOPIC COMPOSITION OF MODERN METEORIC PRECIPITATION [Publicación periódica] // WATER RESOURCES RESEARCH. - 2003. - págs. 1-9.

Capilla J. [y otros] Mapping Oxygen-18 in Meteoric Precipitation over Peninsular Spain using Geostatistical Tools [Informe]. - San Francisco-USA : AGU Fall Meeting, 2011.

Casey Kennedy, Gabriel Bowen y James Ehleringer Temporal variation of oxygen isotope ratios ( $d^{18}\text{O}$ ) in drinking water: Implications for specifying location of origin with human scalp hair [Publicación periódica] // Forensic Science International. - 2011. - págs. 156-166.

Castaño S. [y otros] Localización geográfica del origen del agua subterránea del entorno del Parque Nacional de Las Tablas de Daimiel mediante el uso de una metodología de modelización de distribución espacial de  $\delta$  18O en la precipitación [Conferencia] // IX Congreso Ibérico XI Congreso Nacional de GEOQUÍMICA. - SORIA : Colegio Oficial de Geólogos , 2013. - págs. 88-89.

Clark I. y Fritz p. Environmental Isotopes in Hydrogeology [Libro]. - New York : Lewis Publishers, Baton Rouge, 1997.

Dansgaard Stable Isotope Hydrology Deuterium and Oxygen-18 in the Water Cycle [Sección de libro] // Technical Reports Series / aut. libro IAEA. - Vienna : IAEA, 1981.

Díaz Teijeiro M. Fe, Rodríguez Arévalo J. y Castaño Silvino La Red Española de Vigilancia de Isótopos en la precipitación (REVIP): distribución isotópica espacial y aportación al conocimiento del ciclo hidrológico [Publicación periódica] // Ingeniería Civil 155/2009. - 2009. - págs. 87 - 97.

Dutton Andrea [y otros] Spatial distribution and seasonal variation in 18O/16O of modern precipitation and river water across the conterminous USA [Publicación periódica] // HYDROLOGICAL PROCESSES. - 2005. - págs. 4121-4146.

Ericsson Stable Isotope Hydrology Deuterium and Oxygen - 18 in the Water Cycle [Sección de libro] // Technical Reports Series / aut. libro IAEA. - Vienna : IAEA, 1981.

Fritz P. y Fontes J.Ch. Hansbook of Environmental Isotope Geochemistry [Publicación periódica] // The Terrestrial Environment. - 1980. - pág. Chap. 1 y 3.

Fry B. Stable isotope ecology [Informe]. - New York : Springer, 1991.

GNIP Red Mundial de Isótopos en Precipitación Agencia Internacional de Energía Atómica [En línea] // Agencia Internacional de Energía Atómica. - AIEA, 07 de 05 de 2015. - 25 de 01 de 2017. - [http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/IHS\\_resources\\_gnip.html](http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/IHS_resources_gnip.html).

Gómez Lado Noemí El uso de isótopos estables en aguas dulces: un proyecto en el Rego do Lagar (A Coruña) [Libro]. - La Coruña : UNIVERSIDADE DA CORUÑA, 2015.

Gonfiantini Roberto y Hut Gert HIDROLOGIA Y CIENCIAS DE LA TIERRA: ISÓTOPOS EN EL TERRENO [Publicación periódica] // TÉCNICAS NUCLEARES PARA EL DESARROLLO. - 1987. - págs. 13-16.

Guerrero Ricardo y Berlanga Mercedes Isótopos estables: Fundamento y aplicaciones [Publicación periódica] // ACTUALIDAD- SEM Boletín Informativo de la Sociedad Espanola de Microbiología 30. - 2000. - págs. 17-23.

Heredia J. [y otros] Modelación de la variación temporal del valor de  $\delta^{18}O$  en la precipitación en la España peninsular e islas Baleares [Conferencia] // 7ª ASAMBLEA HISPANO-PORTUGUESA DE GEODESIA Y GEOFÍSICA. - San Sebastián : Proceedings, 2012. - págs. 301 - 308.

Herráez I. Relaciones Isotópicas, Oxígeno-18 y deuterio, entre las aguas Superficiales y Subterráneas [Sección de libro] // TÉCNICAS Y APLICACIONES MULTIDICLIPINARES DE LOS ISÓTOPOS AMBIENTALES / aut. libro Alcorlo P., Redondo R. y Toledo J.. - Madrid : UAM, 2008.

Hobson K. A. [y otros] A dragonfly ( $\delta^2H$ ) isoscape for North America: a new tool for determining natal origins of migratory aquatic emergent insects. [Publicación periódica] // Methods in Ecology and. - 2012. - págs. 766-772.

IAEA Guía para el muestreo de la precipitación OIEA/GNIP [Informe]. - Viena : IAEA, 2014.

Kendall Carol y Tyler B. Distribution of oxygen-18 and deuterium in river waters across the United States [Publicación periódica] // HYDROLOGICAL PROCESSES. - [s.l.] : HYDROLOGICAL PROCESSES, 2001. - págs. 1363-1393.

López Martínez Jerónimo Los Isótopos Estables en la Reconstrucción Paleoambiental y como Trazadores en el medio Kárstico Subterráneo [Sección de libro] // TÉCNICAS Y APLICACIONES MULTIDICLIPINARES DE LOS ISÓTOPOS AMBIENTALES / aut. libro Alcorlo P., Redondo R. y Toledo J.. - Madrid : UAM, 2008.



Lykoudis S. P. y Argiriou A. A. Gridded data set of the stable isotopic composition of precipitation over the eastern and central Mediterranean [Publicación periódica] // JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH. - 2007. - págs. 1-10.

María V. Vélez O. y Remberto L. Rhenals G. Determinación de la Recarga con Isótopos Ambientales en los Acuíferos de Santa Fe de Antioquia [Informe]. - Medellín : Universidad Nacional de Colombia, 2008.

Montoya Saul Gidahatari [En línea] // Gidahatari. - 01 de 01 de 2016. - 20 de 01 de 2017. - <http://www.gidahatari.com>.

Moral García Francisco Jesús La Representación Gráfica de las Variables Regionalizadas. Geoestadística Lineal [Libro]. - Cáceres : Universidad de Extremadura , 2003.

Muñoz David [y otros] CARTOGRAFÍA ISOTÓPICA DE ISOTOPO O 18 EN LA PRECIPITACIÓN COMO HERRAMIENTA PARA LA IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS DE RECARGA EN EL SISTEMA ACUÍFERO DE LA LOMA DE ÚBEDA (JAÉN, ANDALUCÍA) [Conferencia] // IX Congreso Ibérico XI Congreso Nacional de GEOQUÍMICA. - SORIA : Colegio Oficial de Geólogos, 2013. - págs. 509-515.

Paloma Alcorlo, Ramón Redondo y José Toledo. Técnicas y Aplicaciones Multidisciplinarias de los Isótopos Ambientales [Libro]. - Madrid : Ediciones Universidad Autónoma de Madrid. , 2008.

Payne y Yurtsever Stable Isotope Hydrology Deuterium and Oxygen-18 in the Water Cycle [Sección de libro] // Technical Reports Series / aut. libro IAEA. - Vienna : IAEA, 1981.

R E M Y N I C O L A S, B O U C H E R A L E X A N D R E y W U J I A N B I N G APPLIED GEOSTATISTICS WITH SGeMS [Libro]. - New York : Cambridge University Press, 2009.

Redondo R. Fundamentos teóricos y técnicos de los isótopos estables [Sección de libro] // Técnicas y aplicaciones multidisciplinares de los isótopos ambientales / aut. libro Aldordo P., Redondo R. y Toledo J.. - Madrid : UAM, 2008.

Resco V. Fundamentos teóricos para el uso de isótopos estables en ecología terrestre [Publicación periódica] // Ecosistemas, Revista científica de ecología y medio ambiente. - 2010. - págs. 19(3): 1-5.

REVIP Red Española de Vigilancia de Isótopos en Precipitación CEDEX [En línea] // CEDEX. - CEDEX, 25 de 01 de 2017. - 25 de 01 de 2017. - [http://www.cedex.es/CEDEX/LANG\\_CASTELLANO/ORGANISMO/CENTYLAB/CETA/LINEAS/Index\\_Revip.htm](http://www.cedex.es/CEDEX/LANG_CASTELLANO/ORGANISMO/CENTYLAB/CETA/LINEAS/Index_Revip.htm).

RODRIGO ILARRI JAVIER MODELACIÓN DEL FLUJO Y TRANSPORTE DE MASA EN MEDIOS FRACTURADOS: TRATAMIENTO DE LA HETEROGENEIDAD CON APROXIMACIÓN DE CONTINUO Y PARÁMETROS NO MULTIGAUSIANOS [Libro]. - Valencia : UPV, 2004.

Rodríguez J. [y otros] Modelo de distribución espacial continua de Isótopo  $^{18}\text{O}$  en la precipitación en la provincia de Burgos. Desarrollo de la metodología y aplicación en hidrología [Publicación periódica] // GEOGACETA, 43. 2007. - 2007. - págs. 79 - 82.

Rozanski Kazimierz y Gonfiantini Roberto Isótopos en estudios climatológicos [Publicación periódica] // BOLETÍN DEL OIEA. - 1990. - págs. 9 - 15.

Rozanski Kazimierz, Araguás Luis y Gonfiantini Roberto. ISOTOPIC PATTERNS IN MODERN GLOBAL PRECIPITATION [Sección de libro] // Climate Change in Continental Isotopic Records / aut. libro 78 Geophysical Monograph. - USA : American Geophysical Union, 1993.

Sáez Castillo Antonio José Apuntes de Estadística para Ingenieros [Libro]. - Jaén : Departamento de Estadística e Investigación Operativa Universidad de Jaén, 2012.

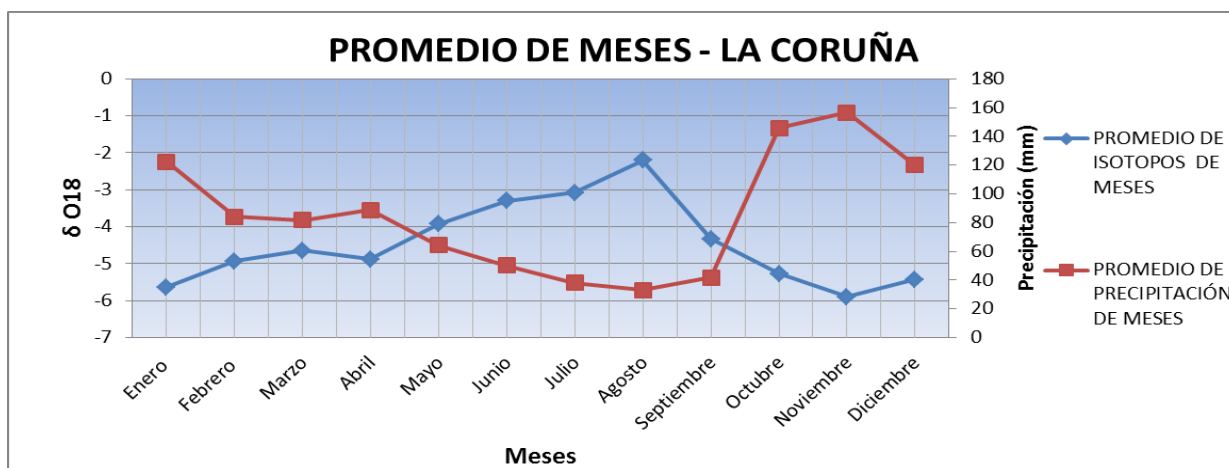
Unkovich M. [y otros] Stable isotope techniques in the study of biological processes and functioning of ecosystems [Libro]. - London : KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS, 2001.

Urey H. C. The Thermodynamic Properties of Isotopic Substances [Conferencia] // Journal of the Chemical Society. - London : [s.n.], 1947. - págs. 562-581.

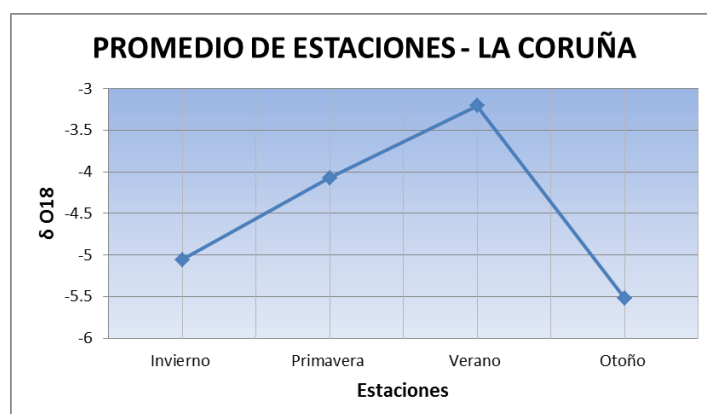
VIII. ANEXOS

8.1. Gráficas de las estaciones en la península Ibérica

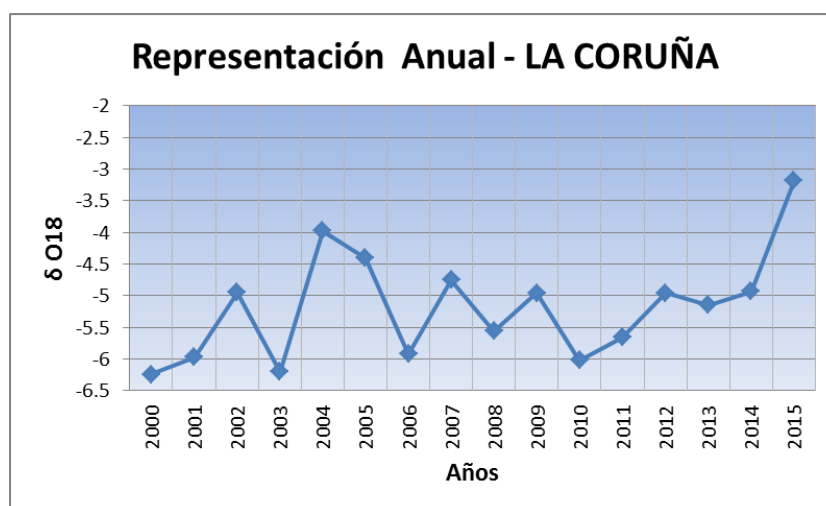
1) Estación de La Coruña



Gráfica 6 Valores Isotópicos Vs Precipitación de La Coruña

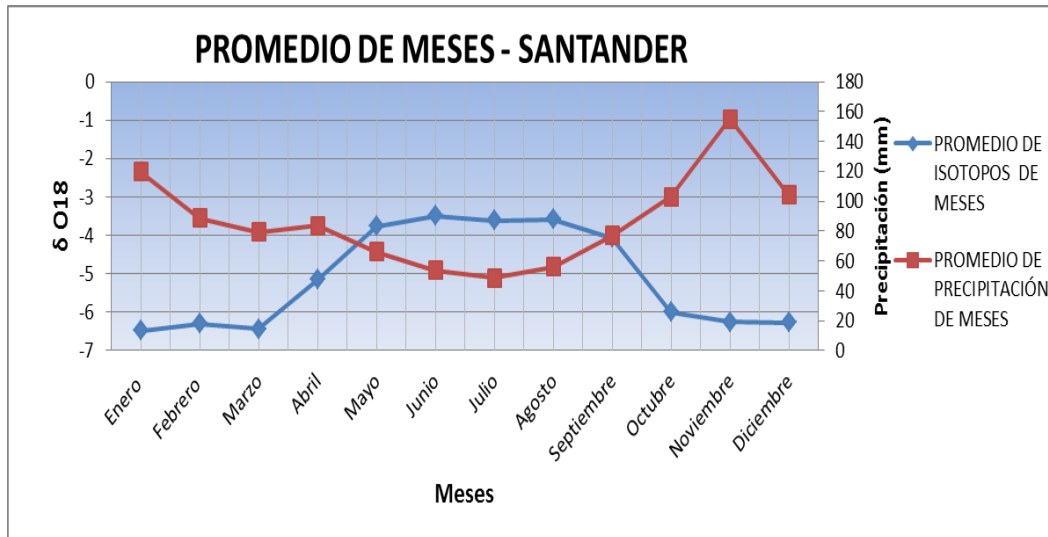


Gráfica 7 Representación de los promedios estacionales de La Coruña

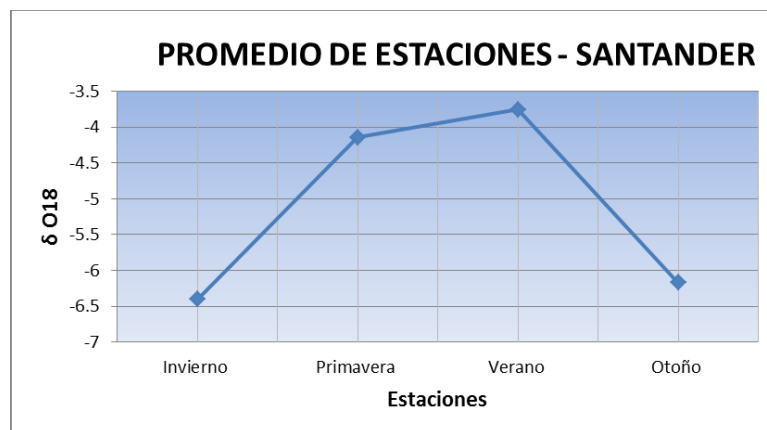


Gráfica 8 Representación de los promedios anuales de La Coruña

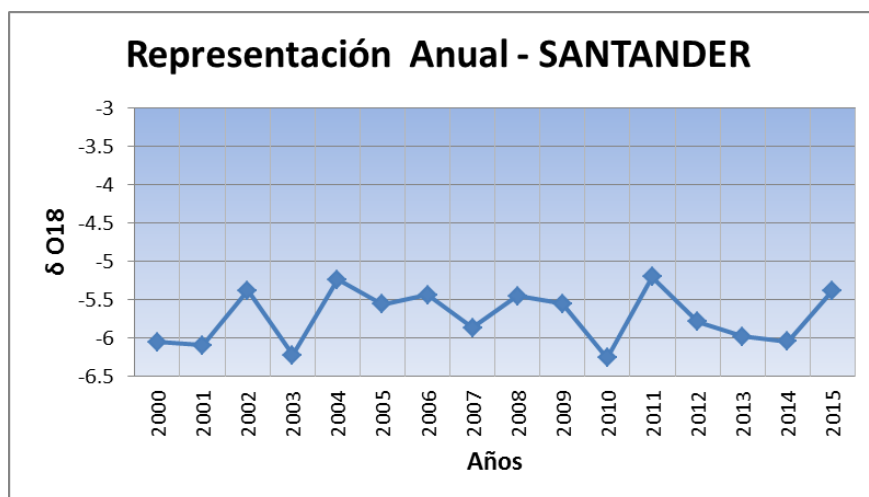
2) Estación de Santander



Gráfica 9 Valores Isotópicos Vs Precipitación de Santander

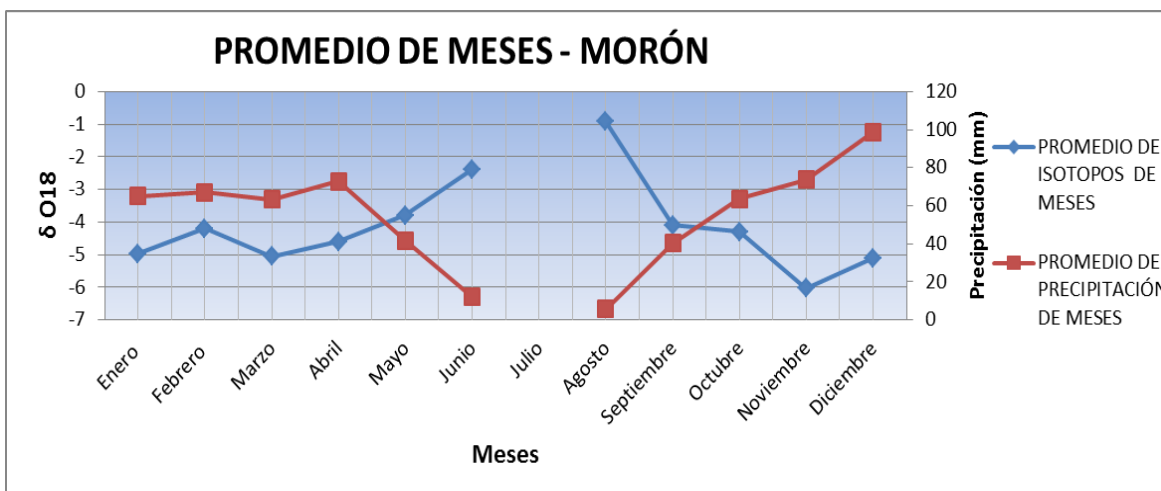


Gráfica 10 Representación de los promedios estacionales de Santander

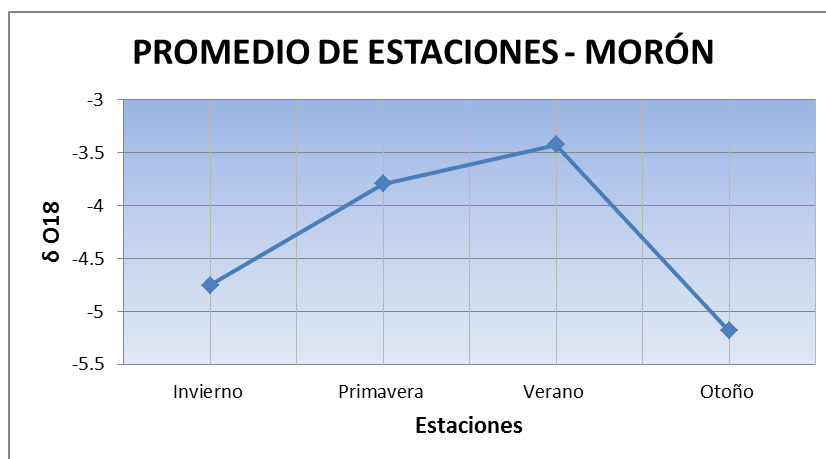


Gráfica 11 Representación de los promedios anuales de Santander

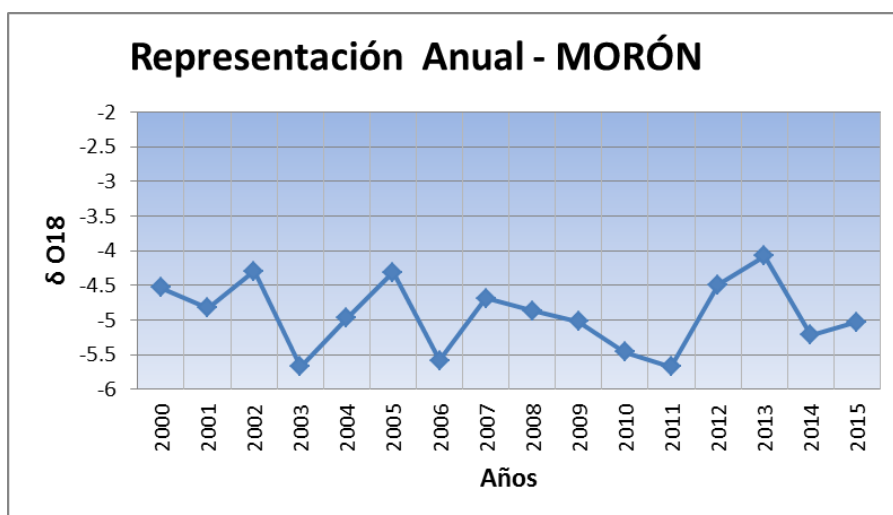
### 3) Estación de Morón



Gráfica 12 Valores Isotópicos Vs Precipitación de Morón

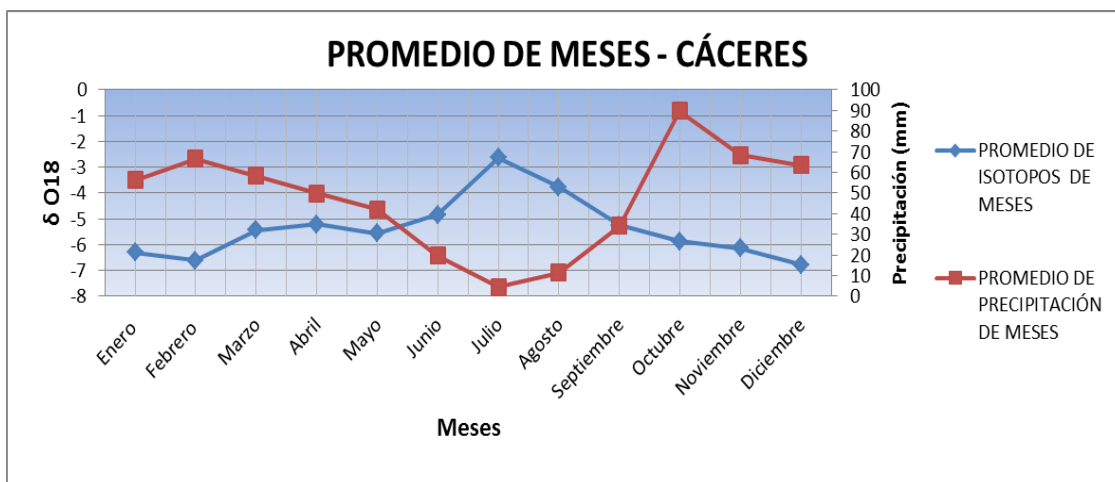


Gráfica 13 Representación de los promedios anuales de Morón

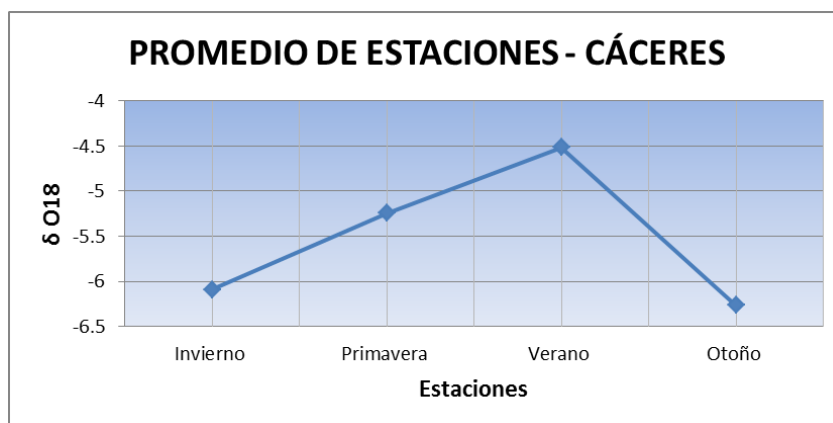


Gráfica 14 Representación de los promedios anuales de Morón

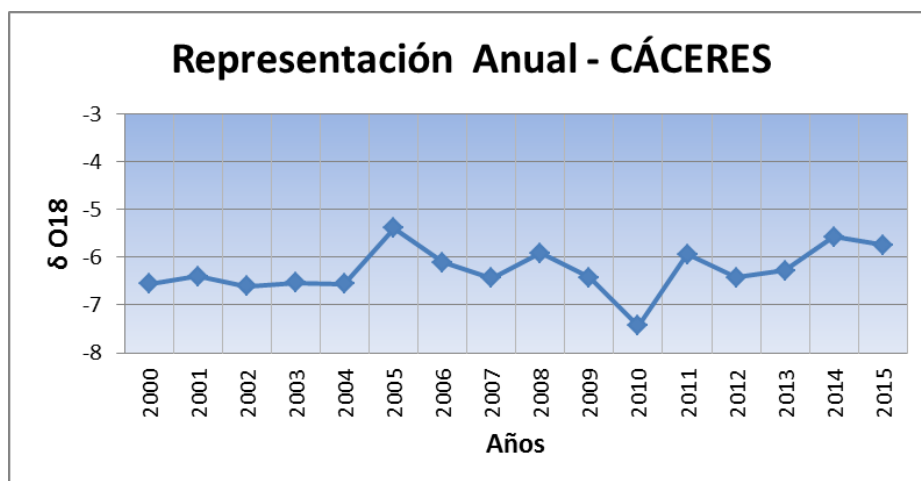
4) Estación de Cáceres



Gráfica 15 Valores Isotópicos Vs Precipitación de Cáceres

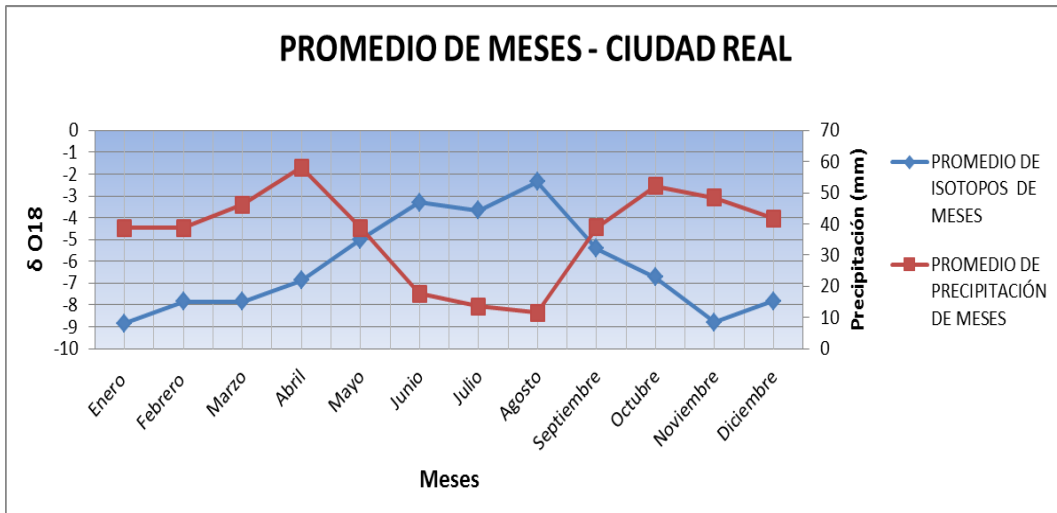


Gráfica 16 Representación de los promedios estacionales de Cáceres

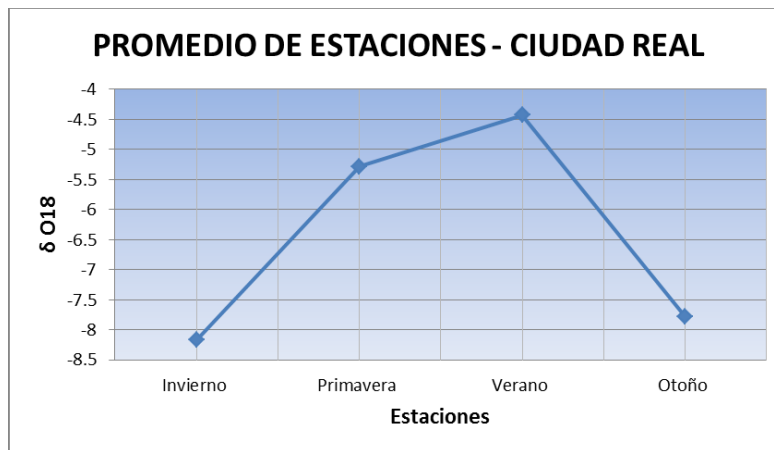


Gráfica 17 Representación de los promedios anuales de Cáceres

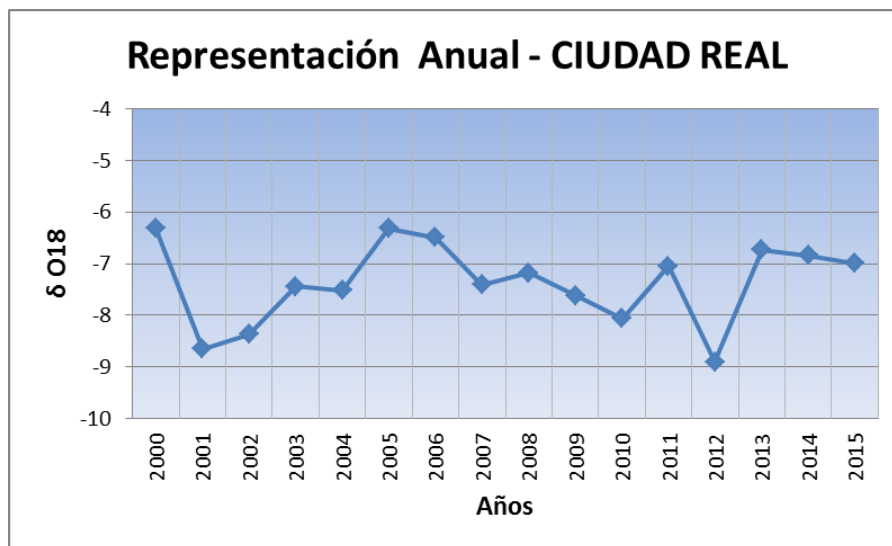
5) Estación de Ciudad Real



Gráfica 18 Valores Isotópicos Vs Precipitación de Ciudad Real

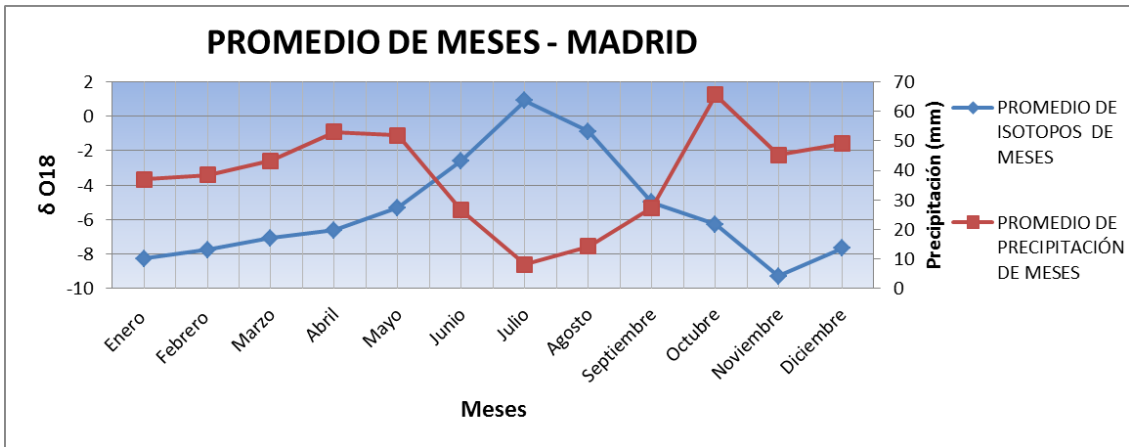


Gráfica 19 Representación de los promedios estacionales de Ciudad Real

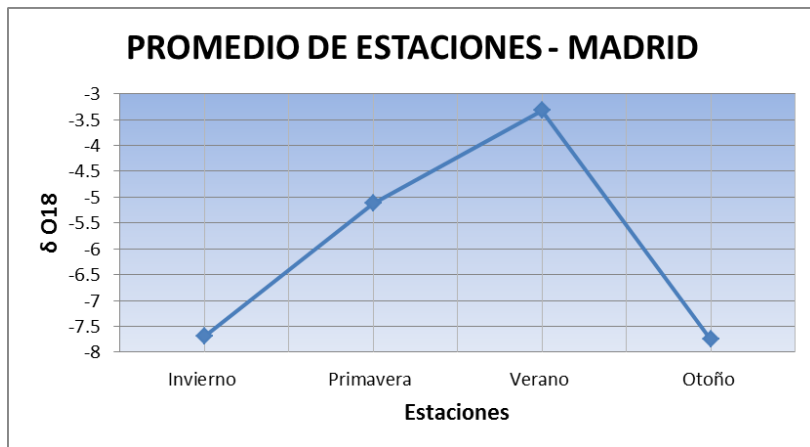


Gráfica 20 Representación de los promedios anuales de Ciudad Real

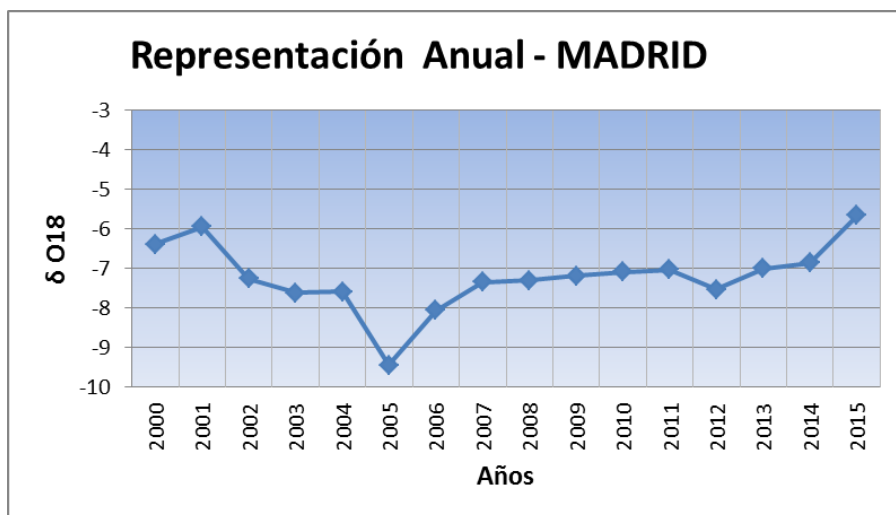
6) Estación de Madrid



Gráfica 21 Valores Isotópicos Vs Precipitación de Madrid



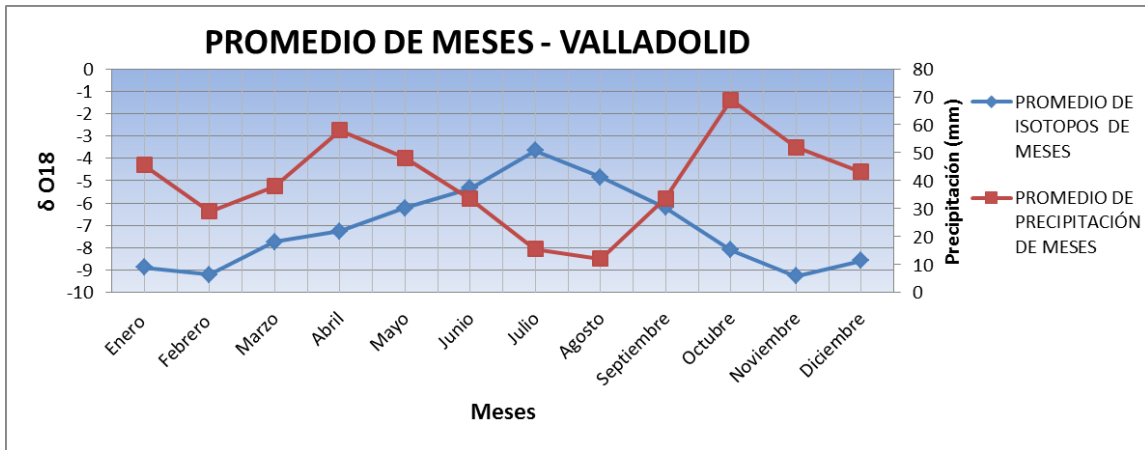
Gráfica 22 Representación de los promedios estacionales de Madrid



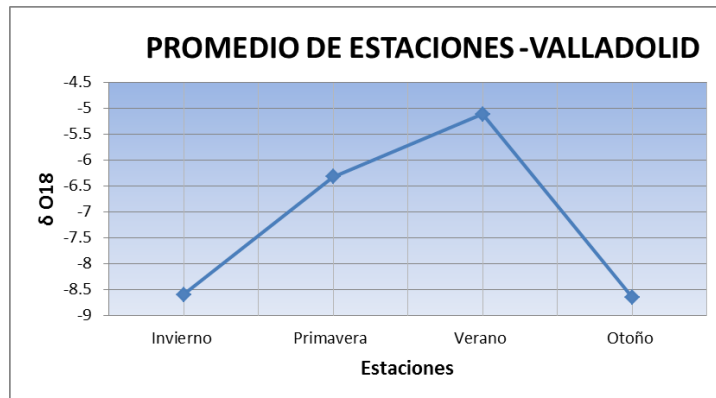
Gráfica 23 Representación de los promedios anuales de Madrid



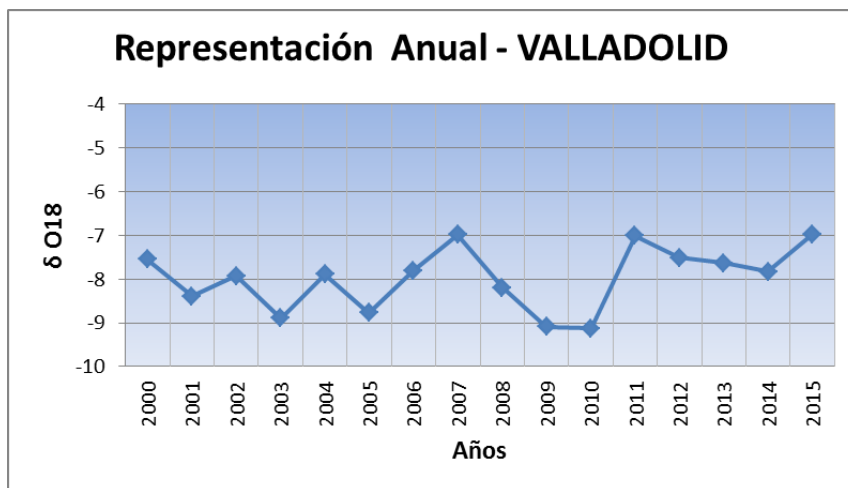
7) Estación de Valladolid



Gráfica 24 Valores Isotópicos Vs Precipitación de Valladolid

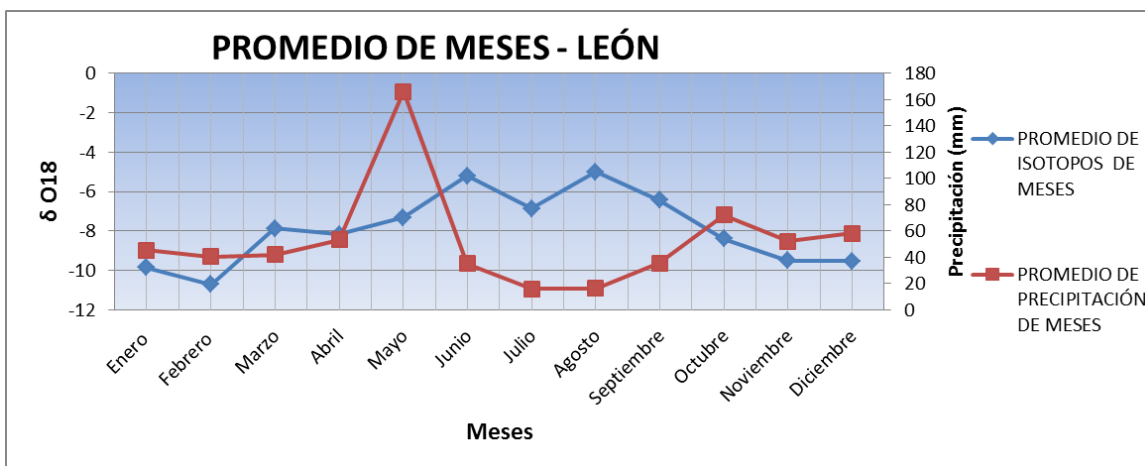


Gráfica 25 Representación de los promedios estacionales de Valladolid

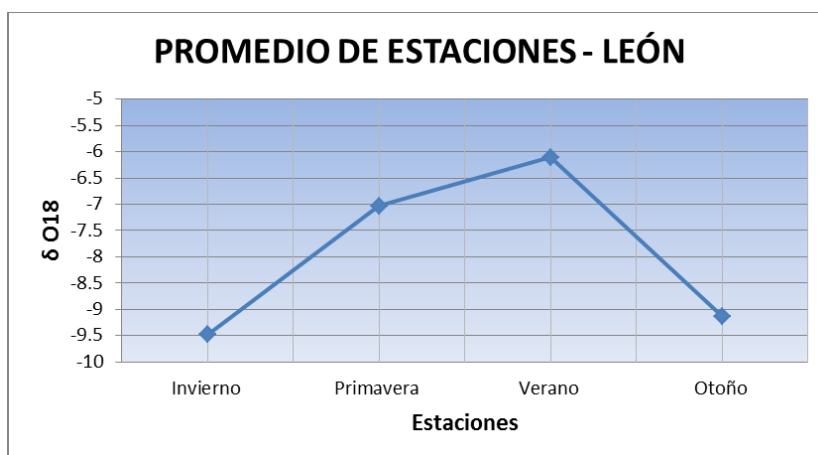


Gráfica 26 Representación de los promedios anuales de Valladolid

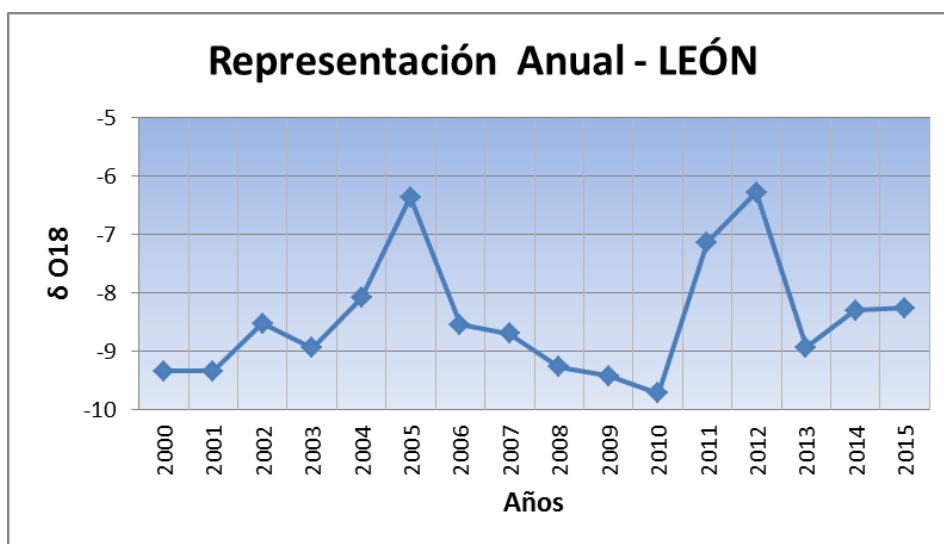
8) Estación de León



Gráfica 27 Valores Isotópicos Vs Precipitación de León

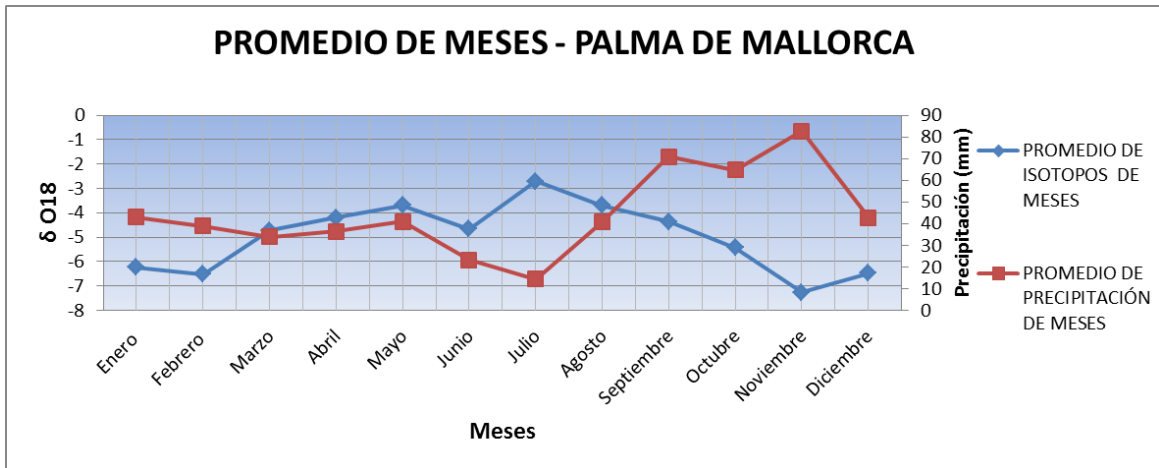


Gráfica 28 Representación de los promedios estacionales de León

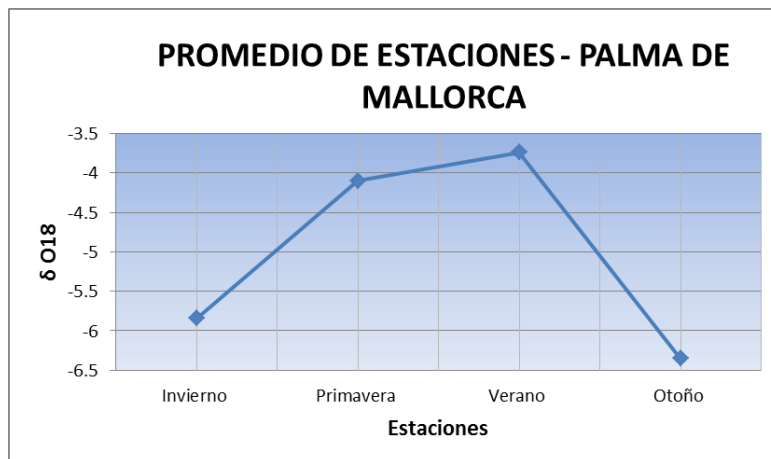


Gráfica 29 Representación de los promedios anuales de León

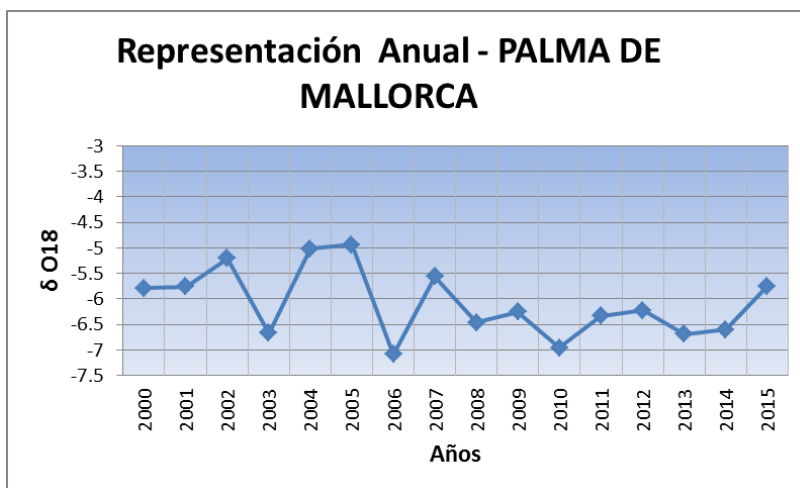
9) Estación de Palma de Mallorca



Gráfica 30 Valores Isotópicos Vs Precipitación de Palma de Mallorca

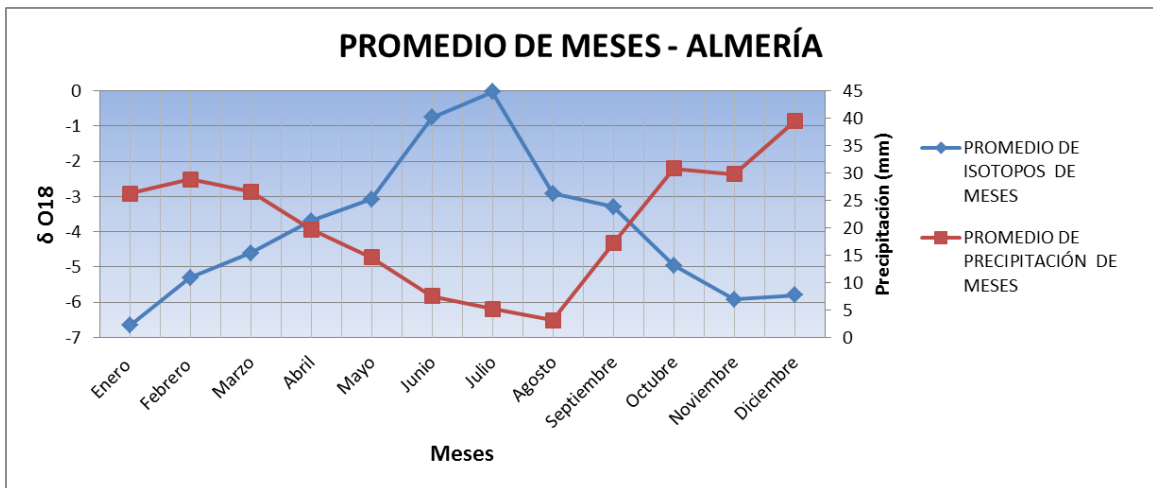


Gráfica 31 Representación de los promedios estacionales de Palma de Mallorca

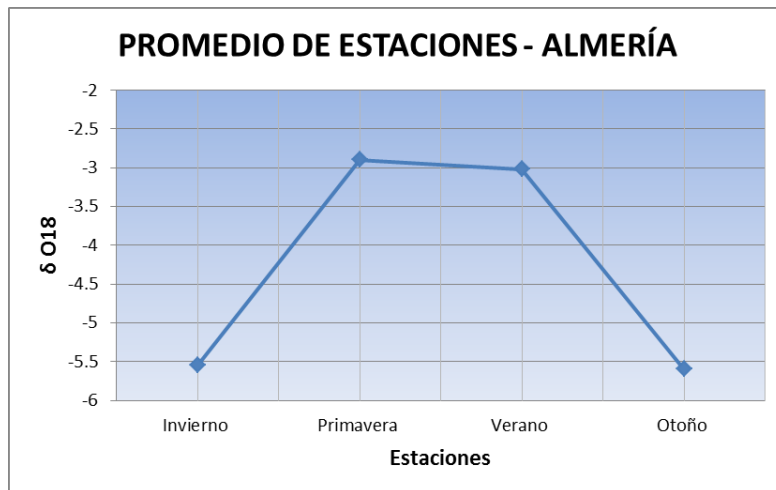


Gráfica 32 Representación de los promedios anuales de Palma de Mallorca

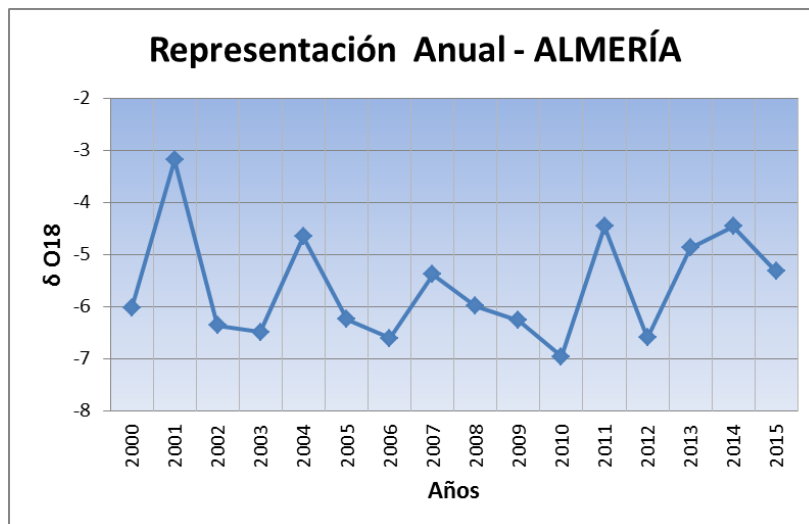
10) Estación de Almería



Gráfica 33 Valores Isotópicos Vs Precipitación de Almería

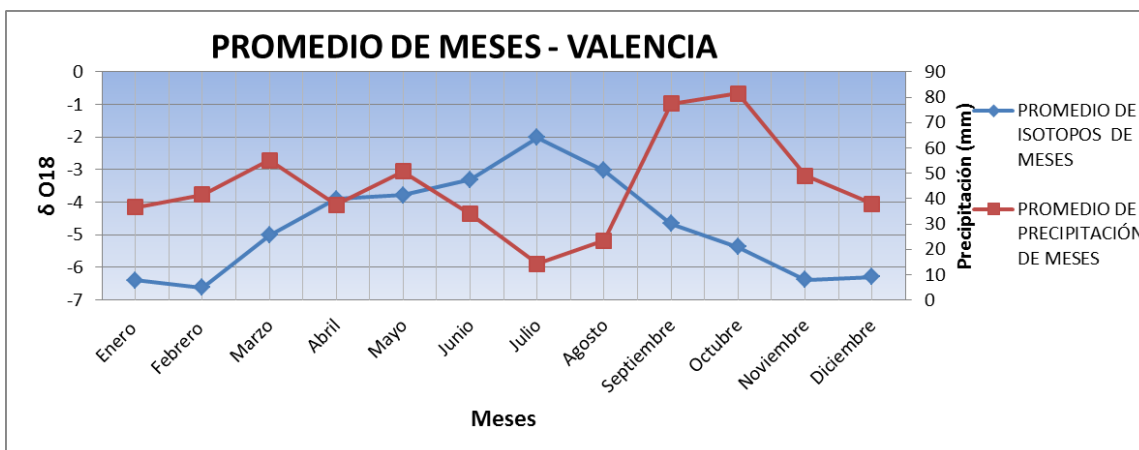


Gráfica 34 Representación de los promedios estacionales de Almería

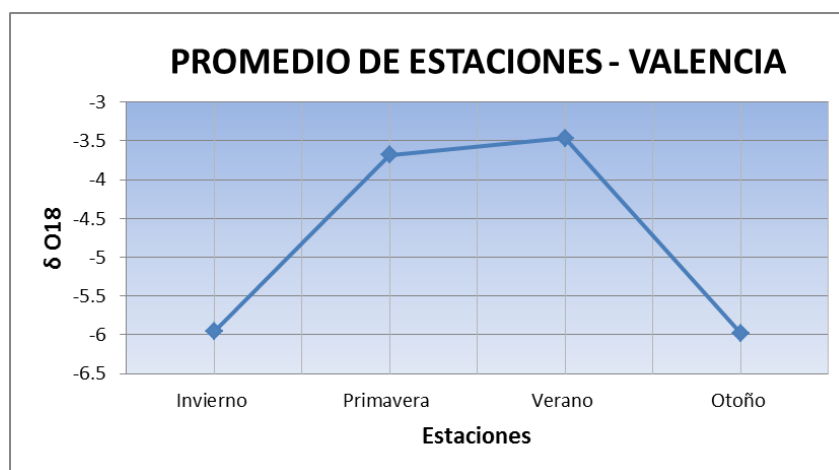


Gráfica 35 Representación de los promedios anuales de Almería

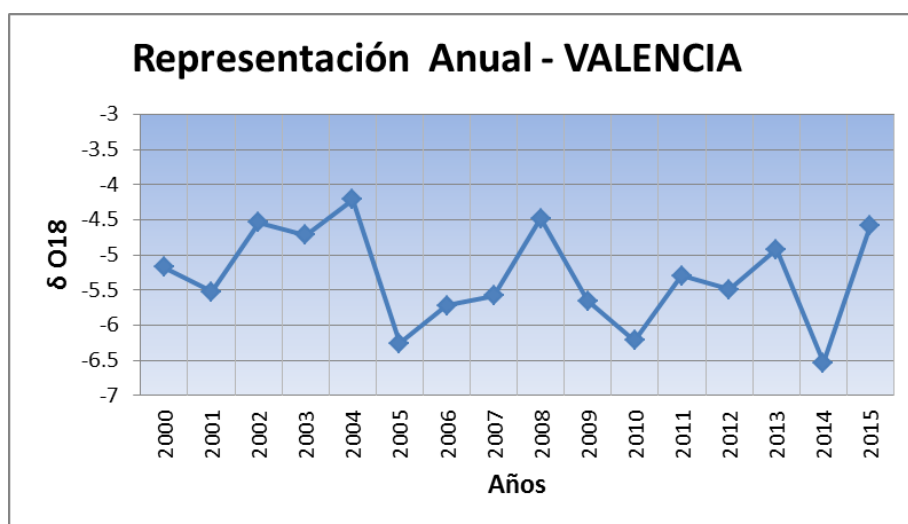
11) Estación de Valencia



Gráfica 36 Valores Isotópicos Vs Precipitación de Valencia

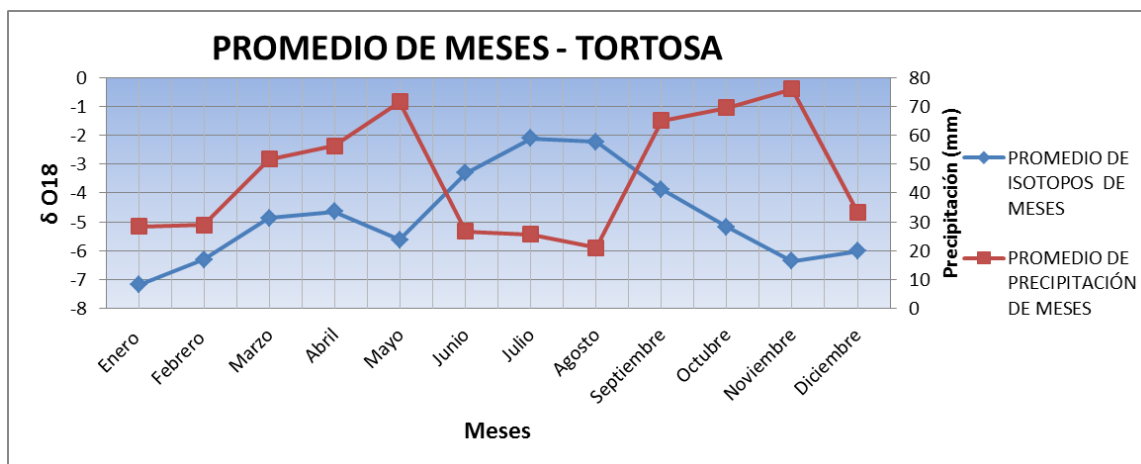


Gráfica 37 Representación de los promedios estacionales de Valencia

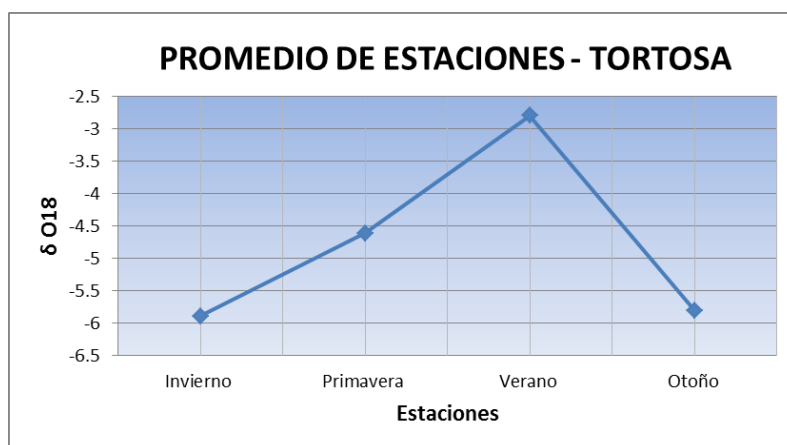


Gráfica 38 Representación de los promedios anuales de Valencia

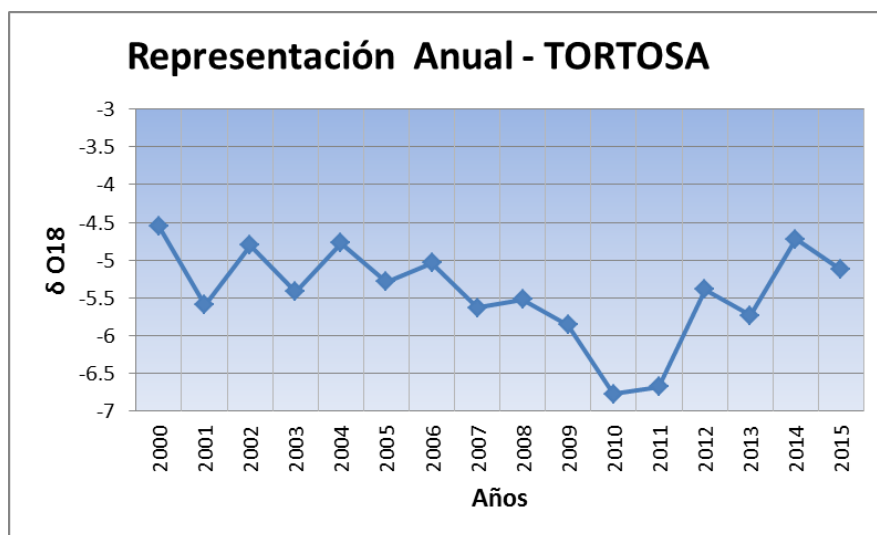
## 12) Estación de Tortosa



Gráfica 39 Valores Isotópicos Vs Precipitación de Tortosa

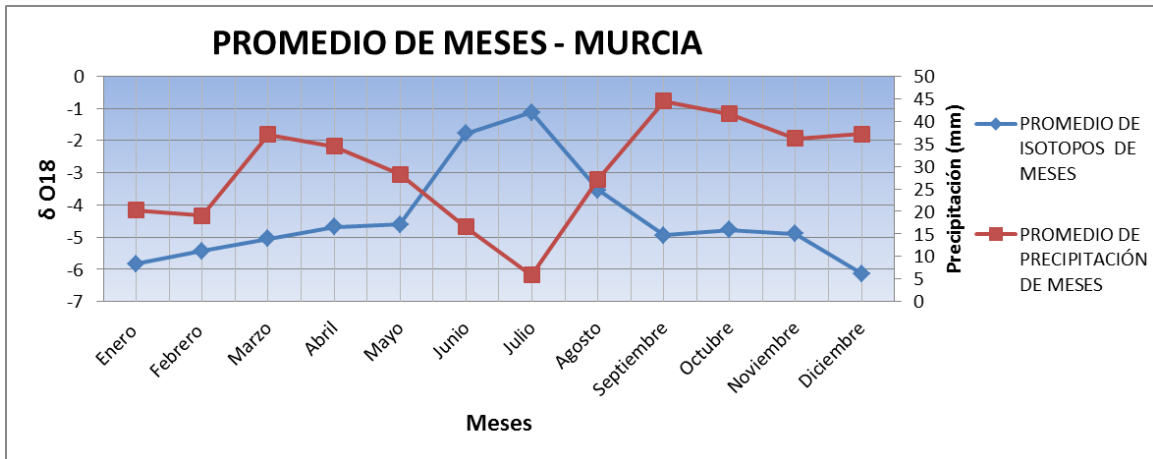


Gráfica 40 Representación de los promedios estacionales de Tortosa

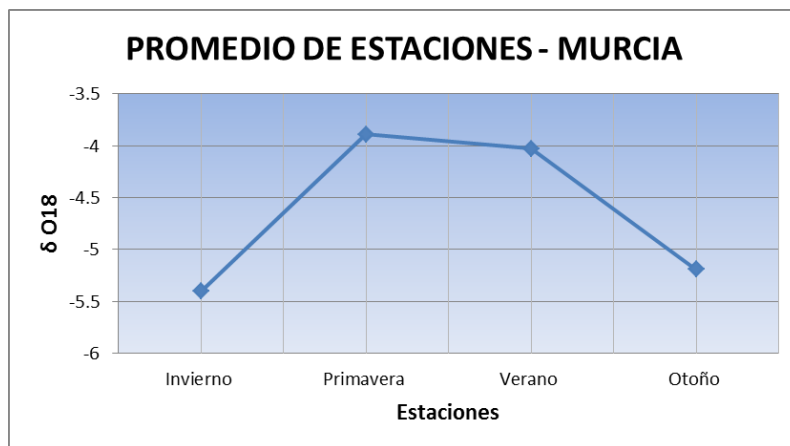


Gráfica 41 Representación de los promedios anuales de Tortosa

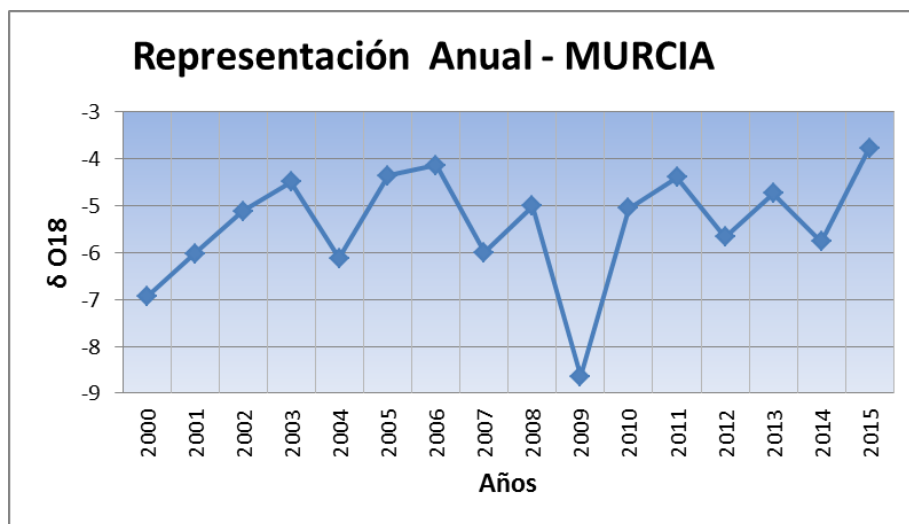
13) Estación de Murcia



Gráfica 42 Valores Isotópicos Vs Precipitación de Murcia

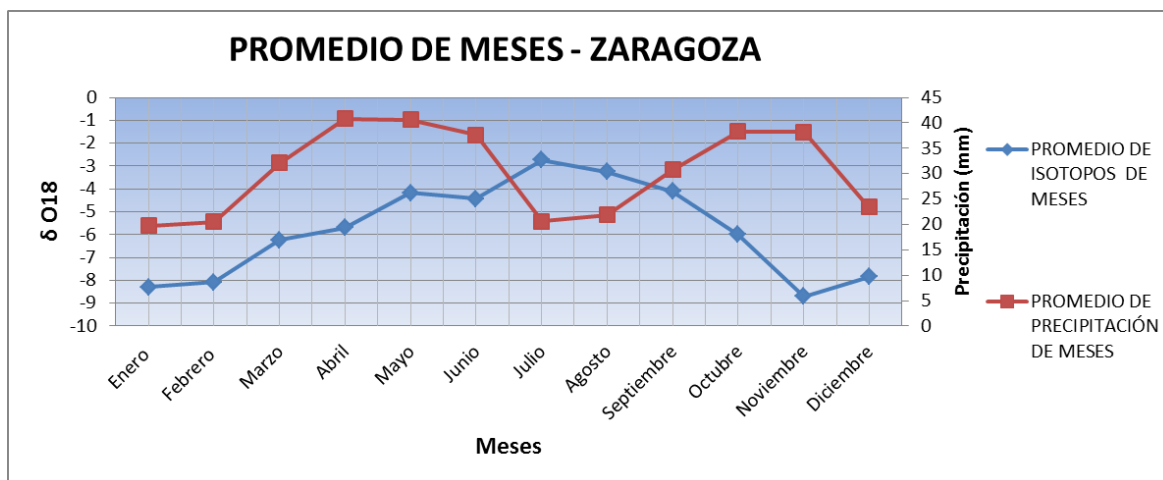


Gráfica 43 Representación de los promedios estacionales de Murcia

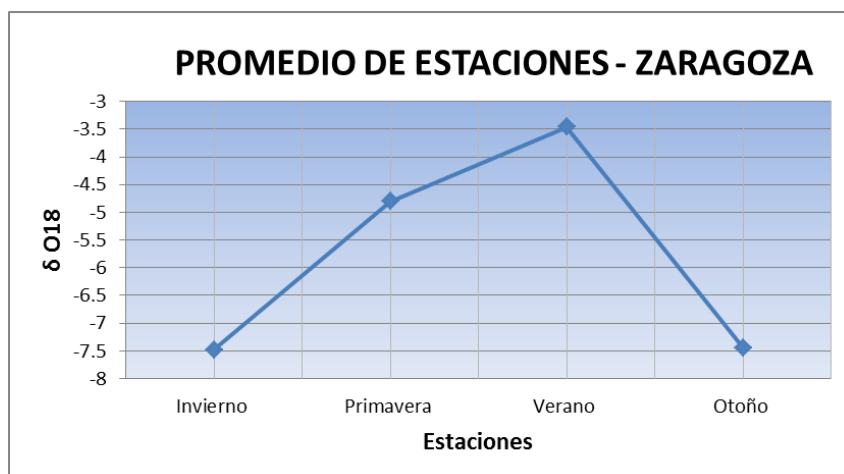


Gráfica 44 Representación de los promedios anuales de Murcia

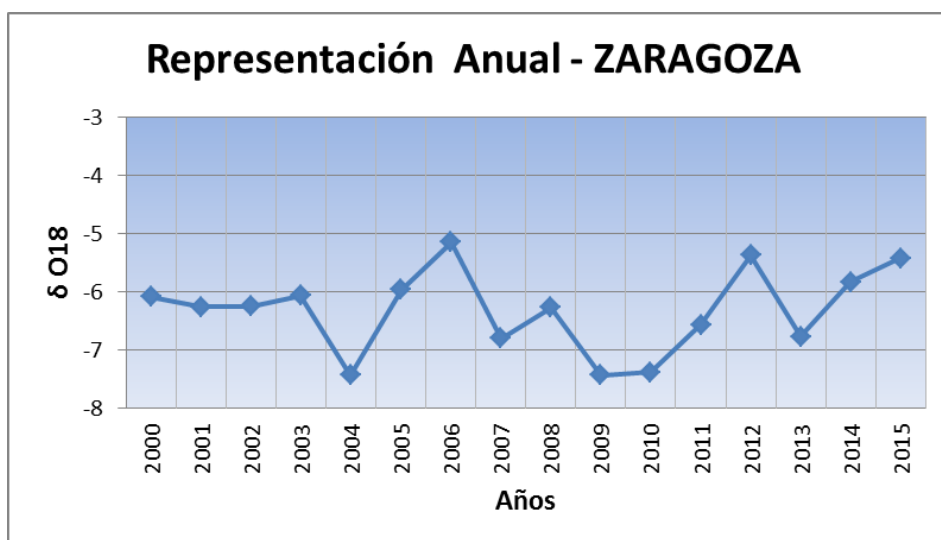
14) Estación de Zaragoza



Gráfica 45 Valores Isotópicos Vs Precipitación de Zaragoza



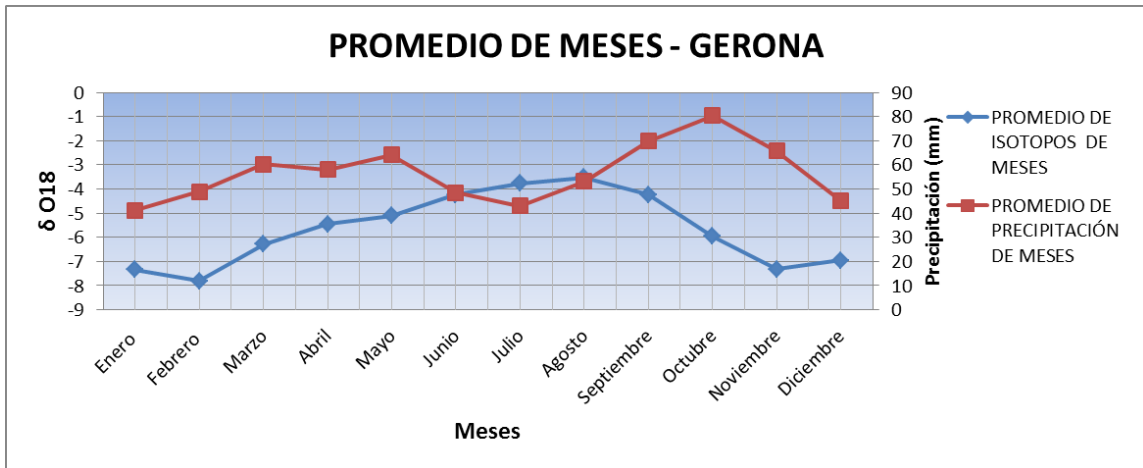
Gráfica 46 Representación de los promedios estacionales de Zaragoza



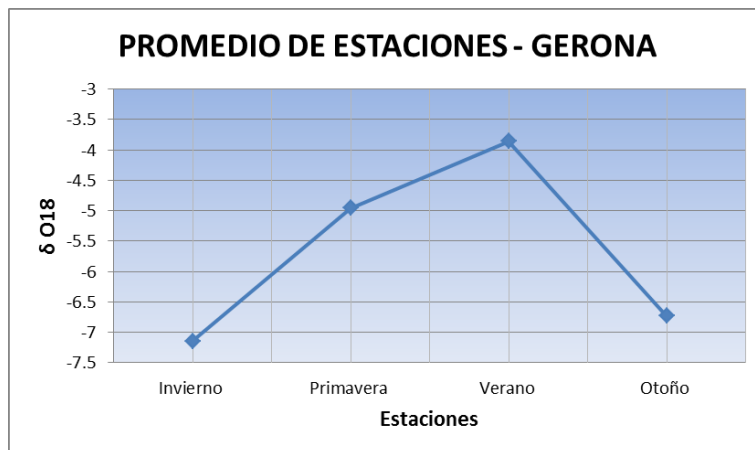
Gráfica 47 Representación de los promedios anuales de Zaragoza



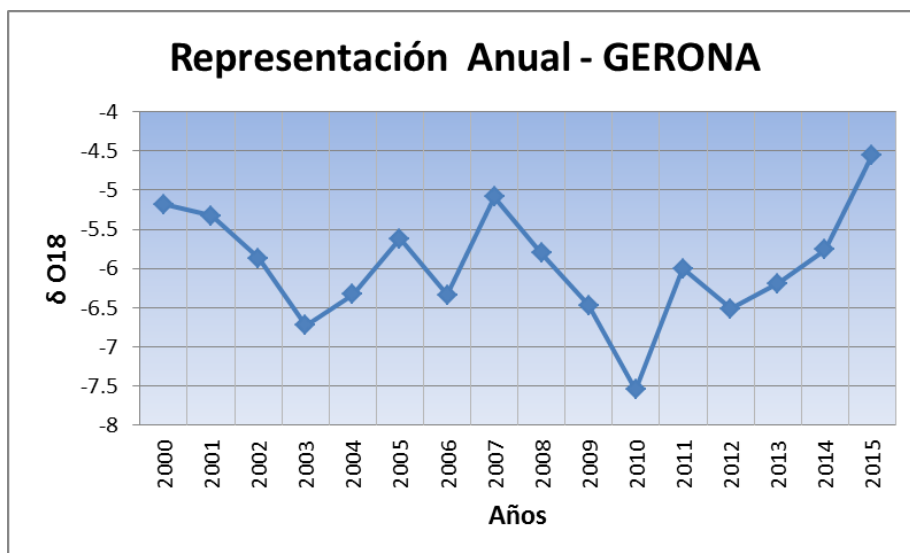
15) Estación de Gerona



Gráfica 48 Valores Isotópicos Vs Precipitación de Gerona

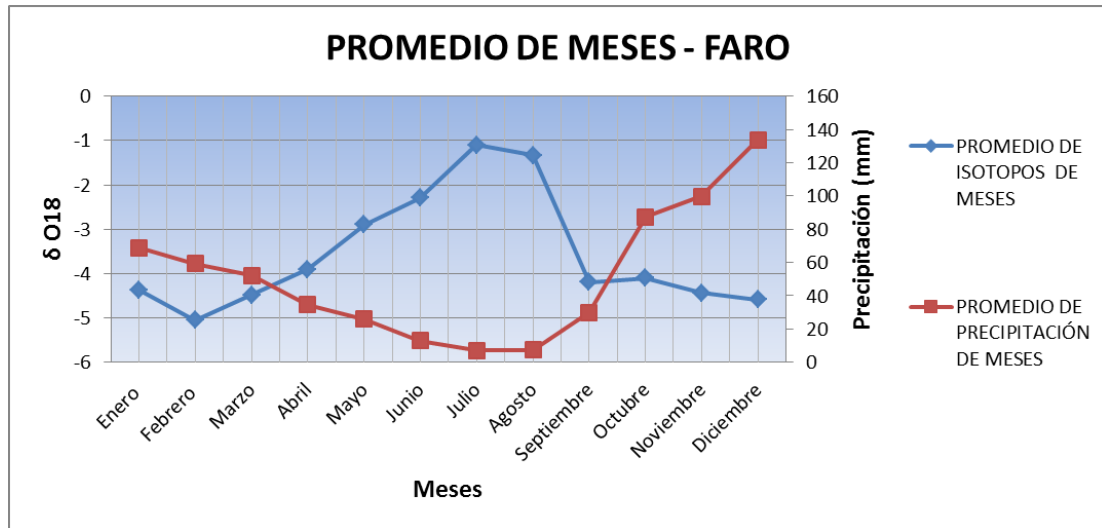


Gráfica 49 Representación de los promedios estacionales de Gerona

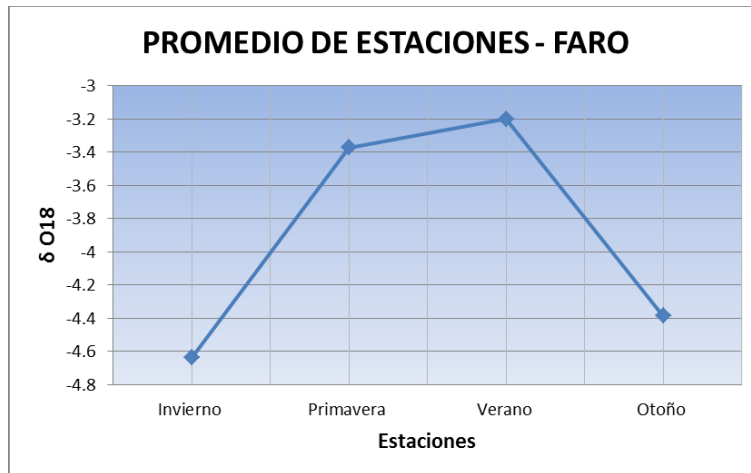


Gráfica 50 Representación de los promedios anuales de Gerona

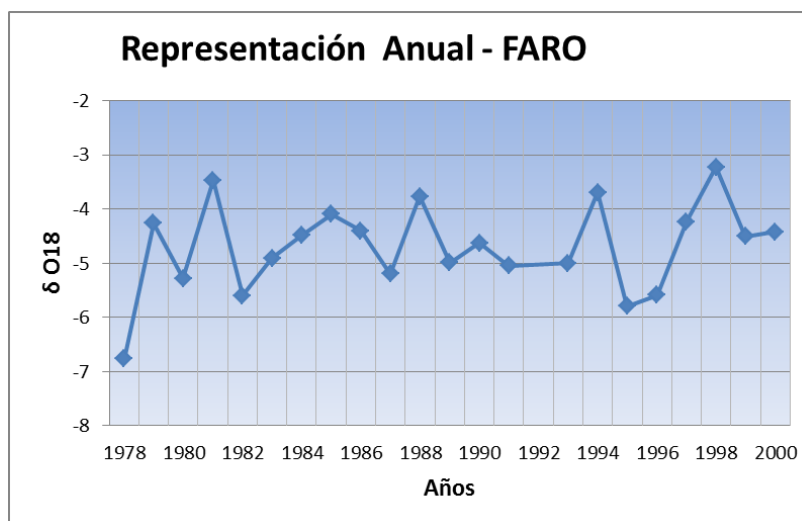
16) Estación de Faro



Gráfica 51 Valores Isotópicos Vs Precipitación de Faro

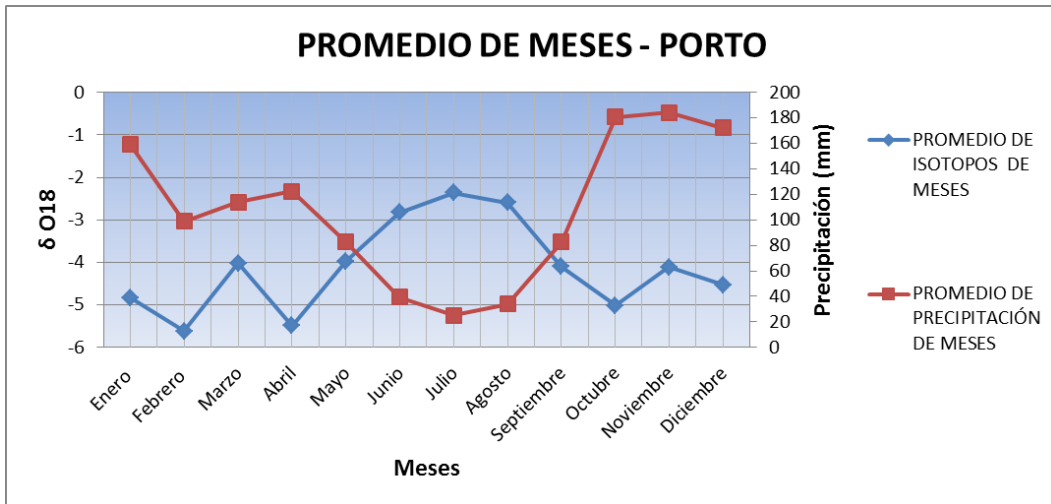


Gráfica 52 Representación de los promedios estacionales de Faro

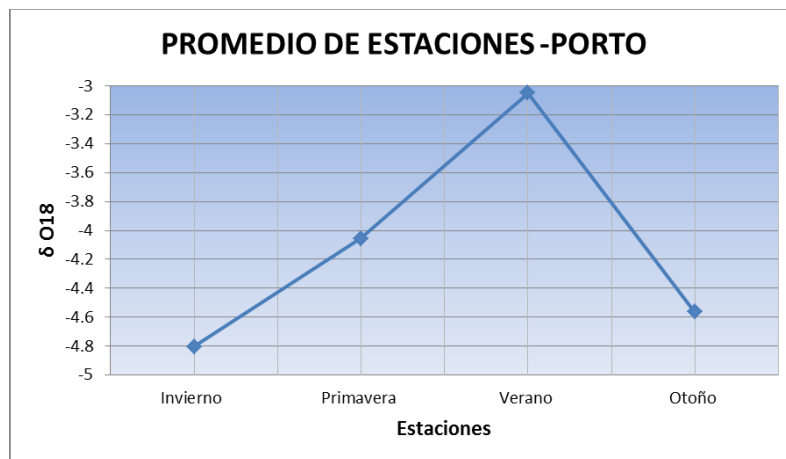


Gráfica 53 Representación de los promedios anuales de Faro

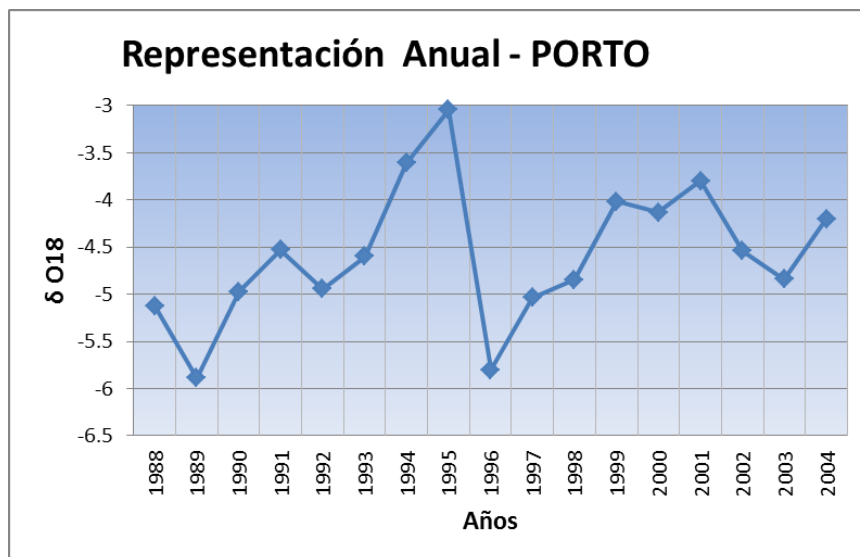
17) Estación de Porto



Gráfica 54 Valores Isotópicos Vs Precipitación de Porto

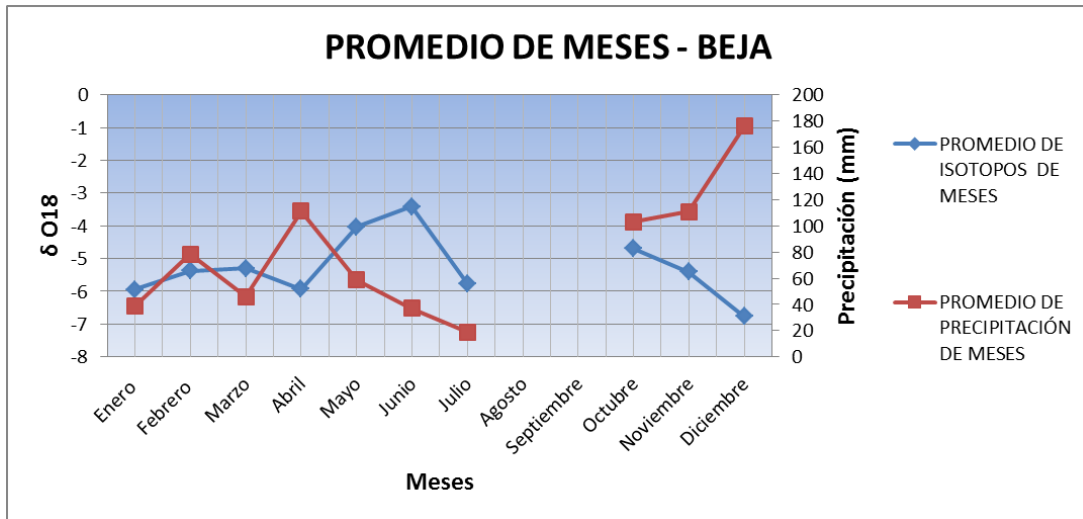


Gráfica 55 Representación de los promedios estacionales de Porto

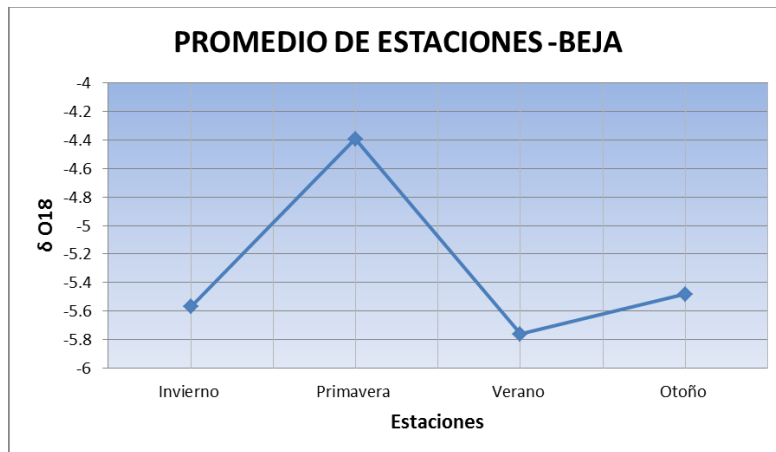


Gráfica 56 Representación de los promedios anuales de Porto

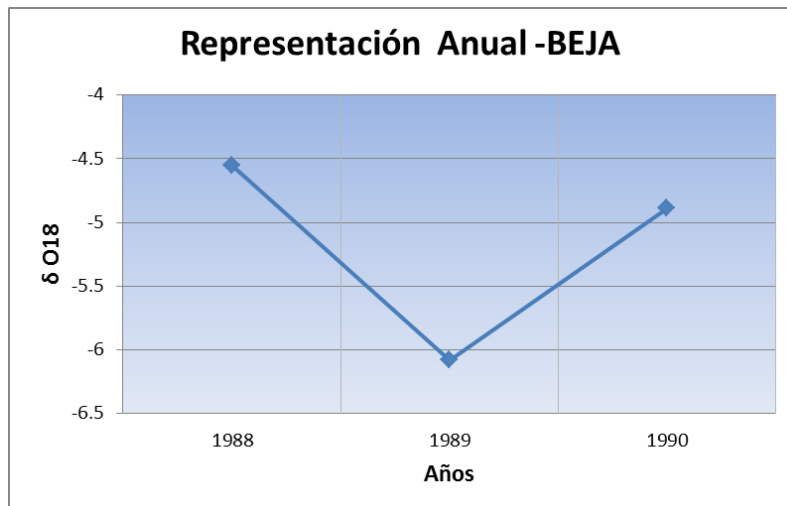
18) Estación de Beja



Gráfica 57 Valores Isotópicos Vs Precipitación de Beja

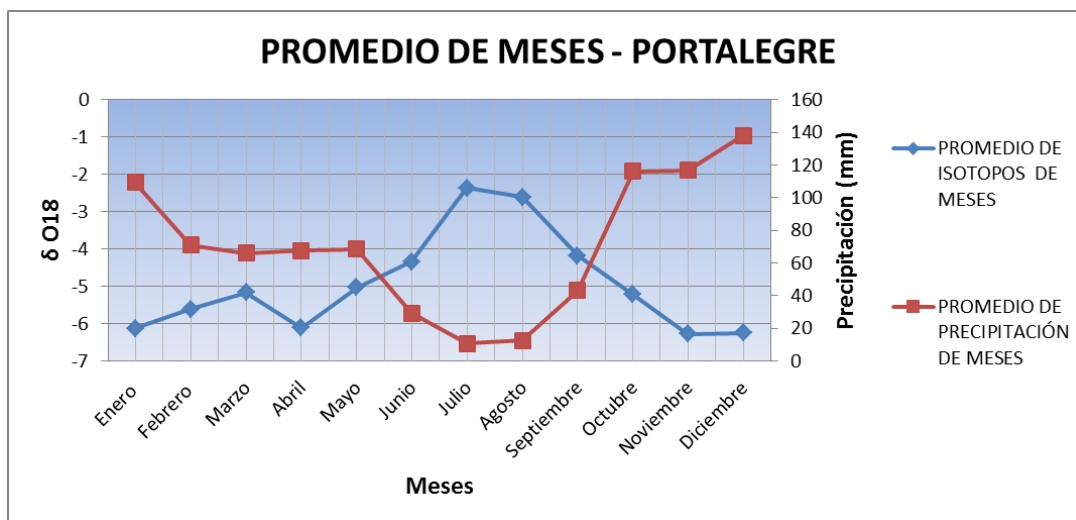


Gráfica 58 Representación de los promedios estacionales de Beja

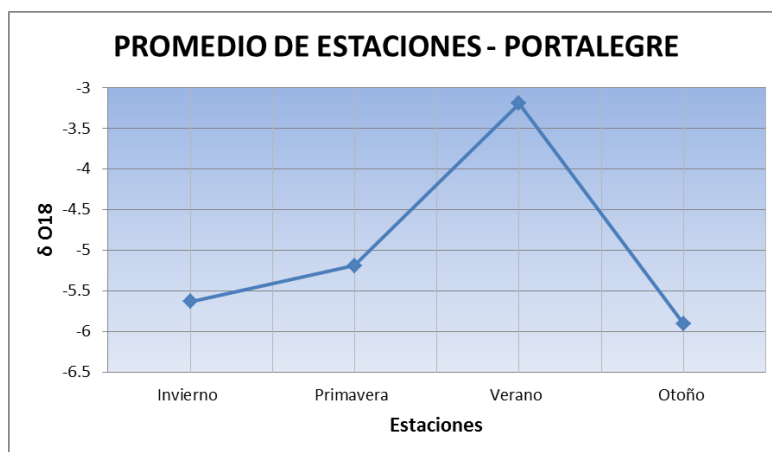


Gráfica 59 Representación de los promedios anuales de Beja

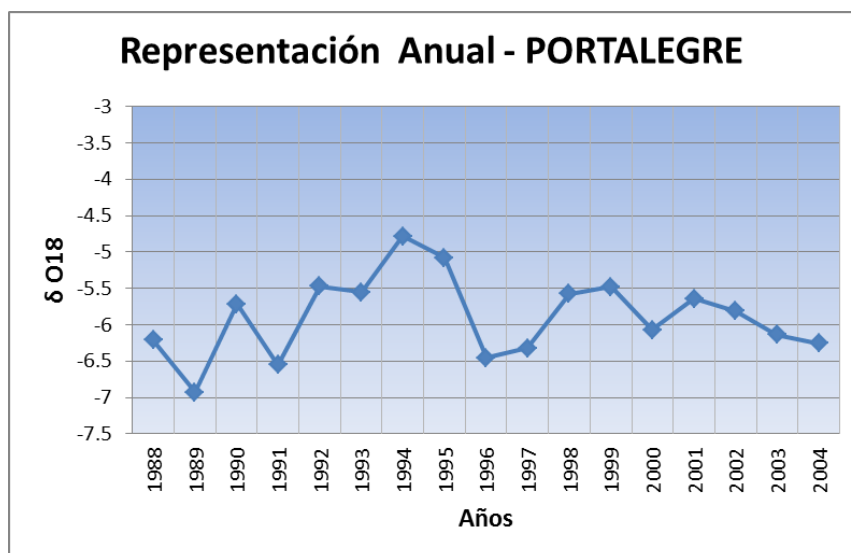
19) Estación de Portalegre



Gráfica 60 Valores Isotópicos Vs Precipitación de Portalegre

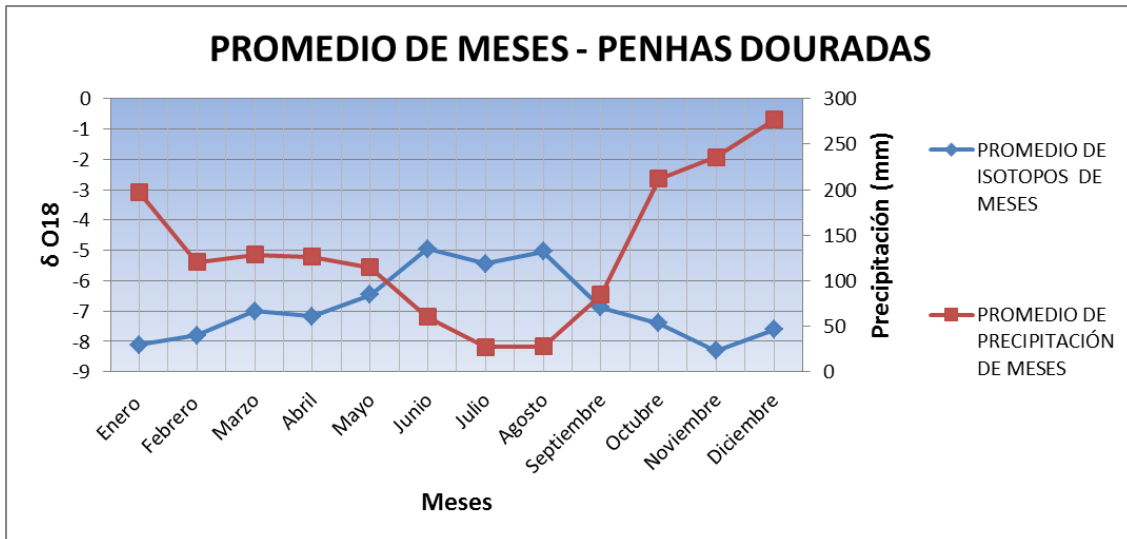


Gráfica 61 Representación de los promedios estacionales de Portalegre

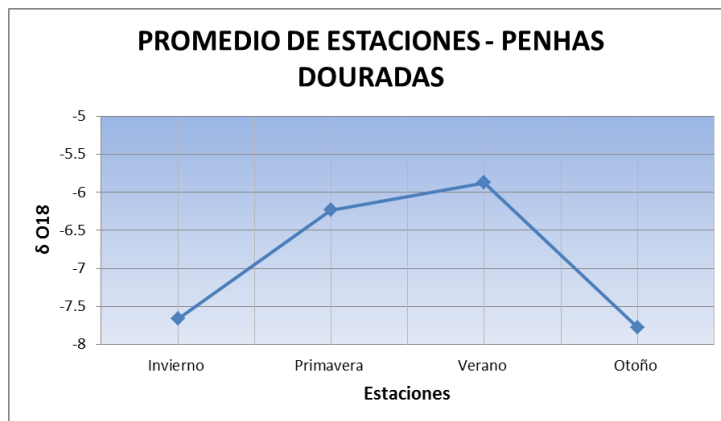


Gráfica 62 Representación de los promedios anuales de Portalegre

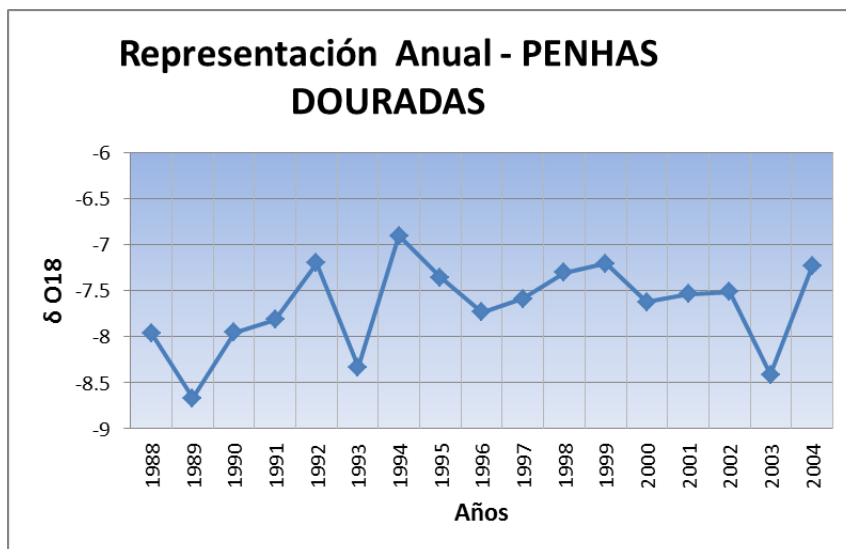
20) Estación de Penhas Douradas



Gráfica 63 Valores Isotópicos Vs Precipitación de Penhas Douradas

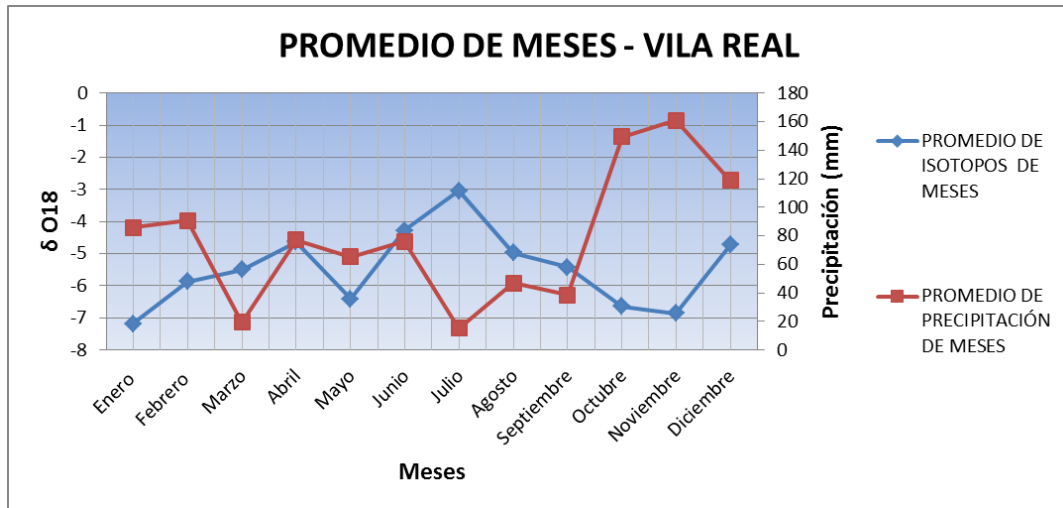


Gráfica 64 Representación de los promedios estacionales de Penhas Douradas

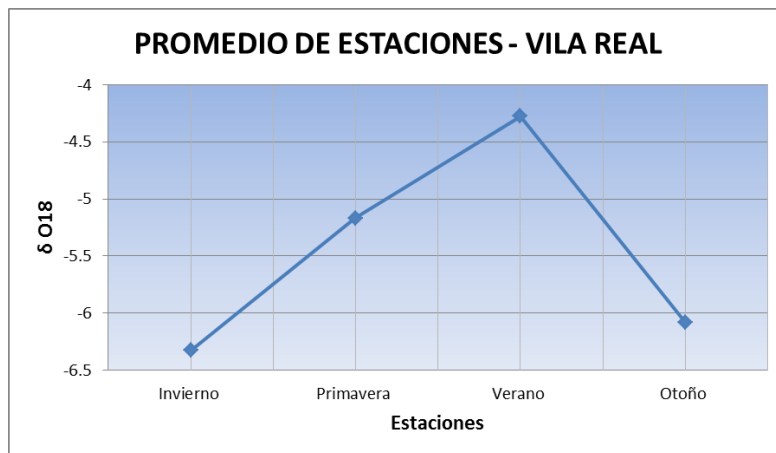


Gráfica 65 Representación de los promedios anuales de Penhas Douradas

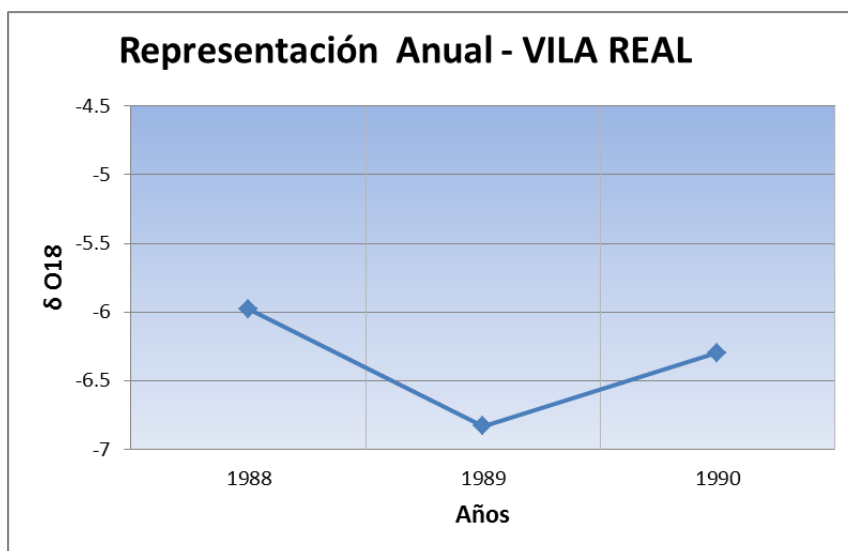
21) Estación de Vila Real



Gráfica 66 Valores Isotópicos Vs Precipitación de Vila Real

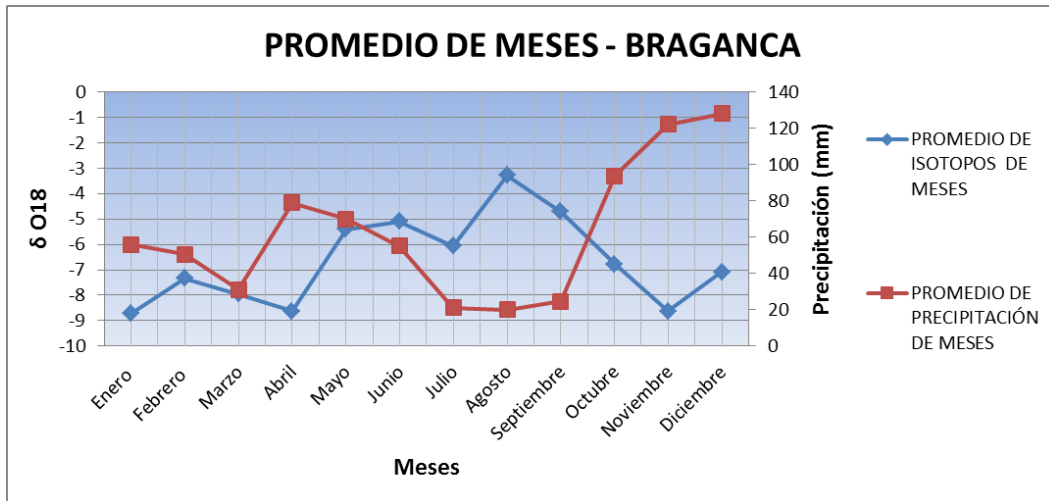


Gráfica 67 Representación de los promedios estacionales de Vila Real

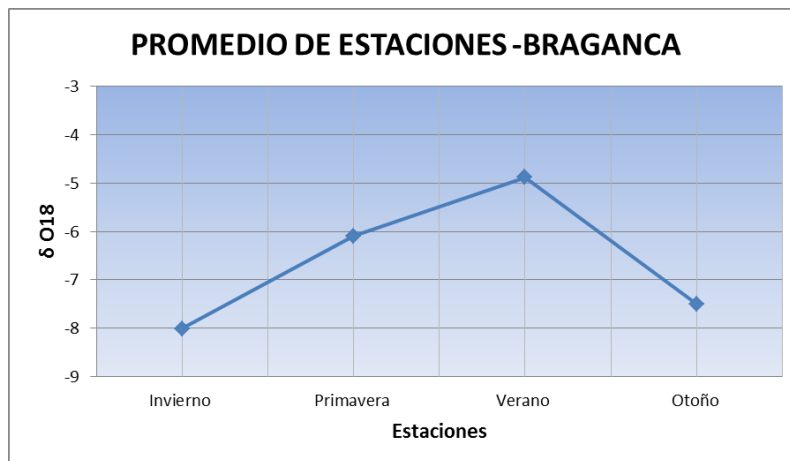


Gráfica 68 Representación de los promedios anuales de Vila Real

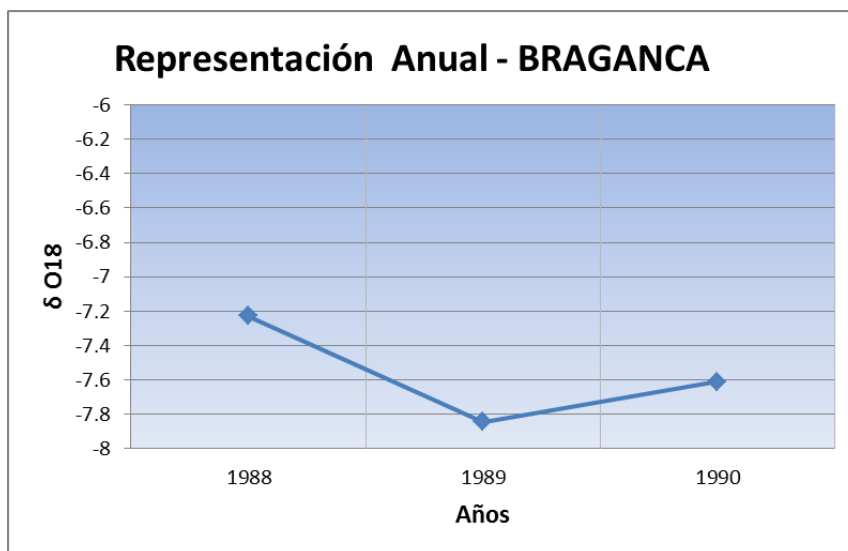
22) Estación de Braganca



Gráfica 69 Valores Isotópicos Vs Precipitación de Braganca



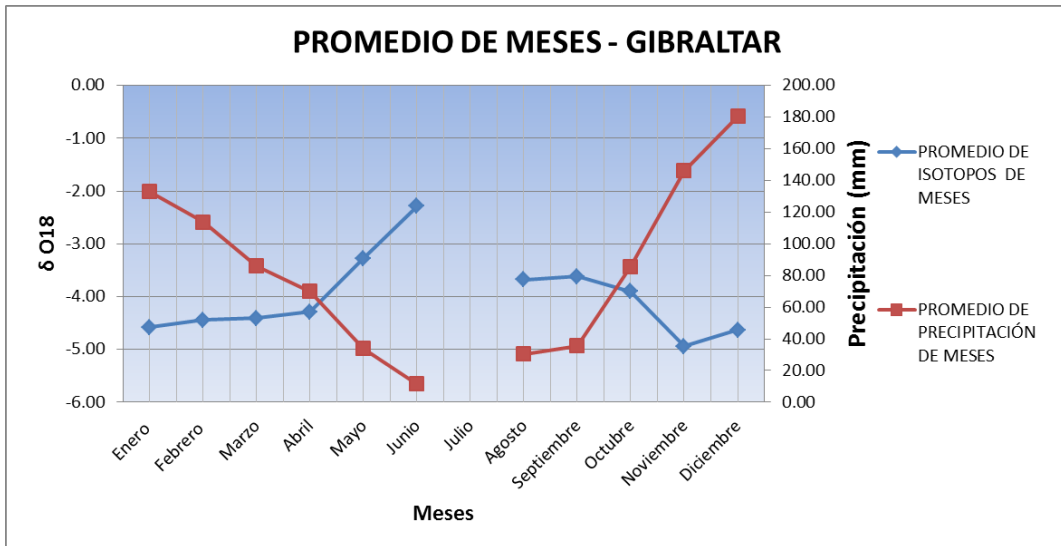
Gráfica 70 Representación de los promedios estacionales de Braganca



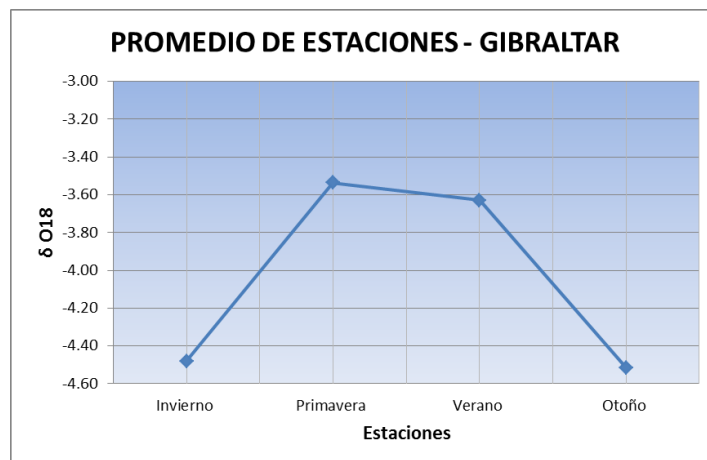
Gráfica 71 Representación de los promedios anuales de Braganca



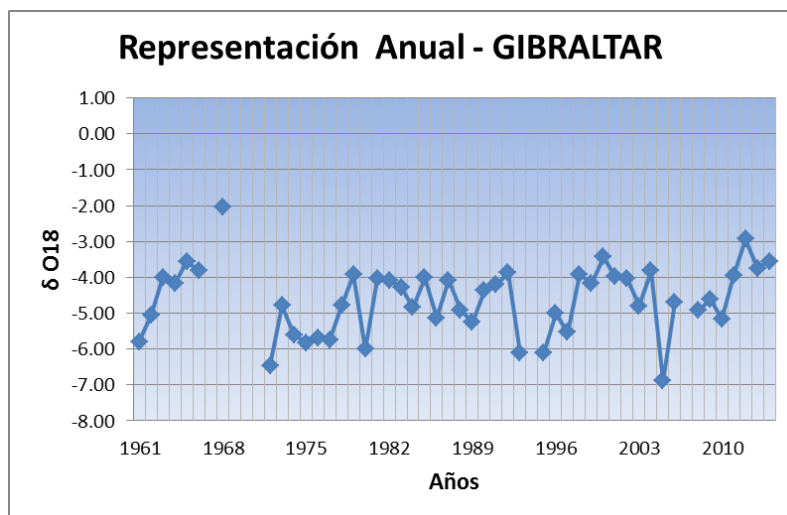
23) Estación de Gibraltar



Gráfica 72 Valores Isotópicos Vs Precipitación de Gibraltar



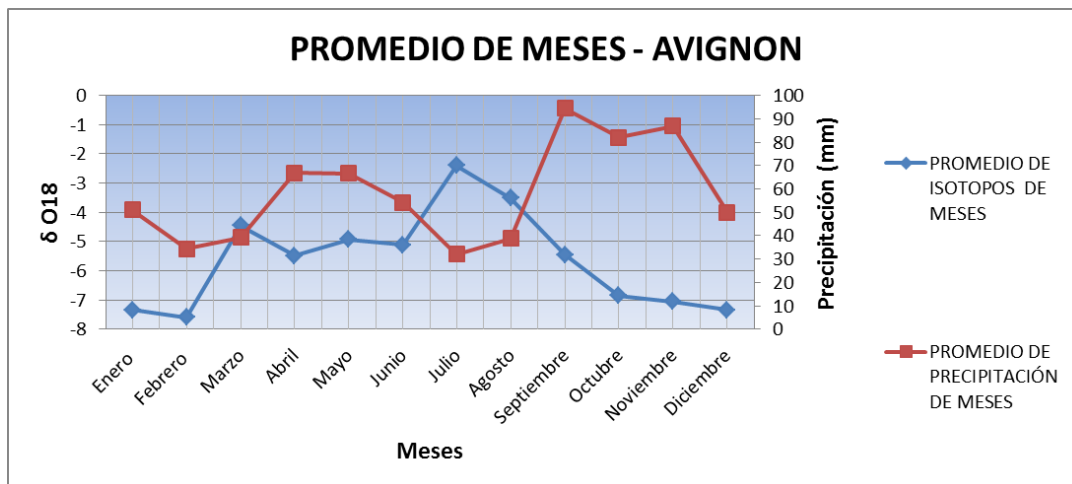
Gráfica 73 Representación de los promedios estacionales de Gibraltar



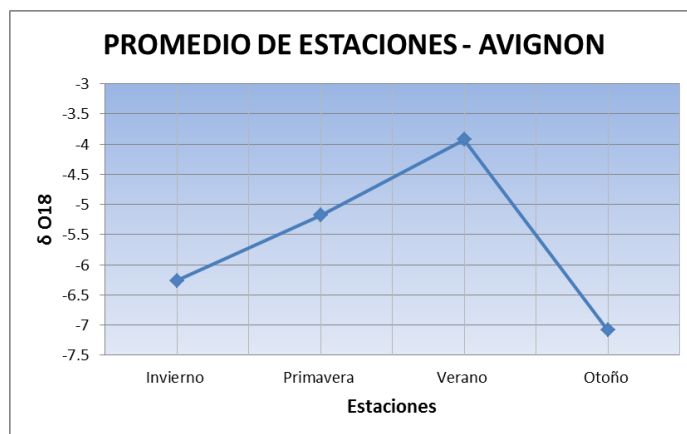
Gráfica 74 Representación de los promedios anuales de Gibraltar

## 8.2. Gráficas de las estaciones fuera de la península Ibérica

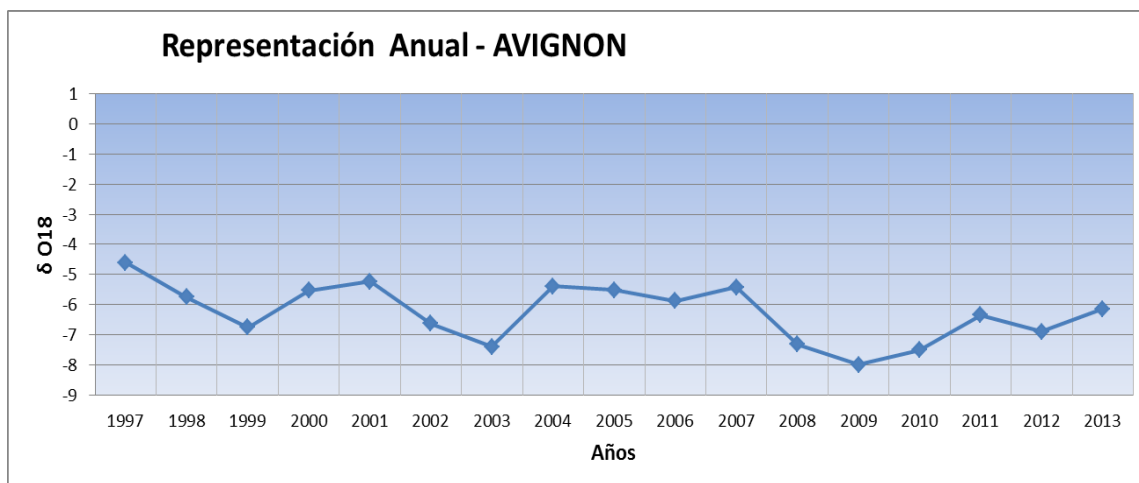
### 1) Estación de Mónaco



Gráfica 75 Valores Isotópicos Vs Precipitación de Mónaco

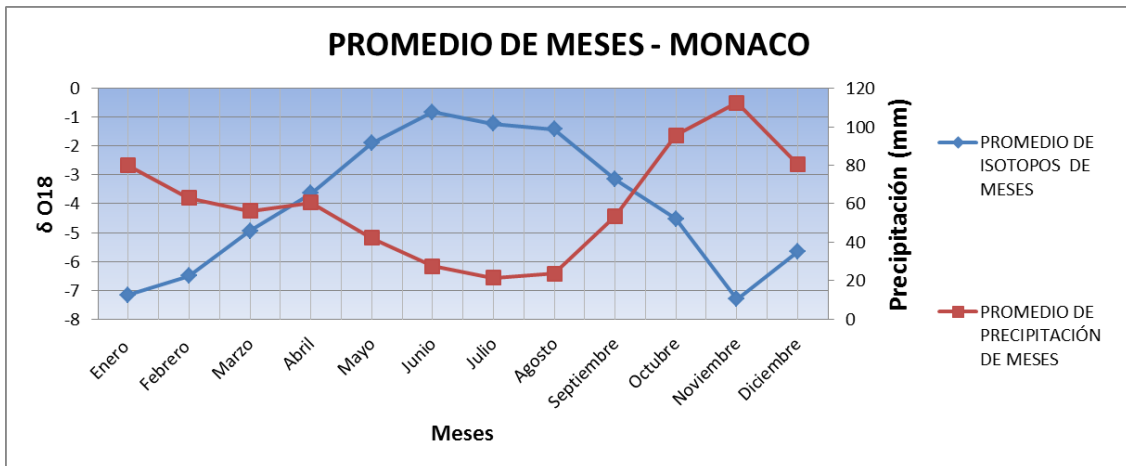


Gráfica 76 Representación de los promedios estacionales de Mónaco

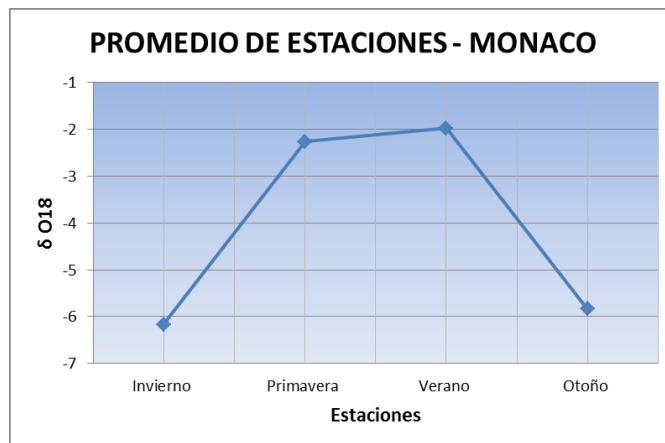


Gráfica 77 Representación de los promedios anuales de Mónaco

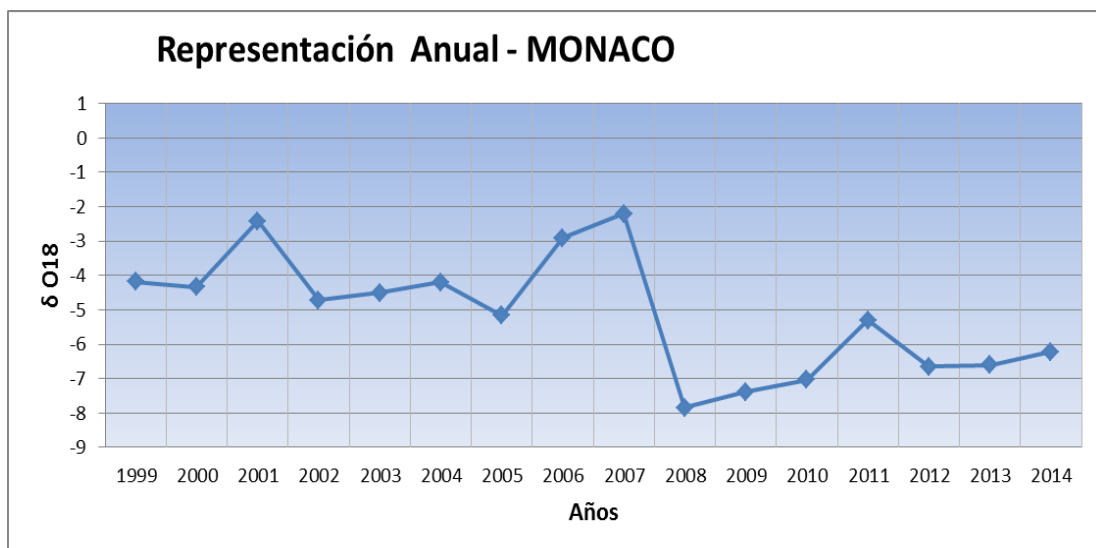
2) Estación de Algiers-CN



Gráfica 78 Valores Isotópicos Vs Precipitación de Algiers-CN

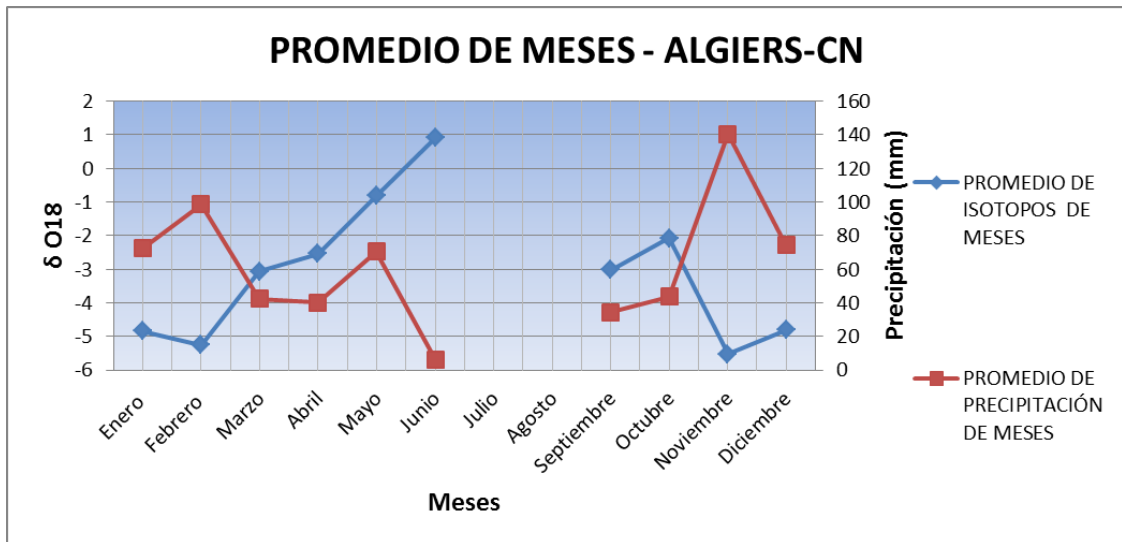


Gráfica 79 Representación de los promedios estacionales de Algiers-CN

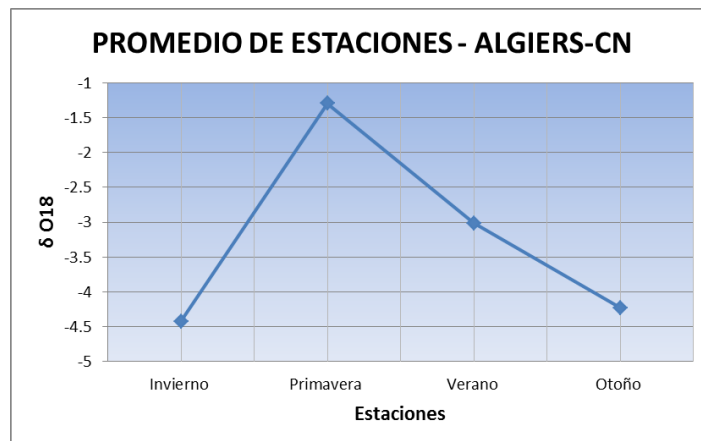


Gráfica 80 Representación de los promedios anuales de Algiers-CN

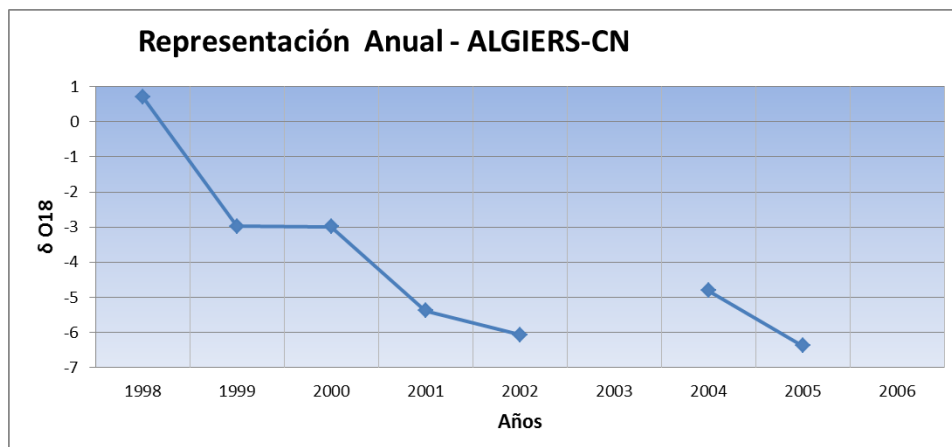
### 3) Estación de Avignon



Gráfica 81 Valores Isotópicos Vs Precipitación de Avignon

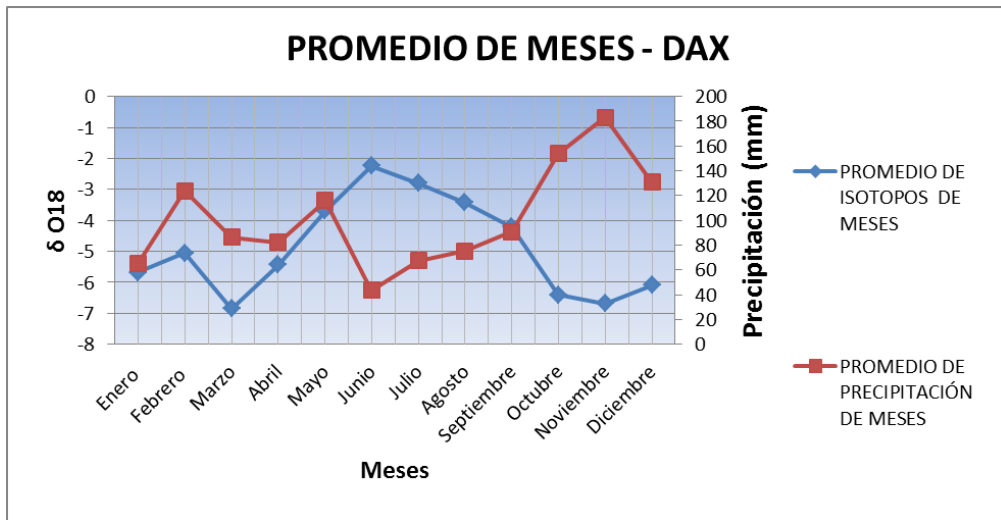


Gráfica 82 Representación de los promedios estacionales de Avignon

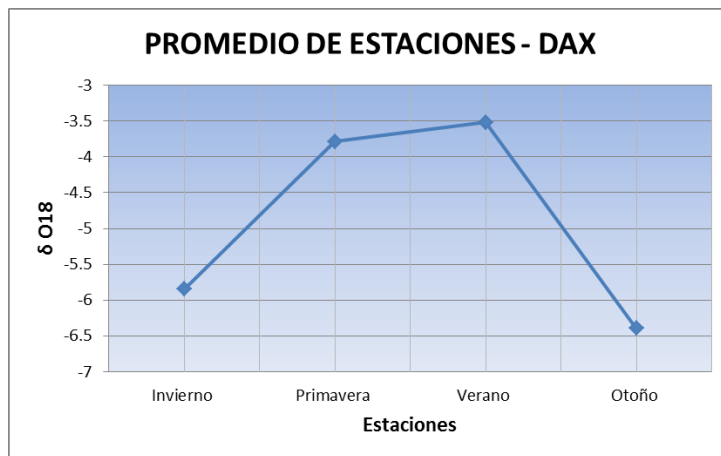


Gráfica 83 Representación de los promedios anuales de Avignon

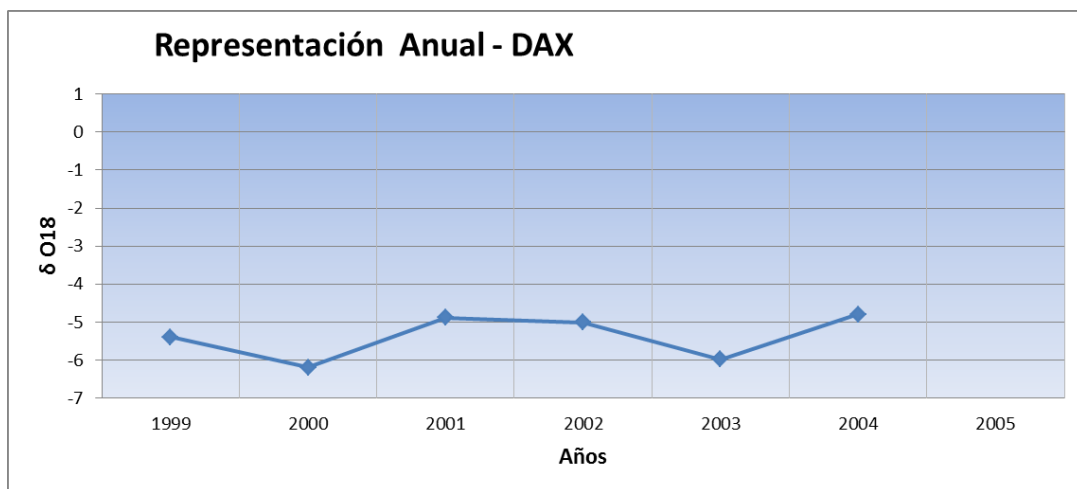
4) Estación de Dax



Gráfica 84 Valores Isotópicos Vs Precipitación de Dax



Gráfica 85 Representación de los promedios estacionales de Dax



Gráfica 86 Representación de los promedios anuales de Dax