

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIÓN PARA EL DESARROLLO
INTEGRAL REGIONAL, UNIDAD OAXACA.



Maestría en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento de Recursos Naturales

DISEÑO ÓPTIMO DE UNA RED DE MONITOREO PIEZOMÉTRICA PARA EL SISTEMA ACUÍFERO DE VALLES CENTRALES DE OAXACA

T e s i s

Que para obtener el grado de
Maestro en ciencias

Presenta:

Isela Coral De La Rosa Sarmiento

Directores de tesis: **Dra. Graciela del Socorro Herrera Zamarrón**

Dr. Francisco Castellanos León



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL SECRETARIA DE INVESTIGACION Y POSGRADO

ACTA DE REVISION DE TESIS

En la Ciudad de Oaxaca de Juárez siendo las 13:00 horas del día 10 del mes de noviembre del 2010 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación del **Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca (CIIDIR-OAXACA)** para examinar la tesis de grado titulada: **“Diseño óptimo de una red de monitoreo piezométrica para el sistema acuífero de valles centrales de Oaxaca”**.

De la Rosa

Apellido paterno

Sarmiento

materno

Isela Coral

nombre(s)

Con registro:

B	0	8	1	3	4	1
---	---	---	---	---	---	---

aspirante al grado de: **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES**

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACION DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

Directores de tesis

Dr. Francisco Castellanos León

Dra. Graciela del Socorro Herrera Zamarrón

Dr. Magdalena Caballero Caballero

Dr. Prisciliano Felipe de Jesús Cano Barrita

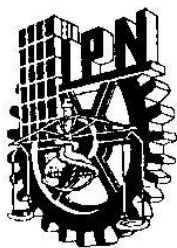
Dr. Andrés Pech Pérez

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

Dr. Juan Rodríguez Ramírez



CENTRO INTERDISCIPLINARIO
DE INVESTIGACION PARA EL
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL
C.I.I.D.I.R.
UNIDAD OAXACA
I.P.N.



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESION DE DERECHOS

En la Ciudad de Oaxaca de Juárez el día **10** del mes **noviembre** del año **2010**, el (la) que suscribe **De la Rosa Sarmiento Isela Coral** alumno (a) del Programa de **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES** con número de registro **B081341**, adscrito al Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del Drs. Francisco Castellanos León y Graciela del Socorro Herrera Zamarrón y cede los derechos del trabajo titulado: **“Diseño de una red de monitoreo piezométrica para el sistema acuífero de valles centrales de Oaxaca”**. al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección **Calle Hornos 1003, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca**, e-mail: posgradoax@ipn.mx ó marifer_26@hotmail.com Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

De la Rosa Sarmiento Isela Coral



CENTRO INTERDISCIPLINARIO
DE INVESTIGACIÓN PARA EL
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL
C. I. I. D. I. R.
UNIDAD OAXACA
I. P. N.

RESUMEN

En este estudio se propone el diseño de una red óptima de monitoreo piezométrica para el sistema acuífero de valles centrales de Oaxaca. Este acuífero es el principal aporte de agua que abastece a la ciudad de Oaxaca y municipios conurbados. La extracción del agua subterránea es a través de pozos profundos (60 m) y tipo noria ubicados a las márgenes de los ríos Atoyac y Salado, principales corrientes superficiales del valle, y funcionan como recargas naturales del acuífero.

La falta de sitios y frecuencias de monitoreo son consecuencia de las características de la información que se tiene de dicho acuífero, ya que suele ser escasa, redundante, discontinua y en algunos lugares es nula. Por tal motivo se tiene un conocimiento general del comportamiento hidrodinámico del agua subterránea. La metodología utilizada para el desarrollo del presente estudio, es una combinación de métodos y técnicas hidrogeológicas, geoestadísticas, de optimización y un filtro de Kalman.

Los resultados obtenidos del análisis geoestadístico permitieron ajustar y modelar un semivariograma que refleja la correlación espacial de la piezometría, siendo el modelo de tipo exponencial el que tiene los parámetros de mejor ajuste a los datos.

Para el diseño óptimo de la red de monitoreo piezométrica se propuso como puntos de estimación los nodos de una malla regular con un ancho de celda de 500 x 500 metros para tener una superficie que cubra la región de interés dentro del acuífero, con el objetivo de que al momento de minimizar la varianza sobre estos puntos se le dé igual peso a la incertidumbre en todas las zonas del acuífero que interesan analizar. Los puntos de muestreo son 332 pozos existentes y fueron considerados en el diseño de la red 112 pozos que son suficientes para obtener el mismo nivel de información (95%). Cubriendo de esta manera el objetivo de la red de monitoreo, conocer la elevación de los niveles piezométricos en una región predefinida del acuífero.

ABSTRACT

This paper proposes the design of an optimized network for monitoring water table aquifer system of central valleys of Oaxaca. This aquifer is the main source of water that supplies the city of Oaxaca and neighboring municipalities. The extraction of groundwater is through deep wells (60 m) and type wheel located on the banks of rivers and Salado Atoyac, major surface currents of the valley, and function as natural recharge of the aquifer.

The lack of monitoring sites and frequencies result from the characteristics of the information we have on the aquifer, since it is usually small, redundant, broken and in some places is nil. For this reason we have a general knowledge of groundwater hydrodynamics. The methodology for the development of this study is a combination of methods and techniques hydrogeological, geo-statistics, optimization and Kalman filter.

The results of geostatistical analysis and modeling allowed a semivariogram set reflecting the spatial correlation of the piezometric, with the exponential model which has the parameters that best fit the data.

For the optimal design of piezometric monitoring network was proposed as points estimate the nodes of a regular grid with a cell width of 500 x 500 meters for a surface covering the region of interest within the aquifer, with the aim of that when minimizing the variance of these points is given equal weight to the uncertainty in all areas of interest to analyze aquifer. The sampling points are 332 existing wells and were considered in the design of the network 112 wells that are sufficient to achieve the same level of information (95%). Thus covering the objective of the monitoring network, knowing the elevation of groundwater levels in a predefined region of the aquifer.

Dedicatoria

Este trabajo está dedicado a mi familia:

A mi hijo *Dario Alexander Amaya De la Rosa*, a quien amo con todo el corazón y que a pesar de la adversidad y su corta edad supo comprenderme, amarme, apoyarme e impulsarme a desarrollar con orgullo y satisfacción cada actividad del presente trabajo.

A mi madre (*Onesima*) y mi padre (*Tobias*) porque gracias a su cariño, guía y apoyo he llegado a realizar uno más de los anhelos de mi vida: fruto del inmenso apoyo, amor y confianza que en mi se depositó y con los cuales he logrado terminar una etapa de mi vida profesional, que constituye el legado más grande que pudiera recibir y por lo cual les viviré eternamente agradecida.

Con cariño y respeto.

Isela Coral De la Rosa Parmiento

Agradecimientos

Al **Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral y Regional (CIIDIR) Unidad Oaxaca del Instituto Politécnico Nacional** por la oportunidad que me otorgó al aceptarme como una de sus alumnas.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT)**, por el financiamiento otorgado a través de su sistema de becas, durante los estudios de posgrado.

Al **Programa Institucional de Formación de Investigadores** por la beca otorgada a través de los proyectos:

- Modelado numérico del flujo subterráneo del acuífero de Valles Centrales de Oaxaca (claves SIP: 20090675 y SIP: 20100142).
- Evaluación de la calidad del agua en el río los perros, Oaxaca (clave SIP: 2010555).

A los distinguidos y honorables miembros de la comisión revisora y jurado de tesis: **Dra. Graciela del Socorro Herrera Zamarrón, Dr. Francisco Castellanos León, Dr. Prisciliano Cano Barrita, Dr. Magdaleno Caballero Caballero y Dr. Andrés Pech López**, por sus sugerencias y recomendaciones realizadas para el mejoramiento del presente estudio.

Un muy extenso y especial agradecimiento al **Dr. Salvador Isidro Belmonte Jiménez** que a pesar de las circunstancias nunca me dejó sola y supo ser el mejor de los guías, que gracias a su apoyo, conocimientos y amistad estuvo siempre desde el inicio hasta la culminación del presente estudio. Y a la **M en C María de los Ángeles Ladrón de Guevara Torres** quien me brindó su apoyo y amistad.

A mi mejor amiga de la maestría (**Ana María Pineda Reyes**), con quien compartí momentos difíciles y felices, y que además en los momentos de flaqueza tuvo las palabras precisas para levantarme el ánimo y continuar hasta el final.

Isela Coral De la Rosa Parmiento

Índice General

	Paginas
Índice General	i
Índice de figuras	iii
Índice de tablas	v
INTRODUCCIÓN	1
ANTECEDENTES	3
Análisis Espacio- Temporal.....	3
Diseño de redes de monitoreo.....	4
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	7
JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	8
OBJETIVOS	9
General	9
Específicos	9
HIPÓTESIS	9
Capítulo 1. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL	9
INTRODUCCIÓN.....	10
1.1 TEORIA GENERAL DEL AGUA SUBTERRANEA.....	10
1.1.1 Recursos hídricos naturales.....	10
1.1.2 Acuíferos	11
1.1.3 Usos del agua.....	13
1.1.4 Implicaciones en la variación de los niveles piezométricos.....	13
1.2 DISEÑO DE REDES DE MONITOREO	14
1.3 MONITOREO A LARGO PLAZO (MLP).....	15
1.4. DISEÑO ÓPTIMO DE REDES DE MONITOREO DE AGUA SUBTERRÁNEA	15
1.5 MÉTODOS DE DISEÑO ÓPTIMO DE REDES DE MONITOREO DE AGUA SUBTERRÁNEA	17
1.5.1 Métodos basados en reglas para identificar planes de monitoreo a largo plazo	18
1.5.2 Métodos estadísticos.....	19
1.5.3. Métodos probabilísticos.....	21
Capítulo 2. DESCRIPCIÓN DEL ACUÍFERO DE VALLES CENTRALES DE OAXACA .	24
2.1 ESTUDIOS PREVIOS	24
2.2 ZONA DE ESTUDIO	26

2.2.1 Localización	26
2.2.2 Población.....	27
2.2.3 Clima	27
2.2.4 Fisiografía.....	28
2.3 Hidrogeología.....	28
Capítulo 3. METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ÓPTIMO DE LA RED DE MONITOREO PIEZOMÉTRICA.....	36
3.1. MEDICIÓN DE NIVELES PIEZOMÉTRICOS	36
3.2. ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO PARA LA PIEZOMETRÍA DE VALLES CENTRALES DE OAXACA	39
3.2.1 Análisis estructural.....	39
3.2.2 Ajuste del semivariograma.....	41
3.3. DISEÑO ÓPTIMO DE LA RED DE MONITOREO	43
3.3.1 Objetivo de la red de monitoreo	43
3.3.2 Cálculo de la matriz de covarianza	43
3.3.3 Definición de los puntos de estimación y muestreo	44
3.3.4 Análisis del número total de pozos a incluir en la red de monitoreo.....	45
Capítulo 4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	46
Análisis geoestadístico	46
Diseño optimo de la red de	48
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	53
RECOMENDACIONES	54
REFERENCIAS.....	55
Anexo A.....	59
Anexo B.....	72
Anexo C.....	78
Anexo D.....	88

Índice de figuras

Figura 1. Ciclo hidrológico	10
Figura 2. Tipos de acuíferos (libre, semiconfinado y confinado)	11
Figura 3. Pozo de bombeo en acuífero libre	12
Figura 4. Mapa de ubicación del área de estudio	26
Figura 5. Mapa geológico de la zona de estudio (Tomado de CNA, 2001).....	29
Figura 6. Sección geológica transversal valle de Etna (CNA, 2001)	30
Figura 7. Sección geológica transversal Valle de Zaachila- Zimatlán y valle de Tlacolula (CNA, 2001)	31
Figura 8. Mapa de flujo subterráneo, valles centrales de Oaxaca	33
Figura 9. Secciones hidrogeológicas transversales de valle de Etna, Zaachila y Tlacolula (CNA, 2001b)	34
Figura 10. Numero de mediciones de los niveles piezométricos en el periodo 2001-2009.....	35
Figura 11 GPS 12 XL Marca Garmin.....	36
Figura 12. Sonda electrica	47
Figura 13. Medición del nivel de agua subterránea	37
Figura 14. Flexómetro modelo 33-681	37
Figura 15. Ubicación del nivel del agua subterránea.....	38
Figura 16. Limite del área para el diseño de la malla	44
Figura 17. Nodos de la malla de estimación.....	55
Figura 18. Ajuste del semivariograma	47
Figura 19. Reducción de la varianza total y su influencia con el número de pozos	49
Figura 20. Mapa de ubicación de pozos pertenecientes a la red de monitoreo piezométrica de valles centrales de Oaxaca	52
Figura 21. Gráficos de distribución	62
Figura 22. Parámetros del semivariograma (efecto pepita, rango y meseta)	63
Figura 23. Semivariograma experimental.....	65
Figura 24 Anisotropía geometrica.....	66
Figura 25 Anisotropia zonal.....	78
Figura 26. Semivariograma teórico	67

Figura 27. Semivariogramas teóricos más comunes (Samper y Carrera, 1990).....	69
Figura 28. Ubicación de 332 pozos en el área de estudio. a) pozos pertenecientes a cada valles y b) rangos de piezometría.....	79
Figura 29 Histograma de la piezometría (Z) de 332 pozos.	81
Figura 30. Diagrama de cuantiles de la piezometría (Q-Q Znormal).	82
Figura 31. Análisis grafico de valores atípicos (outliers): a) distribución con 3 outliers y b) distribución sin outliers.....	83
Figura 32. Distribución espacial de los 332 pozos.	83
Figura 33. Histogramas de la distribución normal de las transformaciones. a) Log_Z, b) Inv_z y c) root_Z.....	84
Figura 34. Variograma isotrópico de la Piezometría (Z).....	85
Figura 35. Modelos teóricos ajustados al variograma experimental.....	86
Figura 36. Histograma de los errores de 332 datos de piezometría.....	89
Figura 37. Diagrama de los cuantiles de los errores	89
Figura 38. Análisis grafico de valores atípicos (outliers)	90
Figura 39. Cuantiles de los errores sin valores atípicos.....	91
Figura 40. Distribución espacial de los 332 residuos (errores)	91
Figura 41. Representación de los errores en las coordenadas X y Y.....	92
Figura 42. Semivariograma isotrópico de los errores	93
Figura 43. Modelos ajustados	93
Figura 45. Modelo exponencial.....	94
Figura 46. Histograma de los errores obtenidos de la validación cruzada.....	94

Índice de tablas

Tabla 1. Métodos de optimización de monitoreo a largo plazo por niveles de complejidad	17
Tabla 2. Población total por municipio CENSO 2005 (INEGI)	27
Tabla 3. Transformaciones para conseguir la normalidad	40
Tabla 4. Parámetros del modelo ajustado.....	47
Tabla 5. Estadígrafos de errores del modelo ajustado.....	47
Tabla 6. Diseño óptimo de red de monitoreo piezométrica propuesta para el área de estudio.....	50
Tabla 7. Registro de elevaciones del nivel estático y piezométrico para el año 2004.....	72
Tabla 8. Estadísticos básicos	80
Tabla 9. Comparación de estadísticos de la variable.....	84
Tabla 10. Parámetros de los modelos teóricos ajustados.....	87
Tabla 11. Estadígrafos de los residuos (errores).....	88

INTRODUCCIÓN

La ciudad de Oaxaca ha incrementado considerablemente sus necesidades de agua durante los últimos años. El acuífero de valles centrales de Oaxaca es el principal aporte de agua, para abastecer las necesidades del mismo valle y municipios conurbados, por otra parte su explotación intensiva ha reducido la cantidad y calidad de la misma (Flores et al. 2001).

A diferencia de los recursos hídricos superficiales, el flujo del agua subterránea es en general muy lento. En los primeros las velocidades se suelen expresar en metros por segundo, mientras que en los acuíferos la velocidad se mide en metros por año. Esto tiene muchas implicancias, especialmente en lo que se refiere a contaminación y monitoreo.

Los cambios tanto de la disponibilidad como de calidad son procesos que toman largos períodos. No obstante en lapsos más o menos extensos, alteraciones puntuales carentes de adecuado monitoreo, pueden alcanzar áreas significativas sin que se detecten impactos sobre el acuífero. Por ello, la definición de una adecuada red de monitoreo, ajustada a los usos potenciales y herramientas de control, es de gran importancia para la gestión de los recursos hídricos subterráneos también llamado *acuíferos*.

La estrategia espacial de localización de las estaciones de muestreo es tan relevante como la definición de parámetros, variables y frecuencia de monitoreo. Por ello, el accionar de forma preventiva debe ser la guía en toda actividad destinada a la conservación y gestión de los recursos hídricos subterráneos.

En la mayoría de las investigaciones, los datos recolectados pueden contener niveles significativos de incertidumbre, incluyendo complejas (inexplicables) variaciones en los valores observados de los atributos estimables del medio investigado. Debido a estas variaciones espaciales y temporales muchos autores han utilizado procedimientos estadísticos para modelar estructuras espaciales hidrogeológicas y propiedades fisicoquímicas de interés (Lin and Rouhani 2001).

El monitoreo de agua subterránea proporciona datos valiosos que son empleados para una gran variedad de aplicaciones tales como la descripción, estudio y documentación de los cambios en la condición natural de un acuífero. Éstas pueden permitir una evaluación de necesidades y estrategias de monitoreo como: número, localización y frecuencia de sitios de monitoreo y variables para ser monitoreadas (Lin and Rouhani 2001; Mogheir et al. 2006).

La información generada por dichas redes se puede utilizar para la caracterización y gestión de los recursos naturales, así como para la remediación de sitios contaminados. Dados los altos costos y los riesgos asociados con esas investigaciones, el desarrollo de procedimientos eficaces para el diseño de redes es una tarea esencial (Lin and Rouhani, 2001).

El objetivo principal de la presente investigación es diseñar una red óptima de monitoreo que proporcione información de la elevación del nivel estático (piezométrico) de agua en los pozos que conformen dicha red de monitoreo, y que permitan evaluar la dinámica de los niveles del acuífero para contribuir en la toma de decisiones respecto a su gestión.

ANTECEDENTES

El estudio del agua subterránea ha sido una labor, que ha adquirido gran importancia en las últimas décadas, debido a la contaminación y al aumento en la demanda de este recurso natural, como consecuencia del incremento poblacional. Los volúmenes existentes y la calidad del agua subterránea, se desconocen, pero pueden estimarse mediante estudios interdisciplinarios .

Este apartado, proporciona información enfocada al análisis espacio-temporal de propiedades hidrogeológicas así como los métodos utilizados para el diseño de redes de monitoreo de agua subterránea.

Análisis Espacio- Temporal

Los métodos geoestadísticos se han utilizado en los análisis espacio-temporal de infinidad de áreas de ciencias de la tierra, a continuación se mencionan algunos trabajos con este enfoque.

Para comprobar la utilidad del enfoque geoestadístico multivariado, Buttafuoco et al. (2005) realizaron un estudio para la caracterización de la variabilidad espacio-temporal del contenido de agua del suelo. Los datos analizados son densos en espacio pero escasos en tiempo. Se utilizaron datos de periodos de estiaje y lluvia.

Las principales fuentes de variación son las propiedades de textura y topográficas, mientras que una pequeña porción de las variaciones se adjudica a la influencia de las plantas. Los resultados obtenidos de la variografía revelaron una alta correlación temporal entre las mediciones del contenido de agua del suelo en distintos momentos, disminuyendo a medida que el intervalo entre las observaciones incrementaba. Los eventos de lluvia en otoño sobre el suelo seco producen un patrón de distribución irregular del agua en el suelo. El análisis de los mapas cokrigeados de agua del suelo, revela la dinámica de la redistribución del agua del suelo debido a la evapotranspiración o la lluvia. Por lo tanto, evaluar el grado de continuidad tanto en espacio y tiempo el contenido de agua se vuelve

particularmente importante cuando se está interesado en procesos como la erosión, la salinidad y la migración de plumas contaminantes.

Farley and Nicholson (2006) desarrollaron una imagen de alta resolución de la temperatura de los flujos en el subsuelo a poca profundidad en el lago Borax, Oregó, mediante la simulación estocástica. En general se acepta que la simulación estocástica puede ser una herramienta útil para extraer información de datos complejos y/o ruidosos. Aunque no son apropiadas en todas las situaciones, el análisis geoestadístico puede proporcionar una buena definición de las líneas de flujo en el subsuelo poco profundo. De los resultados muestran que el patrón de flujo de agua subterránea es inferido por la distribución de la vegetación en la superficie de la tierra, las tendencias en las muestras de geoquímica de los manantiales situados a lo largo de la traza de la falla, y un número limitado de muestras tomadas de isótopos en y alrededor del área de estudio. La aplicación de técnicas estocásticas dio detalles impresionantes sobre la trayectoria de flujo superficial del subsuelo, en gran parte por que el contraste de temperaturas entre los flujos geotérmicos y los cercanos a la superficie proporcionan una clara firma térmica.

Diseño de redes de monitoreo

Sophocleous (1983) empleó la teoría de variables regionalizadas para estimar el grado de variabilidad espacial del nivel freático. La preocupación por la eficiencia y la estabilidad económica del programa de monitoreo de las aguas subterráneas de Kansas dio lugar a un rediseño sistemático de esta red. Los objetivos de este trabajo incluyen la supervisión de los principales acuíferos en cada distrito de la gestión de las aguas subterráneas a un nivel espacial más uniforme de precisión, la eliminación de mediciones redundantes y la optimización de la información obtenida de cada pozo de observación. La metodología utilizada en este estudio es muy general y por lo tanto se puede aplicar a cualquier tipo de análisis de redes, donde la teoría de variables regionalizadas es aplicable. Los mapas de

error de la incertidumbre pueden ser utilizados en cualquier red, para determinar donde hace falta más información y para estimar el número de mediciones adicionales que sean necesarias.

Igúzquiza (1998) en su investigación presenta un método para establecer un diseño óptimo de red para la estimación de las medias locales de eventos de lluvia. El problema consistió en minimizar una función objetivo que incluye tanto la exactitud de la estimación media local (según lo expresado por la varianza de la estimación Kriging) y el costo económico del acopio de datos. Se utilizó el método geoestadístico más conocido de reducción de varianza en combinación con el algoritmo de minimización recocido simulado. Se presentan varios ejemplos de síntesis con el fin de ilustrar el funcionamiento de esta metodología en dos problemas de optimización diferentes: la selección óptima de un subconjunto de estaciones de un grupo que ya existe y el aumento óptimo de una red existente. De acuerdo a los resultados de esta investigación, Igúzquiza concluye lo siguiente: a) el método de recocido simulado como un algoritmo de optimización numérico, mejora el diseño óptimo de la red mediante la reducción de la varianza con respecto al tiempo de computo y permite la inclusión de otros criterios en la función objetivo como es la limitante económica; b) Con respecto al marco geoestadístico para la aplicación del método de reducción de varianza, la elección del variograma climatológico es muy práctico con el fin de eliminar la dependencia temporal.

Herrera (1998) en su investigación emplea una combinación de distintas metodologías como son los métodos geoestadísticos, método probabilístico (filtro de Kalman) y el método de optimización. En el cual se eligen las posiciones de los pozos de monitoreo pero no sus frecuencias de muestreo, la matriz de covarianza inicial que se utiliza en el filtro de Kalman se obtiene del análisis geoestadístico, para predecir la incertidumbre de la estimación. El criterio de optimización heurístico utilizado fue el minimizar el número de pozos necesarios para obtener un valor dado de una función de la varianza del error de la estimación, que en el

caso de redes de monitoreo en la que los pozos ya están construidos es equivalente a minimizar el costo.

Investigaciones como las de Nunes et al. (2004) están enfocadas en reducir la dimensión de redes de monitoreo de aguas subterráneas existentes (GMN). Utilizando el método de optimización recocido simulado, el método considera la redundancia. Se realizó un análisis de costo-beneficio para determinar el número de estaciones a incluir en el nuevo diseño en comparación con la pérdida de información.

Investigaciones como las de Buller et al. (1984); Hudak and Loáciga, (1993); Hudak et al. (1995) están fundamentadas en métodos basados en reglas, con un enfoque hidrogeológico y se apoyan en simulaciones analíticas o numéricas del flujo subterráneo y transporte de contaminantes para estimar la geometría de la pluma, definir zonas probables de impacto, y llevar a cabo pruebas *a priori* de la efectividad en la detección de las redes de monitoreo del agua subterránea..

Un ejemplo de métodos de tendencia basados en reglas, es la técnica de muestreo de costo efectivo (CES) (Ridley and MacQueen 1995; Johnson et al. 1996) que se fundamenta en la tendencia, variabilidad y estadísticas de magnitud que describen los contaminantes en un punto, generando la determinación de la frecuencia de muestreo en ese punto.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Una preocupación generalizada hoy en día es el acceso al agua en cantidad y calidad, ya que indudablemente es un factor de impulso para el desarrollo de los sectores productivos de cualquier sociedad. Las variaciones tanto en la disponibilidad como en la calidad del agua subterránea, son procesos que toman largos períodos. Sin embargo en lapsos más o menos extensos cambios puntuales que no tienen un adecuado monitoreo, pueden alcanzar áreas significativas sin que se detecten impactos sobre el acuífero.

En los valles centrales del estado de Oaxaca, la extracción de agua subterránea es a través de pozos “profundos” (generalmente menores de 90 m) y tipo noria. De los cuales se ha obtenido información sobre algunas características hidrogeológicas del acuífero. Sin embargo esta información en algunos casos es escasa, redundante y discontinua, es decir, no existen sitios ni frecuencias de muestreo constantes, que permitan evaluar el comportamiento y calidad del agua subterránea de este acuífero.

La información con la que se cuenta actualmente sobre este acuífero es general, y no existe un seguimiento constante de la misma. Las dependencias gubernamentales dedicadas a la gestión de este recurso en muchas ocasiones tienen información la cual es confidencial y no está disponible al público.

JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

El monitoreo de las aguas subterráneas es una de las acciones más importantes que deben de considerarse para soportar la estrategia y políticas de protección, conservación y aprovechamiento del recurso hídrico subterráneo.

La implementación de programas que permitan monitorear la respuesta de un acuífero y de sus tendencias de calidad son básicos para lograr una gestión eficaz del agua subterránea y cumplir con la principal meta de gestión, o sea, ayudar a mejorar la planeación, desarrollo, protección y manejo de las aguas subterráneas, anticipando o controlando la contaminación y los problemas de sobreexplotación o degradación de las mismas. Por ello, la definición de una adecuada red de monitoreo, ajustada a los usos potenciales y herramientas de control, es de gran importancia para la gestión de los acuíferos.

El contar con una red de monitoreo de la piezometría para el sistema acuífero de valles centrales del estado de Oaxaca, será un aporte importante ya que permitirá contar con información espacio-temporal suficiente y adecuada, evitando la duplicidad de esfuerzos y reducir costos de campo, logrando de esta manera profundizar en algunos aspectos como: hidrodinámica, movimientos de contaminantes, modelación de flujos, entre otros.

OBJETIVOS

General

Diseñar una red óptima de monitoreo de los niveles piezométricos del agua subterránea del acuífero de Valles Centrales de Oaxaca.

Específicos

1. Obtener información piezométrica y de propiedades hidrogeológicas a través de diferentes técnicas y métodos de campo.
2. Elaborar el modelo conceptual del acuífero de valles centrales de Oaxaca.
3. Realizar un análisis geoestadístico, para obtener un variograma que represente la correlación espacial de los niveles piezométricos.
4. Establecer el objetivo de la red óptima de monitoreo.
5. Definir los puntos de estimación y de muestreo que permitirán diseñar la red óptima de monitoreo.

HIPÓTESIS

1. El diseño de una red óptima de monitoreo de piezometría de agua, permitirá contar con información confiable para coadyuvar a la gestión integrada de los recursos hídricos subterráneos.
2. La red óptima de monitoreo diseñada evitará duplicidad de acciones y disminuirá costos de campo, al contar con sitios de muestreo que representen de manera significativa la hidrodinámica del sistema acuífero de los valles centrales de Oaxaca.

Capítulo 1. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

INTRODUCCIÓN

La presente investigación se enmarca en un campo multidisciplinario teniendo bases teóricas en: la hidrogeología, los métodos y técnicas geoestadísticas, probabilísticas y heurísticas. En el presente apartado se describe brevemente algunos conceptos básicos del agua subterránea, los usos y factores que afectan tanto la cantidad como calidad de la misma y los principios sobre la teoría enfocada al monitoreo a largo plazo.

1.1 TEORIA GENERAL DEL AGUA SUBTERRANEA

1.1.1 Recursos hídricos naturales

La división de los recursos hídricos correspondiente a agua superficial y aquella correspondiente a agua subterránea no tiene más que un alcance teórico, dada la unidad del ciclo hidrológico (**Figura 1**).

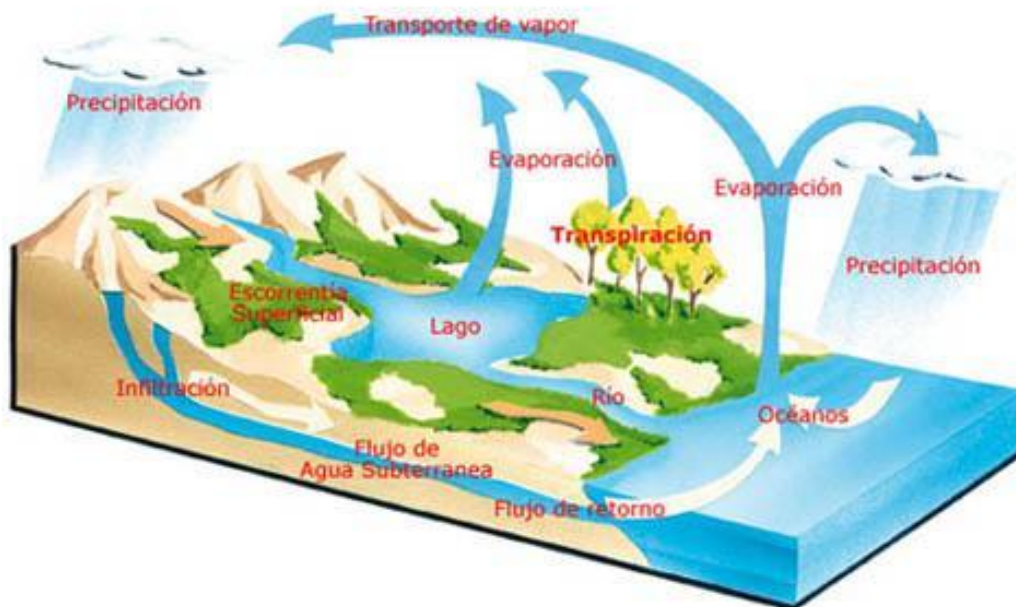


Figura 1. Ciclo hidrológico

Las aguas superficiales y las subterráneas aparecen muchas veces interrelacionadas físicamente y normalmente deben ser consideradas de modo conjunto, pues ambas son expresión de una misma realidad: el ciclo del agua.

Los recursos superficiales actualmente son, los que se utilizan en mayor medida para satisfacer las demandas de agua. Su única fuente de abastecimiento son las precipitaciones atmosféricas, por lo que si la evaporación y la infiltración fueran superiores a aquellas, el agua de las lluvias o de las nieves no se mantendría en la superficie.

Los recursos subterráneos, se generan por las infiltraciones de las precipitaciones, de las escorrentías superficiales y de los embalses naturales o artificiales. Por debajo de la superficie terrestre existe una gran cantidad susceptible de ser utilizada para satisfacer las demandas (Balairón 2002).

1.1.2 Acuíferos

El agua subterránea es almacenada en los denominados acuíferos, formaciones geológicas capaces de almacenar y transmitir cantidades significativas de agua, los cuales pueden ser de muchos tipos: libre, semiconfinado y confinado (**Figura 2**).

La recarga y descarga de los acuíferos puede realizarse de modo natural a través de manantiales, de los contactos rio-acuífero o de descargas directamente al mar o de modo artificial, mediante la construcción y posterior explotación de pozos o galerías.

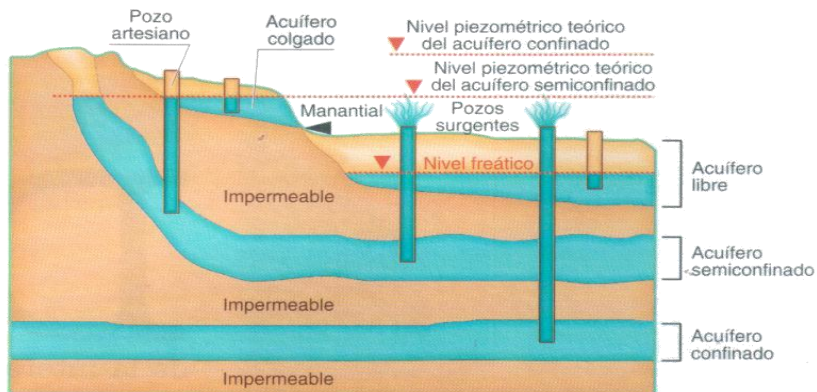


Figura 2. Tipos de acuíferos (libre, semiconfinado y confinado)

Acuífero libre

El acuífero libre, se caracteriza por la existencia de una superficie libre y real de agua encerrada, que está en contacto con el aire y a la presión atmosférica.

En este tipo de acuífero, la altura del agua h_{ip} en el interior del pozo siempre es menor que la altura h_p de la superficie freática en la pared exterior del mismo, aún considerando nulas las pérdidas de carga por la entrada del agua al pozo (**Figura 3**). Eso ocurre debido a la superficie de rezume que se origina cada vez que el agua drena libremente de una pared de un material saturado expuesta a la atmósfera.

La superficie freática dentro el material saturado intersecta entonces la pared a una cierta distancia por encima de la superficie libre del agua al otro lado de la pared, formando una superficie de rezume por la cual el agua escurre a lo largo de la superficie saturada hacia el nivel libre del agua.

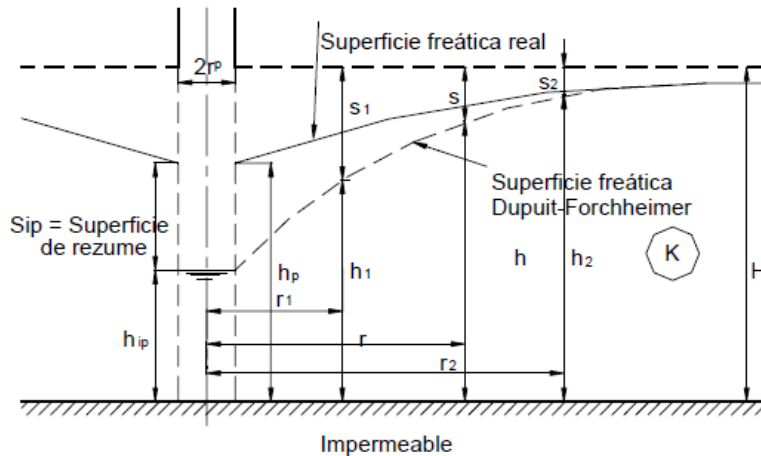


Figura 3. Pozo de bombeo en acuífero libre

El sistema acuífero de los valles centrales de la ciudad de Oaxaca es de tipo libre y normalmente el agua dulce se encuentra a profundidades de hasta 90m (Belmonte et al. 2005; Flores et al. 2001, 2008).

1.1.3 Usos del agua

Conocer los principales usos a los que se va a destinar el agua a corto, medio y largo plazo es la segunda parte, después del estudio de los recursos, de cualquier ejercicio de planificación hidrológica. Se trata por lo tanto de evaluar cuánta agua se necesita.

Los usos del agua, aunque siempre imprescindibles para el hombre, pueden ser, por otro lado, cambiantes en el espacio y en el tiempo según las exigencias. Los recursos hídricos naturales, por el contrario, a largo plazo y en valor medio, se mantienen constantes, mientras que los valores de las demandas de agua hay que, necesariamente, referirlos a una fecha determinada.

1.1.4 Implicaciones en la variación de los niveles piezométricos

Las actividades humanas en la superficie constituyen una amenaza tanto a la cantidad y calidad del agua subterránea.

a) Sobreexplotación.

La explotación del recurso mediante la instalación de captaciones, genera en las inmediaciones descensos del nivel piezométrico que pueden afectar captaciones privadas, sean estas para consumo humano, industrial o agropecuario, cuando se produce la interferencia entre las áreas de influencia de los pozos de abastecimiento y los particulares.

Si los descensos son importantes se modifican también las propiedades hidráulicas del medio:

- En un acuífero libre, se reduce el espesor saturado y por lo tanto de la transmisividad.

- Un acuífero confinado puede volverse libre, reemplazándose su coeficiente de almacenamiento por la porosidad eficaz.

b) Contaminación

La contaminación de acuíferos ocurre cuando la carga de contaminantes sobre el subsuelo generados por descargas o lixiviados de actividades urbanas, industriales, agrícolas o mineras no es controlada adecuadamente, y en ciertos componentes excede la capacidad natural de atenuación del subsuelo y estratos suprayacentes (Foster et al. 2002).

1.2 DISEÑO DE REDES DE MONITOREO

Los cambios tanto de la disponibilidad como la calidad son procesos que toman largos períodos. No obstante en lapsos más o menos extensos, alteraciones puntuales carentes de adecuado monitoreo, pueden alcanzar áreas significativas sin que se detecten impactos sobre el acuífero. Por ello, la definición de una adecuada red de monitoreo, ajustada a los usos potenciales y herramientas de control, es de gran importancia para la gestión de los recursos hídricos subterráneos también llamado *acuíferos*.

La información que a continuación se presenta, es obtenida del reporte de la Asociación Americana de Ingenieros Civiles (ASCE 2003), muestra las directrices principales sobre el monitoreo a largo plazo (MLP), así como los métodos de diseño óptimo de redes de monitoreo de agua subterránea. El enfoque que dicho reporte tiene, está dirigido hacia el monitoreo de la calidad del agua, sin embargo la información presentada es aplicable en redes diseñadas para la observación de niveles de agua en pozos.

1.3 MONITOREO A LARGO PLAZO (MLP)

El diseño de **monitoreo a largo plazo (MLP)** se define como el análisis del agua subterránea en un periodo de tiempo prolongado con la finalidad de documentar sus condiciones, incluyendo la recopilación de datos químicos, físicos y biológicos en los pozos; es decir, son sistemas de prevención contra la sobre explotación y contaminación del agua subterránea, basados en la obtención sistemática de datos

El MLP es la clave para la toma de decisiones ambientales presentes y futuras, a cerca de necesidades y actividades que rodean al recurso del agua subterránea, el propósito es conocer o estimar el valor de una variable en puntos y tiempos en donde no se ha medido, en base a datos existentes.

Entre los principales objetivos del MLP se encuentra la obtención de información para evaluar el desempeño de los sistemas de remediación de sitios contaminados, determinar la calidad del agua subterránea y evaluar el riesgo a la salud de la población.

1.4. DISEÑO ÓPTIMO DE REDES DE MONITOREO DE AGUA SUBTERRÁNEA

Uno de los pasos más importantes en la optimización es identificar los objetivos de una red de MLP. El funcionamiento y la administración de los sistemas de monitoreo a largo plazo (MLP) pueden ser costosos. Por definición, estos sistemas operan durante mucho tiempo y con altos costos. En estas condiciones, los pequeños ahorros de costos o la eficiencia pueden ser magnificados por las repeticiones de los eventos de muestreo. El diseño óptimo de redes de MLP intenta minimizar los costos del sistema, mientras que satisfacen los objetivos del programa.

Un diseño óptimo de MLP continuamente genera nueva información que se evalúa para determinar si las eficiencias aun se pueden ser realizar.

Algunas cuestiones que se consideran en el diseño óptimo de redes de MLP son las siguientes:

- ¿Dónde ubicar el punto de medición o muestreo?
- ¿Con que frecuencia se debe medir en un punto de muestreo?
- ¿Cómo optimizan los tipos de medición y frecuencias, la incorporación de objetivos tales como reducir los costos, minimizar el riesgo y el error?
- ¿Cómo establecer las técnicas de análisis y almacenamiento de datos y los procedimientos)?

El diseño de monitoreo óptimo del agua subterránea a largo plazo, puede realizarse utilizando una variedad de enfoques. La eficacia y ventajas de los enfoques y técnicas generales dependerán de varios factores, entre los cuales se pueden citar: (1) la escala del programa de monitoreo (local, intermedio o regional); (2) el objetivo del programa de monitoreo: (ambiental, detección o monitoreo para la limpieza y restauración); (3) el tipo de datos (estratigrafía superficial, niveles de agua u química del agua subterránea); (4) la naturaleza del proceso contaminante (por ejemplo el transporte y destino de los químicos en las zonas vadosa y saturada); (5) el estado estacionario vs la naturaleza transitoria de las propiedades cualitativas del agua subterránea, y; (6) las metas cambiantes de un programa de monitoreo a largo plazo.

Las consideraciones institucionales, legales y otras específicas del sitio podrían también tomar parte de los requerimientos del MLP.

1.5 MÉTODOS DE DISEÑO ÓPTIMO DE REDES DE MONITOREO DE AGUA SUBTERRÁNEA

Una red óptima de monitoreo, busca mediante diversos métodos, ajustar la distribución espacial de la red de monitoreo, la frecuencia del monitoreo y el número de variables a medir de tal manera que, partiendo de la información disponible, pueda obtenerse la red con el número menor posible de puntos de observación en las que se indican el mismo o un menor número de variables en intervalos de tiempo mayores y a un costo mínimo de operación (Molerio y Torres 2002).

El establecer los objetivos del programa de monitoreo, la calidad y cantidad de datos son las principales consideraciones que deben tomarse en cuenta para la selección del método adecuado para optimizar un diseño de MLP.

La **Tabla 1**, presenta una clasificación basada en los niveles de complejidad, cantidad de datos o información requerida.

Tabla 1. Métodos de optimización de monitoreo a largo plazo por niveles de complejidad

METODO	Cantidad de datos o información		
	Pocos	Intermedios	Muchos
1.5.1 Métodos basados en reglas			
1.5.1.1 Método hidrogeológico	X		
1.5.1.2 Métodos de tendencia basados en reglas	X	X	
1.5.2 Métodos estadísticos			
1.5.2.1 Comparaciones estadísticas	X	X	X
1.5.2.2 Detección de la tendencia	X	X	
1.5.2.3 Métodos geoestadísticos		X	X
1.5.2.4 Método híbrido hidrogeológico-geoestadístico.		X	X
1.5.3 Métodos probabilísticos			
1.5.3.1 Método del filtro de Kalman			X
1.5.3.2 Métodos de simulación probabilística		X	X
1.5.3.3 Método jerárquico		X	
1.5.4 Métodos de optimización matemática.		X	X

1.5.1 Métodos basados en reglas para identificar planes de monitoreo a largo plazo

1.5.1.1 Método hidrogeológico

Este método requiere de información hidrogeológica, cualitativa y cuantitativa, que es determinada en base a cálculos y juicio del hidrogeólogo, sin el uso de técnicas estadísticas y/o probabilísticas avanzadas. Es decir, los sitios y tiempos de monitoreo son determinados por las condiciones hidrogeológicas en las inmediaciones de las fuentes de contaminación (posibles o conocidas).

Es utilizado en programas de monitoreo a largo plazo del agua subterránea, sobre todo en la detección y cumplimiento de monitoreo de la calidad del agua subterránea y en aquellos encaminados a verificar que la calidad del agua cumpla con los reglamentos vigentes.

El método hidrogeológico es más apropiado para estudios de sitios específicos donde existe una fuente potencial de contaminación bien delimitada.

1.5.1.2 Métodos de tendencia basados en reglas

Métodos que combinan la experiencia y el juicio profesional del hidrogeólogo con métodos estadísticos en un árbol estructurado de decisiones (o lógicas), con el propósito de desarrollar programas de muestreo a largo plazo en pozos existentes. Siguen un conjunto de pasos de decisiones lógicas (árbol de decisión) que lleva a decisiones específicas como, donde y cuando monitorear el agua subterránea. Es una forma conveniente de organizar un conjunto secuencial de decisiones de problemas en los que intervienen: (1) incertidumbre; (2) un número de puntos de decisión y (3) escenarios alternos.

1.5.2 Métodos estadísticos

1.5.2.1 Comparaciones estadísticas

Este tipo de comparaciones son comunes en monitoreo de detección, cumplimiento y saneamiento (Davis 1994; Davis and Nichols, 1994 a, b), son utilizados para realizar inferencias relacionadas con:

(1) Comparaciones entre pozo base y pozo de cumplimiento. Los datos de pozos de detección, cumplimiento y de saneamiento deben, en diferentes situaciones, ser comparados con los datos de los pozos llamados de base. Un pozo de base es representativo de las características naturales de la calidad del agua subterránea, es decir, pozos que no tienen influencia de la actividad humana.

Este método se clasifica en: (1) procedimientos de análisis de varianza (ANOVA) y; (2) comparación de intervalos de tolerancia y predicción.

(2) Comparaciones con estándares fijos. Son usados para probar si las concentraciones del agua subterránea se encuentran por debajo o sobre de un límite máximo de concentración (LMC) o en un nivel alternativo de concentración (NAC). Los procedimientos para llevar a cabo estas comparaciones se pueden clasificar en:

i) *Intervalos Paramétricos.* se conforma primero calculando la media de la concentración (\bar{X}) y la desviación estándar S , a partir de los pozos no base (a partir de m puntos de datos).

$$\left\{ \bar{X} - \frac{S}{\sqrt{m}} t_{\alpha, m-1}; \bar{X} + \frac{S}{\sqrt{m}} t_{\alpha, m-1} \right\}$$

ii) *Intervalos no paramétricos.*

(3) Comparaciones de datos en un pozo fijo. En este caso, las concentraciones de los constituyentes son monitoreadas en el tiempo en un solo pozo que no está

contaminado. Los datos para un constituyente son graficados contra el tiempo y se inspeccionan las tendencias y los cambios en la concentración.

1.5.2.2 Detección de la tendencia

Se calculan las tendencias locales y globales en los niveles de los contaminantes dentro de una pluma contaminante, utilizando métodos tanto, paramétricos y no paramétricos.

Se examinan las tendencias temporales en tres niveles: (1) sobre todas las tendencias temporales para toda la zona de estudio; (2) tendencias temporales para regiones locales y (3) tendencias temporales individuales para sitios particulares. Las fluctuaciones temporales que pueden obstruir el análisis de las tendencias a largo plazo se incluyen también.

El protocolo incluye los siguientes cinco pasos:

1. Análisis gráfico de las concentraciones presentes en el agua subterránea para determinar la distribución de la probabilidad y la presencia de fluctuaciones estacionales
2. División de la zona contaminada en subregiones de interés.
3. Calculo de las tendencias globales.
4. Calculo de las tendencias dentro de las subregiones.
5. Calculo de las tendencias en sitios individuales de monitoreo.

1.5.2.3 Métodos geoestadísticos

La geoestadística se puede definir como un conjunto de técnicas para resolver problemas de estimación que involucran variables espaciales georeferenciadas. Existen varios métodos para elegir la ubicación de los pozos de monitoreo tales como: la interpolación geoestadística, métodos geoestadísticos basados en la varianza y los métodos geoestadísticos basados en la concentración, lo cuales a su vez se fundamentan en: i) la

varianza, ii) en la evaluación de semivariograma, iii) en la teoría de variables regionalizadas y iv) los de enfoque en la redundancia espacial y temporal.

1.5.2.4 Método híbrido hidrogeológico-geoestadístico

Se le llama híbrido por que combina la geoestadística, geoquímica, hidrogeología y el conocimiento de la normatividad para determinar si se debe seguir monitoreado un pozo que forma parte de una red de monitoreo de agua subterránea. El objetivo de este método es evaluar el potencial para reducir: (1) el número de pozos dentro de la red seleccionada, (2) el número análisis químicos por muestra de agua, y (3) la frecuencia de muestreo por pozo dentro de la red existente sin comprometer la capacidad de estimar con exactitud el alcance y la dirección de una pluma contaminante y la eficacia de la remediación que se esta realizando.

1.5.3. Métodos probabilísticos

Los métodos descritos en las secciones anteriores se basan exclusivamente en datos históricos y el juicio profesional para optimizar los planes de monitoreo. Debido a la incertidumbre con respecto a las condiciones futuras, estos métodos suelen utilizar métodos probabilísticos para identificar diseños con la mayor confianza en la predicción. La mayoría de estos métodos utilizan modelos de simulación numérica para predecir las condiciones futuras en los sitios.

1.5.3.1 Método del filtro de Kalman

Una clase de métodos probabilísticos utiliza el filtro de Kalman para identificar pozos de monitoreo o sitios de muestreo. También se pueden utilizar para identificar los lugares de muestreo y frecuencia en las redes de monitoreo existentes.

El filtro de Kalman puede calcular la varianza del error de estimación con base en la posición de los sitios de muestreo, sin necesidad de conocer el dato medido en campo. De esta manera este filtro se puede utilizar para determinar, dados n sitios de muestreo, como afecta la varianza del error de la estimación resultante el añadir un sitio o pozo de muestreo adicional.

Este método es similar al uso del krigeado en el espacio-tiempo, para predecir la incertidumbre de la estimación, pero aquí, en lugar de utilizar un variograma espacio-temporal obtenido a partir del análisis de los datos, el variograma es remplazado por una matriz de covarianza espacio-tiempo, calculado a partir de un modelo de transporte a través de la simulación estocástica. Una función de la predicción de la incertidumbre de estimación se utiliza como criterio para elegir la posición de muestreo y tiempos de muestreo para la red. Esta función depende de los objetivos del diseño.

1.5.3.2 Métodos de simulación probabilística

Otros métodos probabilísticos usan simulaciones numéricas para identificar la ubicación de los pozos de monitoreo en los que son más probable detectar las zonas contaminadas conforme se mueve el gradiente abajo con el tiempo. En la simulación condicional las propiedades no conocidas del acuífero, como la conductividad hidráulica, son generadas sistemáticamente.

1.5.3.3 Método jerárquico

Dentro de los métodos probabilísticos, esta es otra opción para el monitoreo de la calidad a largo plazo del agua subterránea. Por su estructura secuencial es una mezcla de análisis probabilístico y la optimización.

Por ejemplo, Scheibe and Lettenmaier (1989) consideraron tres niveles en el problema de decisión del monitoreo: (1) reconocimiento geográfico e

hidrogeológico del contaminante; (2) estimación de la probabilidad de la contaminación de pozos que son para el abastecimiento de agua potable y (3) selección de los sitios de muestreo. Su objetivo fue minimizar el riesgo de exposición agregada en centros de población con consumo de agua subterránea.

1.5.4 Métodos de optimización matemática

Los métodos de optimización matemática son algoritmos numéricos de búsqueda que pueden usarse para obtener automáticamente diseños de monitoreo óptimo que satisfagan los objetivos y las limitaciones del monitoreo especificadas por el usuario. Estos métodos son mas apropiados para usarse cuando el numero de diseños posibles hace que la búsqueda manual sea un trabajo complejo, como en los sitios con las características siguientes: (1) numerosos pozos de monitoreo existentes o potenciales; (2) numerosos constituyentes que necesitan ser considerados en el diseño del muestreo o (3) diferentes tipos de muestras con niveles variables de precisión y costo.

Para utilizar métodos de optimización, las partes interesadas deben identificar en el sitio los objetivos de monitoreo deseados. Estos objetivos se traducen en una función objetivo que cuantifica el valor (o costo) de los diversos planes candidatos de muestreo. Dentro de los métodos que tienen este enfoque están:

La **programación entera**: es el método más usado y puede ser aplicado para la optimización de problemas donde las variables de decisión tomen solo valores de números enteros.

El **recocido simulado**: requieren especificar cinco componentes, tres de ellos con frecuencia son aplicaciones independientes.

Algoritmo genético: las cadenas que se forman son la representación digital (binario o decimal) de las diferentes decisiones.

Capítulo 2. DESCRIPCION DEL ACUIFERO DE VALLES CENTRALES DE OAXACA

Para entender el comportamiento hidrodinámico de un acuífero, se requiere del conocimiento primordial de las propiedades hidrogeológicas del sistema, tales como: geometría, litología, porosidad, permeabilidad o conductividad hidráulica, transmisividad, coeficiente de almacenamiento, piezometría entre otras.

2.1 ESTUDIOS PREVIOS

Algunos estudios de caracterización de acuíferos, han demostrado que estos parámetros, son diferentes para cada tipo de acuífero; y debido a esta particularidad el comportamiento del flujo del agua subterránea será diferente en la zona no saturada y la zona saturada, además se pueden estimar zonas susceptibles a la explotación y sobreexplotación, así como zonas con alto riesgo a la contaminación.

A continuación se mencionan algunas investigaciones realizadas en el acuífero de Valles Centrales de Oaxaca.

Flores et al. (2001) realizaron una investigación enfocada a la caracterización geofísica del acuífero del valle de Etna, estimando la geometría de la cuenca, mediante modelos de 2.5 dimensiones, obtenidos a partir de datos de gravimetría. Estos estudios indican que el Valle de Etna es un graben de gran pendiente acotado por las fallas de Etna y Oaxaca. Por otra parte las mediciones electromagnéticas mostraron que la zona vadosa tiene un grosor de 20m hacia el centro del valle. La estimación del grosor sedimentario (730 m) y la posición de la falla de Etna, son algunos resultados obtenidos de esta investigación.

Belmonte et al. (2003) realizaron un estudio que permitió determinar la vulnerabilidad intrínseca del agua subterránea de la porción central del acuífero del valle de Etna, Oaxaca, México, mediante 30 sondeos eléctricos verticales de

corriente directa y 216 de inducción electromagnética (bobinas EM-34), estos estudios geofísicos y el método SINTACS permitieron obtener, en zonas desprovistas de pozos, parámetros geohidrológicos necesarios para la evaluación de la vulnerabilidad (espesor de la zona no saturada, y del acuífero, así como la conductividad hidráulica), además de determinar tanto la geometría como la litología del acuífero. Los resultados obtenidos indican que el acuífero del valle de Etna, es sensible a las cargas contaminantes potenciales, por lo que se considera como un acuífero altamente vulnerable a ser contaminado por fuentes superficiales.

Belmonte et al. (2005) mencionan que el acuífero del Valle de Zaachila es vulnerable a la contaminación superficial y que el parámetro más sensible es la profundidad del nivel freático, debido a que en algunas partes, estos niveles son someros, seguido en importancia por la topografía, tipo de suelo, impacto en la zona vadosa, litología del acuífero, recarga neta y conductividad hidráulica. La vulnerabilidad fue evaluada por algunos métodos, tales como: AVI, GOD y DRASTIC.

Flores et al. (2008), diseñaron un modelo geohidrológico evolutivo 3D a corto plazo para los años 2001, 2005 y 2015, de acuífero somero del valle de Etna, Oaxaca, basado en los parámetros disponibles de geología, geofísica, geoquímica e hidrogeología. Las simulaciones numéricas obtenidas indicaron, que si el actual régimen de extracción se mantenía, el abatimiento de la superficie potenciométrica podría ser mayor en la parte SE del área de estudio. Por otra parte la contaminación por fertilizantes y por las fugas de drenaje es favorecida por la dirección del flujo imperante en el acuífero (vaciándose en el río Atoyac). De acuerdo a las simulaciones numéricas, existe una posibilidad de remediación de este proceso, reubicando los pozos situados en la ciudad de Oaxaca en las zonas de recarga.

2.2 ZONA DE ESTUDIO

2.2.1 Localización

El estado de Oaxaca es atravesado por la Sierra Madre del Sur, que se extiende desde Michoacán hasta el Istmo de Tehuantepec y la Sierra Madre Oriental. Las dos cordilleras convergen hacia el extremo oriental del Estado formando varios valles intermontanos con acuíferos potenciales. La ciudad de Oaxaca se encuentra en la unión de tres valles: al norte con el valle de Etna, al sureste el valle de Tlacolula-Mitla y al sur el valle de Zaachila-Zimatlán (Flores et al. 2001, 2008).

Los valles centrales de Oaxaca se localizan en la porción central del Estado de Oaxaca, al sur de México (**Figura 4**), a los 17°03'43" de latitud norte y a los 96°43'18" de longitud occidental, el sistema acuífero de dicho valle, está dividido administrativamente en tres valles: Etna, Zaachila y Tlacolula. La zona de estudio comprende un área aproximada de 4,200 km² (Belmonte et al. 2005).

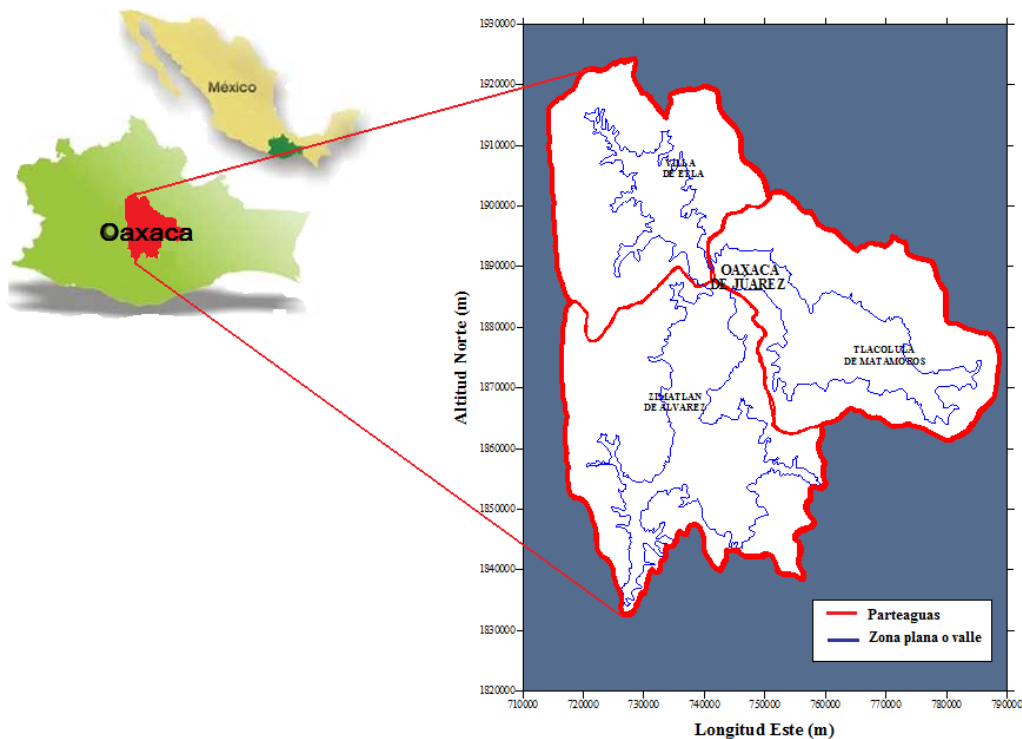


Figura 4. Mapa de ubicación del área de estudio

2.2.2 Población

El acuífero de valles centrales de Oaxaca abarca los municipios de Etlá, Zaachila, Zimatlán, Ocotlán, Tlacolula y el centro de la ciudad. La población total de estos municipios que depende del suministro del agua subterránea de este acuífero se presenta en la **Tabla 2**. La actividad económica predominante es la prestación de servicios particularmente el turismo seguida de la agricultura y la industrial en muy baja proporción y concentrada en la zona conurbada de la ciudad de Oaxaca.

Tabla 2. Población total por municipio CENSO 2005 (INEGI)

Municipio	Población (habitantes)
Etlá	12,564
Zimatlán	18,370
Centro	265,006
Zaachila	28,003
Tlacolula	16,510
Ocotlán	19,581
Población Total	360,034

Las actividades agropecuarias se reducen al cultivo en pequeña de la alfalfa, hortalizas y frijol de temporal. La industria de la región se reduce a pequeñas fábricas caseras de mezcal, losa, cobijas y textiles usando métodos rudimentarios.

2.2.3 Clima

El principal que prevalece en la parte del valle, es semicálido, con un régimen de lluvias de verano; hacia la periferia el clima es semicálido y subhúmedo y en las sierras circundantes es templado subhúmedo.

Precipitación media anual	757.6 mm
Temperatura media anual	19.7°C
Evaporación potencial	2100 mm/año

2.2.4 Fisiografía

El acuífero de valles centrales, se ubica en la región hidrológica 20 Costa Chica de Guerrero, en la Subregión 20B. Costa Chica–Rio Verde, Cuenca del Rio Atoyac y sus límites laterales coinciden con el parte aguas de la subcuenca rio Atoyac-Oaxaca de Juárez, siendo su principal corriente superficial el rio Atoyac.

2.3 Hidrogeología

2.3.1 Geología

Los valles centrales de Oaxaca se caracterizan por haber sufrido movimientos intensos originando plegamientos que a su vez formaron valles intermontanos, además de las transformaciones por la erosión, en bloques montañosos y algunos lomeríos redondeados y sierras altas escarpadas que alcanzan elevaciones de 2,600 a 3100 msnm (CNA 2003).

La principal característica tectónica es la falla de Oaxaca, se caracteriza por una media N 10° W de orientación. Esta falla constituye el límite oriental del valle de Zaachila (Belmonte et al. 2005).

El área de estudio (**Figura 5**) constituye un valle alargado con una morfología graben es de por lo menos 730 m de profundidad en la ciudad de ETLA, y está delimitado por las fallas de Oaxaca y ETLA, con una orientación NW-SE, y limitado al SW por rocas metamórficas del complejo de Oaxaca (edad Grenvilliano) y al NE por rocas sedimentarias plegados del mesozoico de la Sierra de Juárez (Flores et al. 2001, 2008; Belmonte et al. 2003).

Al sur de la ciudad de Oaxaca, la falla es discontinua. La falla de Donají intercepta a la falla de Oaxaca cerca de San Felipe del Agua, al este de la ciudad de Oaxaca. Otras estructuras situadas en la zona son el anticlinal de Coyotepec y el sinclinal de Monte Alban (Belmonte et al. 2005).

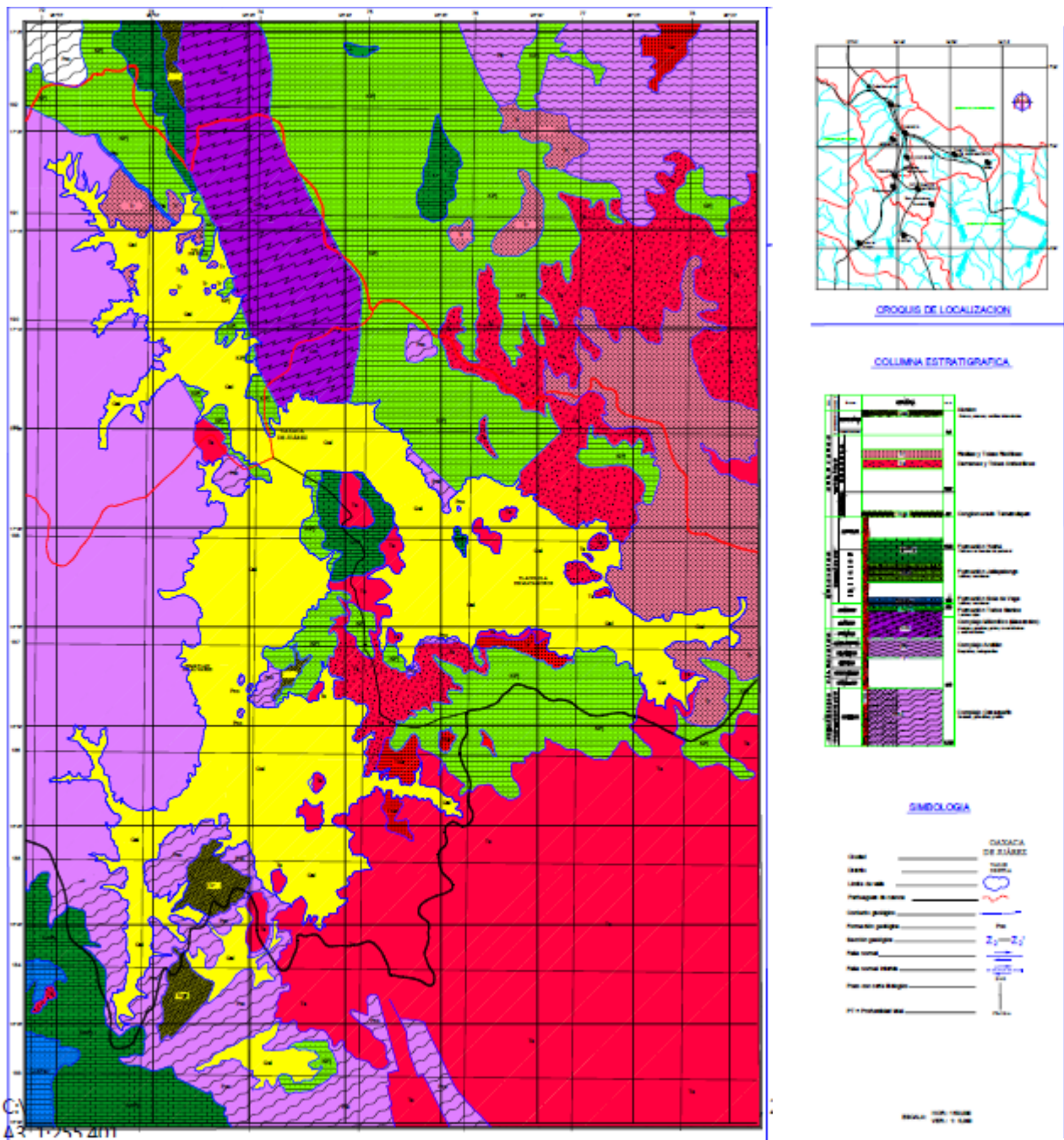


Figura 5. Mapa geológico de la zona de estudio (Tomado de CNA, 2001)

El valle Etna (**Figura 6**), se encuentra en la provincia geológica de la Sierra Madre del Sur (SMS), que contiene diferentes terrenos de basamento con contrastes estratigráficos y rasgos tectónicos (Flores et al. 2001, 2008; Belmonte et al.

2003). El relleno sedimentario se puede representar por seis capas de diferentes propiedades físicas, inferida a partir de la litología.

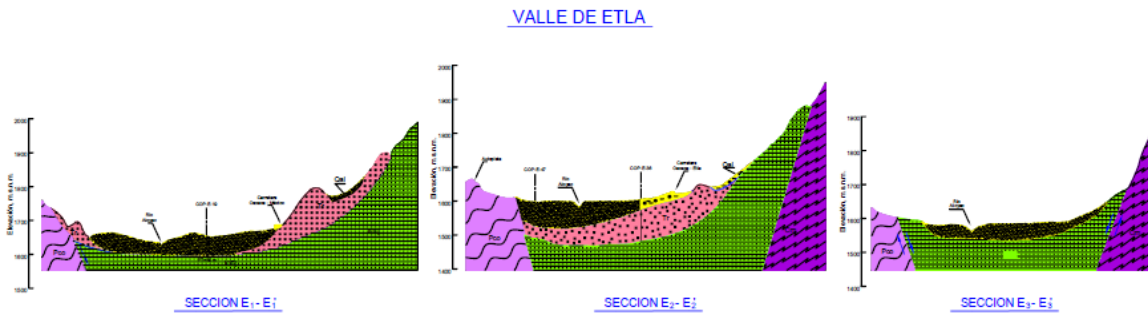


Figura 6. Sección geológica transversal valle de ETLA (CNA, 2001)

El valle de Zaachila (**Figura 7**), se encuentra en el terreno tecnoestratigráfico Zapoteco. El basamento está constituido por rocas metasedimentarias del complejo Oaxaqueño, tales como facies de gneis granulíticas y mármoles. Rocas sedimentarias y metamórficas (areniscas, lutitas y calizas) afloran al este. El relleno de la cuenca sedimentaria está constituido por conglomerados que incluyen fragmentos de gneis, esquistos, calizas y rocas volcánicas no consolidadas (Belmonte et al. 2005).

Por otra parte el valle de Tlacolula (**Figura 7**) está sobre suelo del cuaternario y roca ígnea extrusiva (toba acida, tobas andesíticas, derrames) del Terciario, en llanura aluvial (gravas, arenas y arcillas) con lomerío y la llanura aluvial con lomerío de piso cementado (lutita-arenisca y caliza), (INEGI 2005).

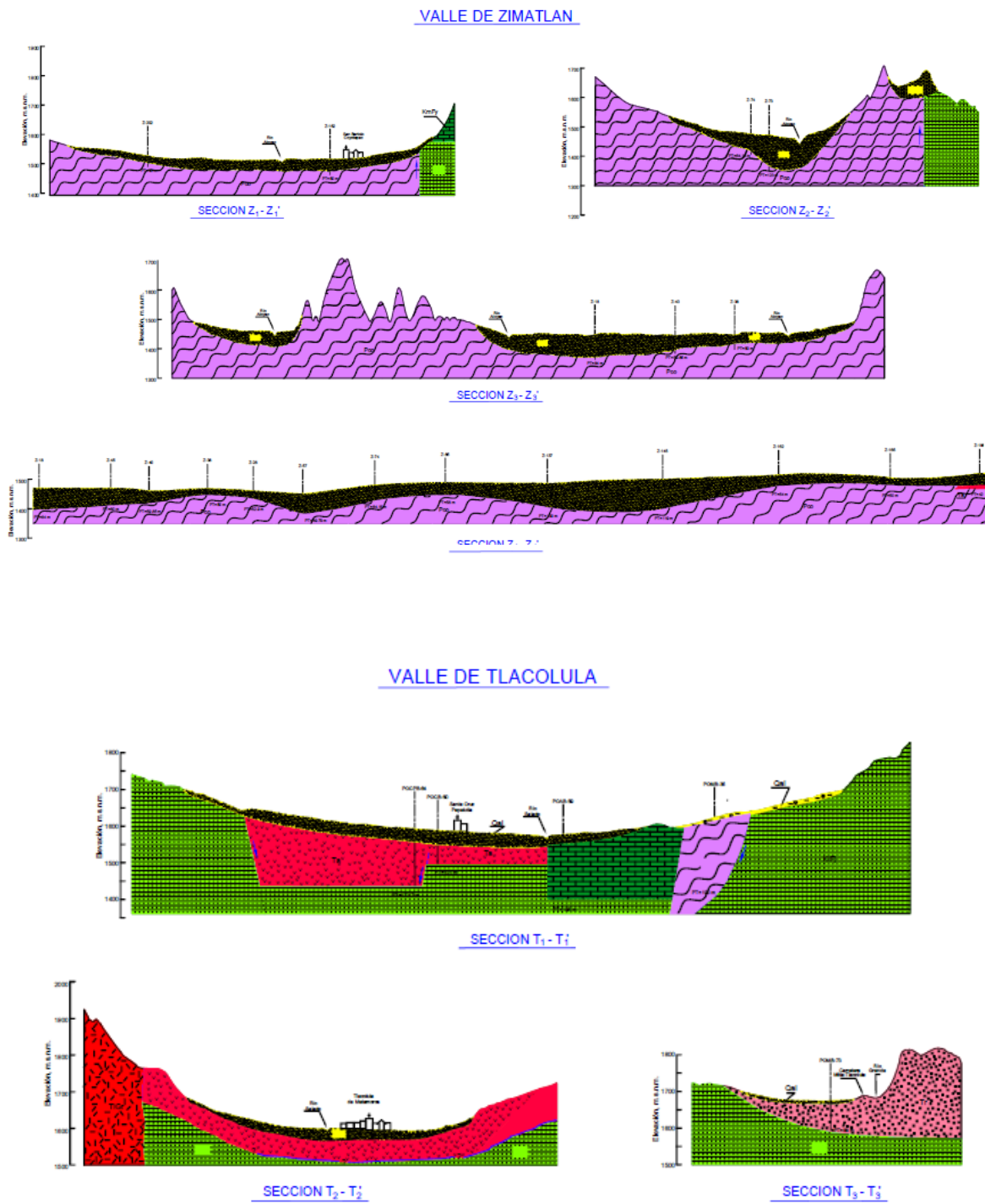


Figura 7. Sección geológica transversal Valle de Zaachila- Zimatlán y valle de Tlacolula (CNA, 2001)

2.3.2 Hidrología superficial

El río Atoyac es la principal corriente superficial, nace cerca de San Sebastián Sedas, en la zona de Etla a elevaciones del orden de los 2,000 m. En su primer tramo toma una dirección general hacia el sureste hasta la ciudad de Oaxaca donde ingresa al valle de Zaachila desde el norte y a la altura de San Agustín de las Juntas recibe por la margen izquierda las aguas del río Salado (**Figura 8**) que es uno de sus principales afluentes, proveniente del valle de Tlacolula. De allí sigue hacia el sur- suroeste pasando por Zimatlán de Álvarez y continua su recorrido por la costa Oaxaqueña hasta desembocar en el océano Pacífico (CNA 2003; Belmonte et al. 2005).

2.3.3 Hidrología subterránea

Los flujos de agua subterránea tienen una dirección media de N-S (**Figura 8**), pero en la parte suroeste el flujo tiene una dirección de NE-SW, los rangos de transmisividad están entre 22.1 y 220.85 m²/día, por otra parte los gradientes hidráulicos en este valle varían en un rango de 1.5×10^{-3} a 15.3×10^{-3} .

Las montañas que rodean a los valles centrales de Oaxaca constituyen las principales zonas de recarga del sistema acuífero. (Flores et al. 2008).

2.3.4 Tipo de acuífero

De manera general en los valles centrales de Oaxaca se identifica la presencia de un acuífero de tipo libre, donde. El acuífero (**Figura 9**), en explotación actual está constituido por la unidad hidrogeológica del material aluvial, que funciona como acuífero libre, constituido por arenas sedimentos no consolidados tales como gravas, arenas, arcillas y limos formando una mezcla heterogénea, manifestándose en mayor proporción hacia la porción central de los valles, en donde varía de 10 a 100 m, adelgazándose hacia los bordes. El espesor saturado varía de unos 10 m a 120 m aproximadamente (CNA 2003; Belmonte et al. 2005).

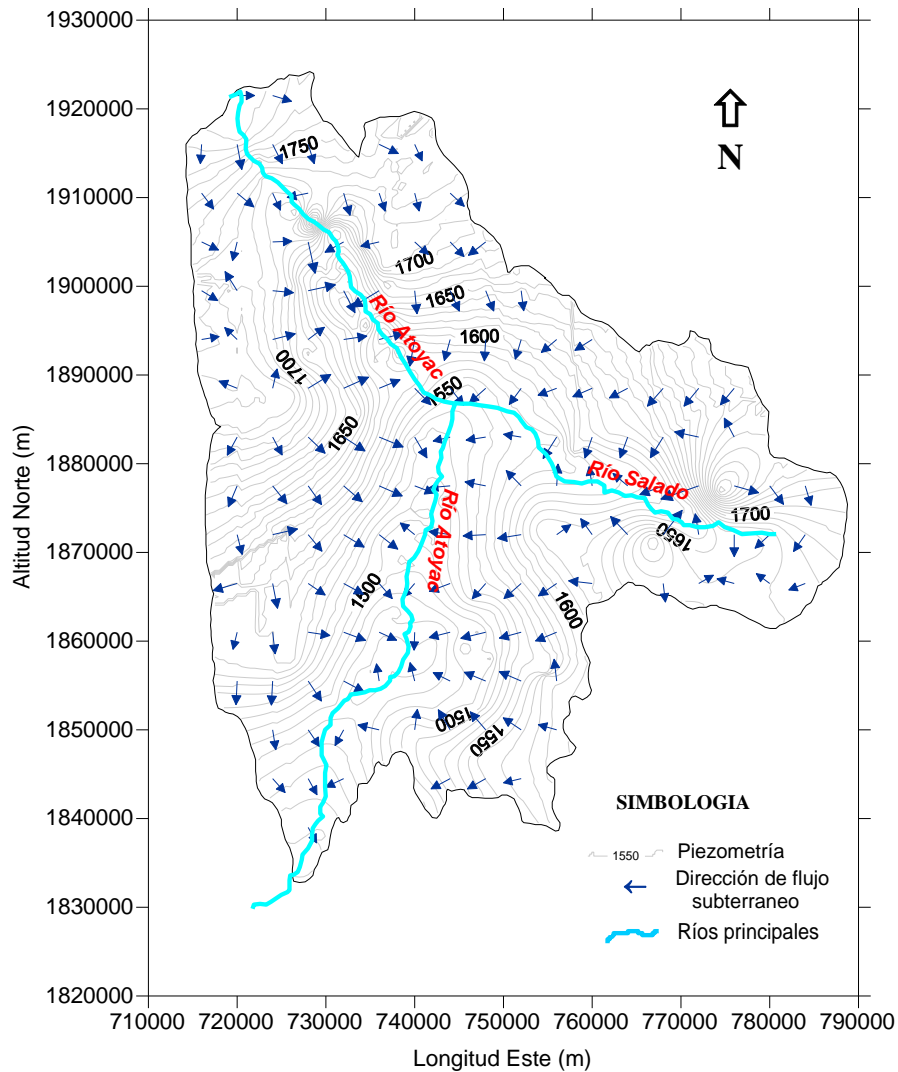


Figura 8. Mapa de flujo subterráneo, valles centrales de Oaxaca

Sin embargo, en la zona del valle de ETLA se ha identificado la presencia de dos acuíferos: uno superficial de 20 a 60 m de espesor y otro profundo por debajo de los 60 m., el acuífero superior tiene arenas y sedimentos de grava que contienen agua de buena calidad, mientras que el segundo acuífero está compuesto probablemente de sedimentos lacustres del cenozoico, tobas epiclásticas y depósitos fluviales con un espesor de unos cientos de metros. Entre ambos

acuíferos existe un cuerpo de arcilla, con un espesor medio de 36 m que constituye un acuitardo (Belmonte et al. 2005; Flores et al. 2008).

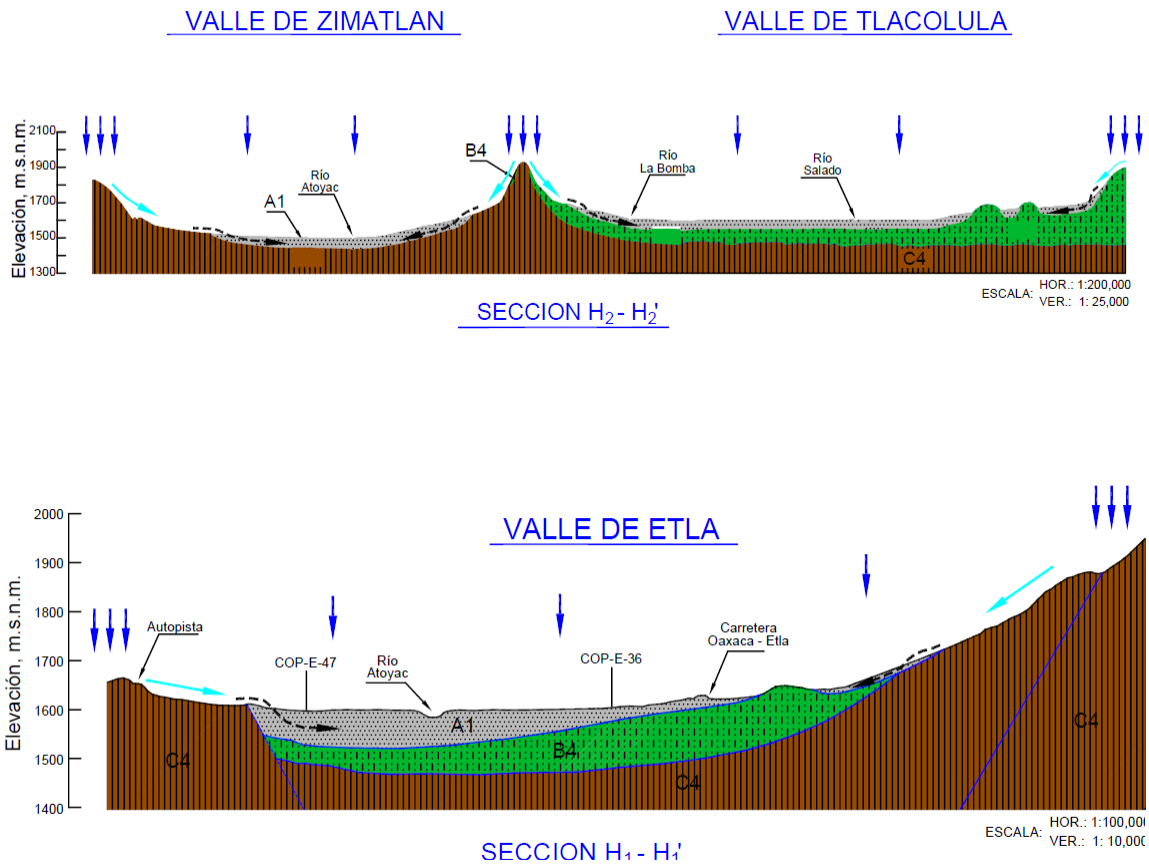


Figura 9. Secciones hidrogeológicas transversales de valle de ETLA, Zaachila y Tlacolula (CNA, 2001b)

2.3.5 Piezometría

La profundidad del nivel estático en general es de 1.5 a 9.5 m, siendo más profundas hacia las márgenes de las sierras y las más someras hacia el centro del

valle (CNA 2003). El seguimiento de monitoreo que reporta la comisión nacional del agua en Oaxaca señala que existen registros de niveles del agua subterránea a partir del año 2001 al 2009. Sin embargo, esta información no ha tenido un seguimiento adecuado, reportándose años con pocas mediciones, dando como resultado de un conocimiento vago del comportamiento en la evolución de los niveles de agua en los pozos del acuífero de Oaxaca.

En la **Figura 10**, se presentan el número de pozos censados en un periodo de 9 años, teniendo como sustento 332 pozos que serán la base para el desarrollo del presente trabajo.

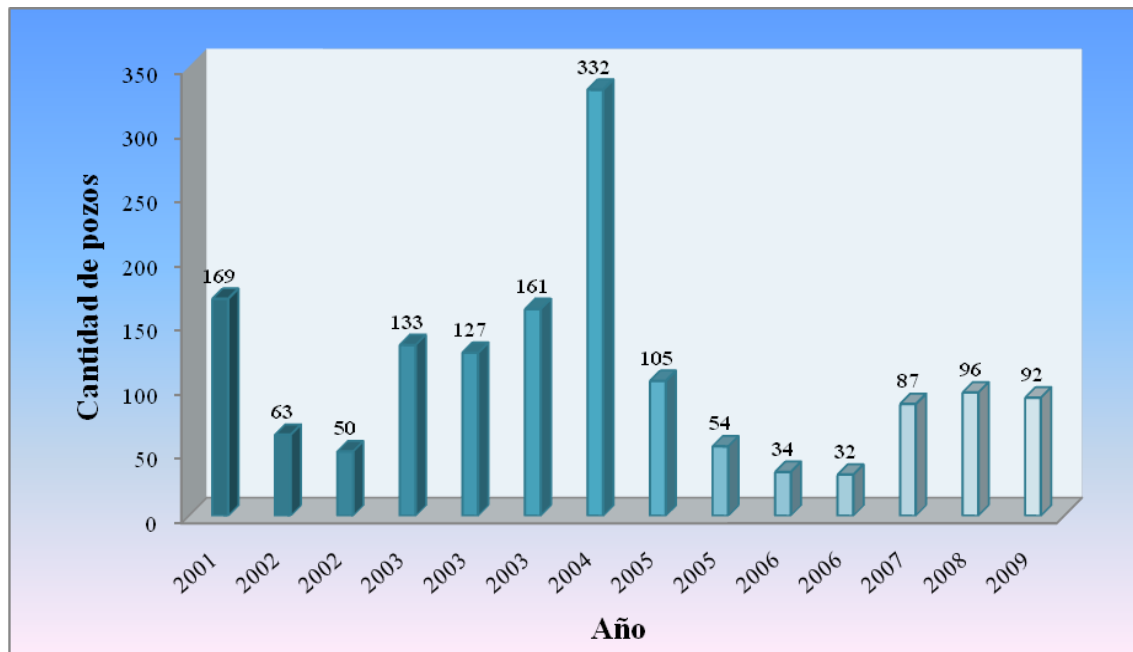


Figura 10. Numero de mediciones de los niveles piezométricos en el periodo 2001-2009

Capítulo 3. METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO ÓPTIMO DE LA RED DE MONITOREO PIEZOMÉTRICA

Para el desarrollo del presente estudio la metodología se dividió en tres etapas fundamentales que facilitarán el entendimiento y análisis del fenómeno a estudiar.

La primera consistió en obtener información en campo y las siguientes dos etapas en el procesamiento de la información recabada para el diseño óptimo de la red de monitoreo piezométrica.

3.1. MEDICIÓN DE NIVELES PIEZOMÉTRICOS

La altura piezométrica es la variable de interés para el desarrollo del presente trabajo por lo tanto en esta primer etapa se realizaron mediciones de los niveles de agua en pozos del sistema acuífero de valles centrales de Oaxaca. La georeferenciación de los pozos se determino mediante GPS manual (**Figura 11**), que refiere las coordenadas (x, y, z).



Figura 11. GPS 12 XL Marca Garmin

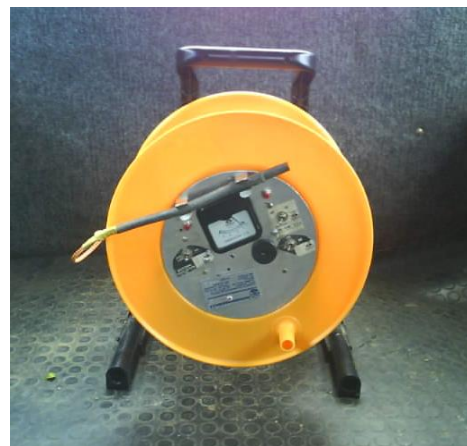


Figura 12 . Sonda Eléctrica

La profundidad del nivel del agua subterránea en cada uno de los pozos fue medida, una sonda eléctrica (**Figura 12**) que consta de un cable eléctrico de acero cobrizo y un amperímetro. Las lecturas se realizan con ayuda de una cinta métrica.

El procedimiento de medir los niveles del agua, consiste en introducir lentamente el cable eléctrico en la tubería de PVC (instaladas para este propósito) que se localizan generalmente cerca del brocal del pozo (**Figura 13**), hasta que la punta del cable toque el nivel del agua, esto permite cerrar el circuito mandando una señal al amperímetro.



Figura 13. Medición del nivel de agua subterránea

En caso de que el pozo conste de brocal se procederá a medir la altura del mismo con una cinta métrica (**Figura 14**).



Figura 14. Flexómetro modelo 33-681.

El valor de la altura piezométrica (Z) se calcula de la siguiente forma (**Figura 15**):

$$Z(x_i, y_i) = NT - N.F - B$$

Donde (x_i, y_i) son las coordenadas del pozo, NT = altura topográfica con respecto al nivel medio del mar (*n.m.m.*), $N.F$ = nivel freático y B = altura del brocal (si existe).

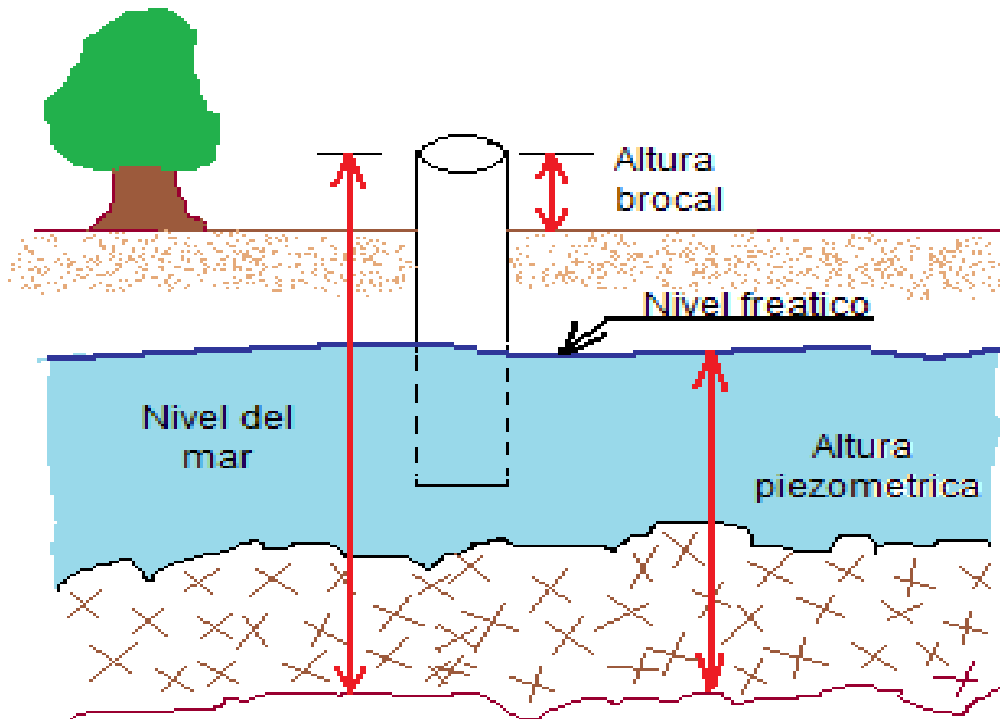


Figura 15. Ubicación del nivel del agua subterránea

3.2. ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO PARA LA PIEZOMETRÍA DE VALLES CENTRALES DE OAXACA

El análisis geoestadístico es la etapa fundamental para conocer el tipo de muestra con la que se estará trabajando, se realiza a partir de la información disponible y confiable, lo conforman dos etapas básicas: 1) análisis estructural de los datos y 2) Ajuste y modelación del semivariograma. El procesamiento de los datos en esta etapa, se efectuara apoyándose en las herramientas de los software: *RGeoestad*, y *Surfer v.8*

Para el desarrollo del presente trabajo se analizan mediciones del nivel piezométrico de los valles centrales de Oaxaca, obtenidas de censos realizados por la Comisión Nacional del Agua (CNA), en el periodo 2001 y 2009 (**Figura 10**).

La muestra analizada consta de 332 mediciones de nivel piezométrico correspondientes al año 2004 (**Anexo B**). Esta información, conforma la base de datos que se utilizará para el análisis geoestadístico.

3.2.1 Análisis estructural

Una de las características principales de esta etapa consiste en estimar y modelar una función que refleje la correlación espacial de la variable regionalizada a partir de la adopción razonada de la hipótesis más adecuada acerca de su variabilidad.

3.2.1.1 Análisis exploratorio

Aquí se examinaron los datos previamente con métodos sencillos para organizar y preparar los datos. Para un mejor entendimiento, de este análisis se efectuó en tres etapas: i) análisis estadístico básico y prueba de normalidad, ii) análisis de outliers espaciales y distribucionales.

i) Análisis estadísticos básicos y prueba de normalidad

En esta etapa se realiza un examen gráfico (histograma y diagrama caja con bigotes) de la variable nivel piezométrico y análisis descriptivo numérico que permitió cuantificar algunos aspectos gráficos de los datos (media, mediana, desviación estándar, varianza, coeficiente de variación, curtosis, máximo, mínimo, cuartiles, asimetría, etc).

Además se evalúa mediante métodos gráficos (histograma y diagramas cuantiles (Q-Q plot)), de algunos supuestos como: la normalidad, linealidad y homocedasticidad. A partir de la prueba de simetría se acepto o rechazo la hipótesis de normalidad, en otras palabras se espera que la distribución sea simétrica con la media. En algunos casos la falta de normalidad de una variable se pudo arreglar mediante una transformación de la misma. En la **tabla 3**, se muestran las transformaciones más utilizadas.

Tabla 3. Transformaciones para conseguir la normalidad

Forma de la Distribución	Transformación aconsejada
Asimetría positiva	$\text{Log}(X+C)$
Asimetría negativa	$\text{Log}(C-X)$
Leptocurtosis	$1/X$
Platicurtosis	X^2

ii) Análisis de outliers espaciales y distribucionales

Mediante una perspectiva univariante se examina la distribución de la variable, nivel piezométrico, para identificar los posibles casos atípicos (outliers) tanto distribucionales como espaciales, y se evalúa el impacto potencial que pueda ejercer en, análisis estadísticos posteriores, mediante histogramas, diagramas de caja con bigotes y diagramas de dispersión.

- a. Los valores *atípicos distribucionales* serán aquellos que se alejen significativamente del valor medio de la muestra.
- b. Los valores *atípicos espaciales* fueron aquellos que tienen valores diferentes a los de sus vecinos más cercanos.

3.2.2 Ajuste del semivariograma

En esta etapa se estima y modela una función que refleje la correlación espacial de la variable regionalizada (nivel piezométrico), es decir, a partir de la dependencia de las características de estacionaridad del fenómeno se modela la función de covarianzas o la de semivarianzas. Este proceso consiste en: 1) análisis de estacionaridad, 2) análisis de anisotropía, 3) modelado del semivariograma y 4) Validación.

3.2.2.1 Análisis de estacionaridad

Para la detección de estacionaridad, se realiza pruebas de tendencia adireccional y direccional. Además se estima el variograma adireccional ($0^\circ, \pm 90^\circ$), es decir, se obtiene el variograma de la muestra. Como indicador de posible presencia de tendencia se observa el crecimiento del variograma, es decir, si este presenta un crecimiento más rápido que una función cuadrática, es señal de posible tendencia.

En caso de mostrar tendencia, se procede a removerla mediante la regresión por mínimos cuadrados, considerando la tendencia como un polinomio de un grado dado, de manera que primero se supondrá que la misma es de 1er grado, luego de 2º grado. El proceso concluye cuando los residuos obtenidos se pueden considerar como estacionarios.

Regression Coefficients: $Z(X,Y) = A_{00} + A_{01} Y + A_{10} X$

Regression Coefficients: $Z(X,Y) = A_{00} + A_{01} Y + A_{02} Y^2 + A_{10} X + A_{11} XY + A_{20} X^2$

3.2.2.2 Análisis de anisotropía

Por otra parte para detectar posible anisotropía de la variable, se estiman los variogramas en cuatro direcciones (0° , 45° , 90° y 135°) con ventanas de $\pm 25^\circ$, también se observan las diferencias existentes entre los alcances de los variogramas para determinar la posible existencia de anisotropía geométrica.

3.2.2.3 Modelado del semivariograma

Posteriormente tras guardar el semivariograma experimental, se procede a la elección del semivariograma teórico o combinación de ellos que representen lo más fielmente posible la dependencia espacial que muestra el fenómeno. En una primera aproximación se han seleccionado los tres modelos más importantes que son: exponencial, esférico y gaussiano. Los parámetros que definen al semivariograma son: alcance o rango, meseta (*sill+nugget*), efecto nugget (*Nugget*), tamaño de lag (*Lag*) y números de lag.

La elección del mejor modelo se basa en un ajuste por mínimos cuadrados ponderados (MCP), este procedimiento se realiza para cada uno de los modelos autorizados y se selecciona el que tenga un mejor ajuste, según el criterio de información de Akaike, el cual es un compromiso entre la complejidad del modelo (numero de parámetros), y su bondad de ajuste (valor medio cuadrático del error).

La modelación continúa con un proceso de prueba y error de manera visual, modificando los parámetros del modelo hasta obtener un compromiso razonable según el criterio de Akaike.

3.2.2.4 Validación

Para validar el modelo, se realiza la validación cruzada, que utiliza un método sencillo y eficiente denominado *leave one out*, este procedimiento consiste en

sacar un punto de la muestra y estimar con Kriging el valor en ese punto usando el modelo de variograma obtenido. Como resultado se obtienen mapas de las diferencias entre el valor real y el estimado, en otras palabras se obtienen los estadígrafos del error. El criterio que se sigue es:

- 1) El valor medio de las diferencias debe ser cercano a cero
- 2) La varianza normalizada de las diferencias debe ser próxima a la unidad.

3.3. DISEÑO ÓPTIMO DE LA RED DE MONITOREO

En base a la información obtenida del análisis geoestadístico se procede a realizar el diseño óptimo de la red de monitoreo piezométrica, se utilizaron los parámetros del semivariograma teórico ajustado, para iniciar el proceso de diseño óptimo de la red de monitoreo piezométrica del sistema acuífero de valles centrales de Oaxaca.

El diseño de la red de monitoreo involucro una serie de pasos, estos fueron: 1) la definición de los objetivos de la red de monitoreo, 2) cálculo de la matriz de covarianza inicial, 3) definición de los puntos de estimación y muestreo, 4) análisis del número total de pozos a incluir en la red de monitoreo.

3.3.1 Objetivo de la red de monitoreo

El objetivo es estimar la elevación de agua subterránea en un área definida del acuífero con un grado de incertidumbre bajo, minimizando el numero de pozos necesarios. El criterio matemático que se utilizo para medir la incertidumbre fue la varianza del error de la estimación.

3.3.2 Cálculo de la matriz de covarianza

La matriz de covarianza inicial se obtuvo a partir de los parámetros del semivariograma ajustado, la formula que se utiliza para hacer dicho cálculo es:

$$C(h) = C(0) - \gamma(h)$$

Donde $C(0)$ es la varianza del parámetro analizado, siendo igual a la meseta del semivariograma, y $\gamma(h)$ es el modelo de semivariograma obtenido del análisis geoestadístico para la elevación del nivel de agua en los pozos.

3.3.3 Definición de los puntos de estimación y muestreo

Como primer paso para la definición de los puntos de estimación y muestreo se analizaron las mediciones de nivel piezométrico de un registro histórico de 9 años (2001 – 2009). Eligiéndose las mediciones del 2004 como los puntos de muestreo (**Figura 17**) por ser el registro con mayor información (332 puntos) además de ser accesibles para el monitoreo.

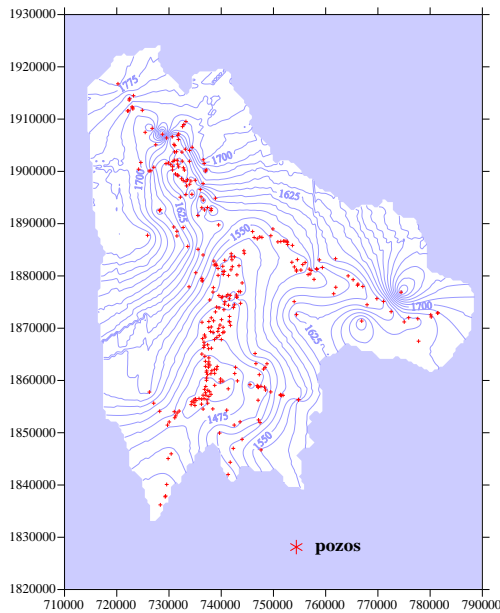


Figura 16. Limite del área para el diseño de la malla

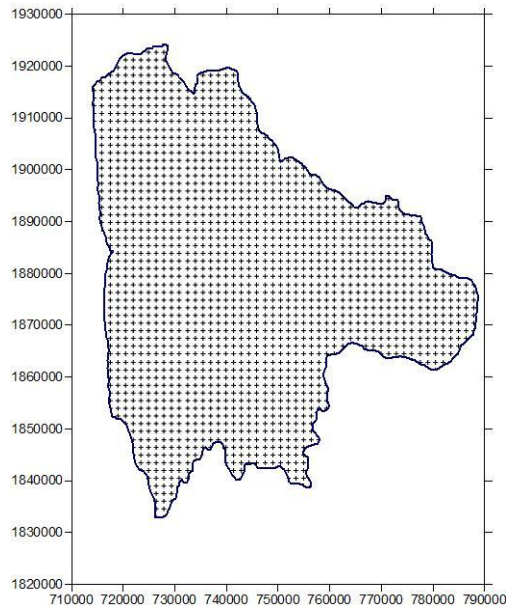


Figura 17. Nodos de la malla de estimación

Los puntos de estimación en los que se pretendió estimar la elevación del nivel del agua a partir de los datos muestreados, fueron 15110 nodos (**Figura 18**) de la malla de 500 x 500 m.

3.3.4 Análisis del número total de pozos a incluir en la red de monitoreo

Para determinar el número de puntos que se incluirán en la red de monitoreo preliminar se analizó la reducción de la varianza total del error de la estimación del parámetro. Esta reducción en porcentajes de 85, 90 y 95% aporta el número de pozos que proporcionan la información de las estimaciones, si el número de pozos que proporcionan la información de las estimaciones, si el número de pozos es elevado la varianza total se reduce significativamente, sin embargo si se continúa añadiendo pozos a la red de monitoreo la información obtenida por cada pozo va disminuyendo.

Capítulo 4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Análisis geoestadístico

Los resultados obtenidos son a partir del *Análisis Geoestadístico* de la base de datos con 332 registros del año 2004 y que permitió realizar el Diseño de la Red Óptima de Monitoreo Piezométrica para el sistema acuífero de Valles Centrales de Oaxaca, con el objetivo de estimar la elevación del agua en un área definida del acuífero con un grado de incertidumbre bajo, así mismo obtener los pozos que serán destinados a la obtención información confiable, y sin redundancia.

Un primer análisis geoestadístico (**Anexo C**), reportó asimetría en la distribución de los datos. Por otra parte se detectaron 3 valores atípicos distribucionales, además de observarse la existencia de dos concentraciones principales de datos y la presencia de “tendencia”, es decir que los niveles piezométricos no constituyen un variable estacionaria, esto puede observarse con un crecimiento más rápido que una función cuadrática.

En un segundo análisis (**Anexo D**) se decidió remover la “tendencia” considerándola como un polinomio de segundo grado, es decir, fue necesario emplear la regresión por mínimos cuadrados. Los residuos obtenidos de la regresión mostraron también asimetría en la distribución y 54 valores atípicos que fueron removidos para obtener un ajuste de los datos a una distribución normal con un coeficiente de simetría= 0.0165 (muy cercano a cero).

A partir del análisis geoestadístico de los residuos de segundo orden se obtuvo un ajuste del modelo experimental (semivariograma) con el modelo teórico del tipo exponencial (**Figura 19**). Los parámetros que caracterizan al modelo son los que se presentan en la siguiente **Tabla 4**.

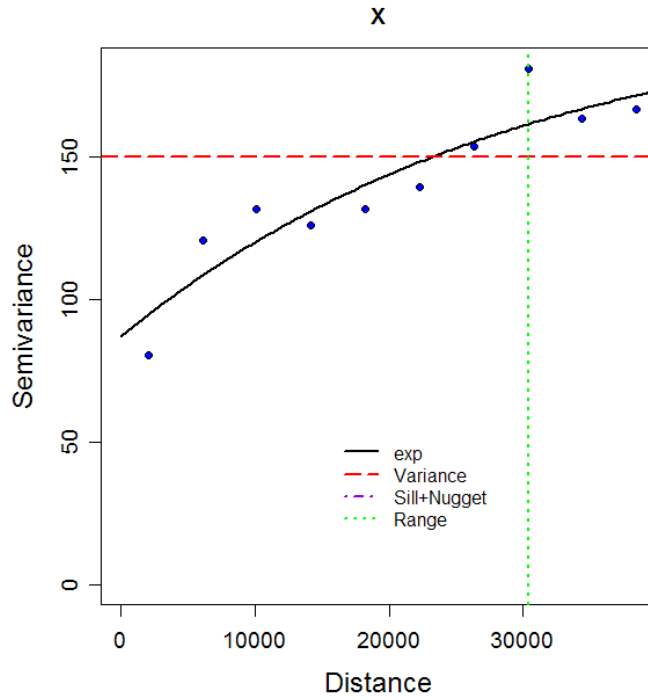


Figura 18. Ajuste del semivariograma

Tabla 4. Parámetros del modelo ajustado.

Modelo	Exponencial
Alcance	29104.18
Meseta	201.61
Tamaño de lag	4048.188
Numero de lag	10

Los estadígrafos de los errores se muestran en la siguiente **Tabla 5**.

Tabla 5. Estadígrafos de errores del modelo ajustado

Modelo	Exponencial
Media	0.0636
Mediana	-1.0620
Varianza	93.9863
Desviación estándar	9.6947
Coefficiente de simetría	0.5935

La elección del modelo que proporciona el mejor ajuste al semivariograma se hizo en base al criterio de validación cruzada, método que evalúa los errores de estimación, donde se espera que la media de los errores sea próxima a cero.

Cabe remarcar que del análisis geoestadístico el único dato que se necesitó en el diseño de la red de monitoreo es el semivariograma, por lo tanto fue necesario un “buen” cálculo y ajuste del semivariograma, al menos conceptualmente.

Diseño óptimo de la red de

Es importante establecer que a diferencia del análisis geoestadístico donde se excluyeron 54 puntos (outliers) en el diseño de la red se considera el total de los registros (332 pozos).

La malla de estimación que se eligió para el diseño de la red fue de 500 x 500 metros definida por 15110 nodos como puntos de estimación y 332 pozos como puntos de muestreo. El cálculo de la matriz de covarianza se hizo mediante el programa *gencovmat* que pertenece al conjunto de programas que componen GWQMonitor-Geoestad.

El criterio matemático que se utilizó para medir la incertidumbre fue la varianza del error de la estimación. Este criterio de elección del número de pozos a incluir en la red de monitoreo óptima está basado en elegir el número de pozos que proporcione la mayor reducción en los errores y por tanto proporcione la información representativa de la zona definida para el análisis. Es decir se examina uno a uno los pozos que se pueden incluir en la red de monitoreo y se escoge el que reduce al máximo la suma de la varianza del error de la estimación en todos los puntos de estimación (varianza total), esto es, cada nuevo pozo que se añade a la red es aquel que resulta en una varianza total menor al aplicar el filtro de Kalman.

De esta manera para el sistema acuífero de valles centrales de Oaxaca la red de monitoreo optima está constituida por 112 pozos que fueron el numero de pozos que redujo la varianza total en un 95% (**Figura 19**), además de ser suficientes pozos para obtener la misma mismo nivel de información que los 332 pozos iniciales. La importancia de monitoreo de los pozos pertenecientes a la red se muestran en la **Tabla 6**.

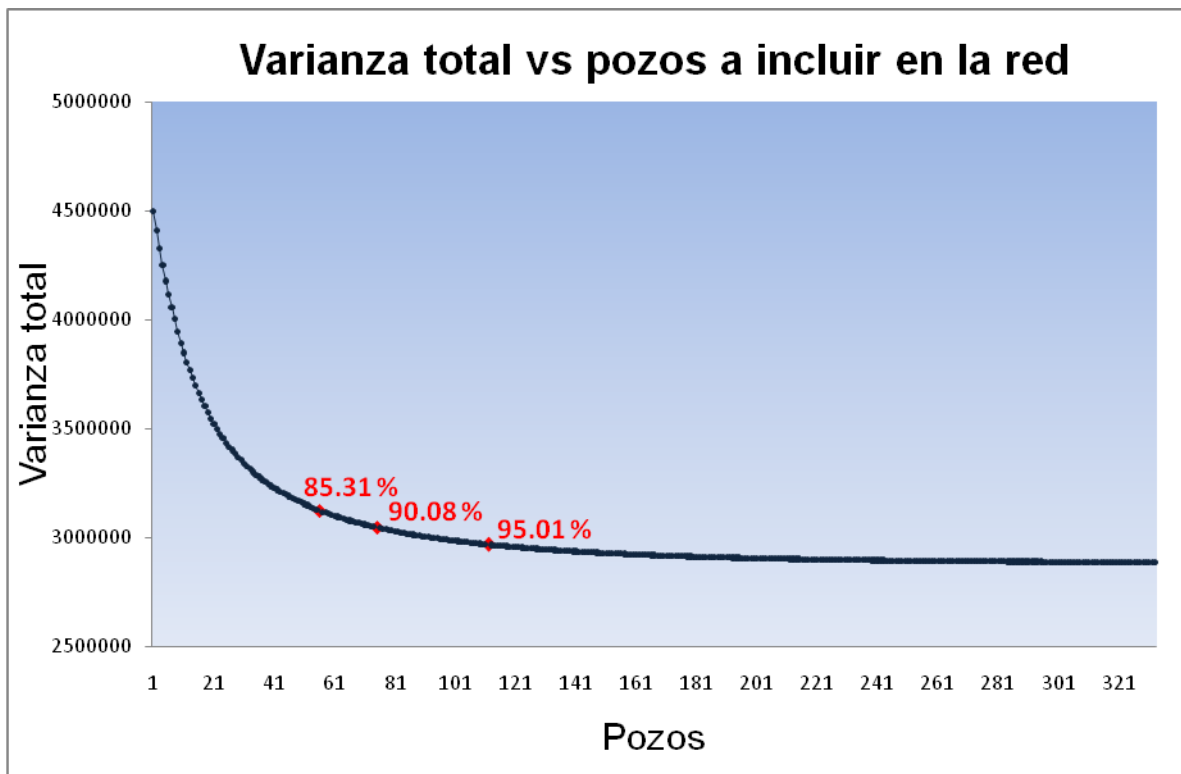


Figura 19. Reducción de la varianza total y su influencia con el número de pozos

Tabla 6. Diseño optimo de red de monitoreo piezométrica propuesta para el área de estudio

X	Y	Num_mont	Nombre	X	Y	Num_mont	Nombre
741729.12	1876287.48	1	Z-157	744007.09	1878660.33	47	Z-159
731651.91	1899318.92	2	E-41	736981.259	1862693.68	48	Z-55
765258.87	1879282.44	3	T-52	769804.86	1875649.79	49	T-11
735051.26	1856491.34	4	Z-16	727070.89	1855647.72	50	Z-195
749899.78	1888995.55	5	T-40	752590.91	1886629.3	51	T-34
751368.74	1857278.74	6	Z-98	753974.09	1875082.54	52	T-27
725894.99	1887767.24	7	E-74	741724.81	1844349.27	53	Z-67
724885.843	1911682.15	8	E-10	734438.77	1904599.58	54	E-38
777642.03	1871815.16	9	T-3	732172.74	1895062.77	55	E-62
726245.28	1857778.94	10	Z-8	735124.65	1880612.54	56	Z-167
754418.73	1872596.85	11	T-26	724613.72	1901707.19	57	E-28
743992.54	1848735.66	12	Z-70	723200.86	1914483.42	58	E-4
733832.07	1877925.82	13	Z-151	737139.62	1900285.34	59	E-55
733244.85	1909533.83	14	E-15	745510.22	1859190.29	60	Z-109
729833.91	1845063.17	15	Z-6	731516.34	1887644.64	61	E-73
738887.41	1894862.45	16	E-82	775044.3	1871196.5	62	T-7
736719.47	1866746.7	17	Z-61	729558.37	1840100.5	63	Z-4
724175.61	1900407.89	18	E-29	738394	1854554.6	64	Z-90
758789.02	1883076.4	19	T-57	729542.1	1906392.45	65	E-20
766898.97	1871368.06	20	T-48	743703.41	1874754.35	66	Z-177
746486.12	1865155.28	21	Z-111	731939.85	1854141.58	67	Z-15
720225.436	1916753.65	22	E-1	757769.87	1879342.39	68	T-15
774436.78	1876878.88	23	T-21	767110.62	1877983.5	69	T-49
741917.96	1884248.22	24	Z-194	781418.14	1872880.6	70	T-1
781506.13	1872943.3	25	T-2	735524.31	1891564.3	71	E-69
747628.87	1846714.29	26	Z-69	737805.72	1875399.91	72	Z-149
736555.78	1902215.97	27	E-50	742743.79	1862510.2	73	Z-123
733579.9	1885638.22	28	E-75	744417.16	1884323.55	74	Z-188
754799.64	1856286.5	29	Z-104	730422.86	1845964.32	75	Z-5
729714.33	1851460.63	30	Z-7	754793.13	1856335.62	76	Z-105
777787.83	1867510.8	31	T-6	732834.58	1908972.58	77	E-13
741342.44	1858407.28	32	Z-107	738587.88	1882841.36	78	Z-172
753527.42	1882611.88	33	T-31	736294.34	1865053.73	79	Z-63
729344.84	1837899.71	34	Z-2	726531.69	1900126.14	80	E-25
728179.66	1892496.88	35	E-61	728343.09	1836197.85	81	Z-1
736326.6	1871133.43	36	Z-87	772531.31	1873162.97	82	T-9
761893.39	1883299.74	37	T-12	753636.01	1885842.41	83	T-32
725440.25	1907472.49	38	E-12	747055.79	1856213.06	84	Z-106
746001.09	1888487.69	39	T-42	741327.38	1842013.87	85	Z-66
739687.67	1849932.03	40	Z-71	737180.03	1860029.87	86	Z-39
761533.59	1876590.43	41	T-53	736519.27	1897664.36	87	E-57
741762.87	1870543.48	42	Z-132	740026.51	1867823.59	88	Z-124
748762.92	1863198.53	43	Z-113	728216.27	1854098.03	89	Z-9
739508.17	1889764.85	44	E-80	743613.24	1852086.27	90	Z-93
722050.921	1911565.14	45	E-9	754406.09	1880931.1	91	T-29
747147.15	1852447	46	Z-95	729923.35	1901627.36	92	E-30

X	Y	Num_mont	Nombre
764302.52	1880008.46	93	T-56
728355.04	1892683.31	94	E-60
747789.31	1887371.09	95	T-43
767925.04	1874487.61	96	T-47
736415.17	1868000.96	97	Z-59
735559.31	1885088.58	98	Z-174
740398.59	1880282.12	99	Z-182
748403.69	1862517.73	100	Z-115
780213.75	1872156.98	101	T-4
738082.52	1892854.33	102	E-81
747431.65	1851936.76	103	Z-94
726782.38	1908225.25	104	E-11
730905.68	1889359.84	105	E-72
741057.29	1854317.23	106	Z-96
722374.076	1913638.05	107	E-2
742314.14	1847000.54	108	Z-68
736533.7	1854527.58	109	Z-89
741580.43	1872245	110	Z-131
749484.16	1857809.95	111	Z-101
743403.3	1881962.2	112	Z-185

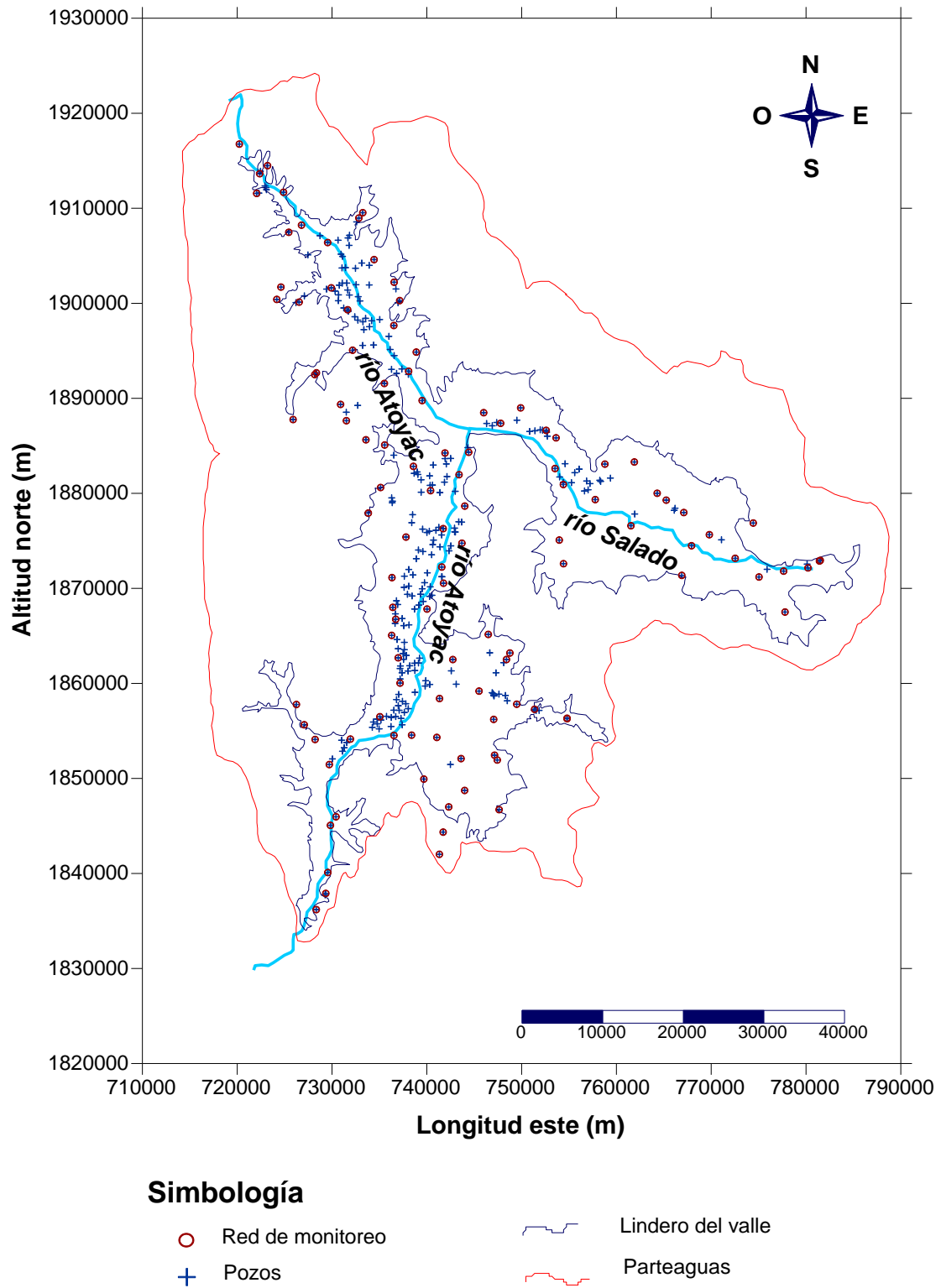


Figura 20. Mapa de ubicación de pozos pertenecientes a la red de monitoreo piezométrica de valles centrales de Oaxaca.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La heterogeneidad espacial puede ser tratada de forma alternativa considerando que los parámetros hidrogeológicos son funciones aleatorias o procesos estocásticos que se pueden caracterizar mediante unos pocos parámetros estadísticos.

A partir del análisis geoestadístico de los residuos de segundo orden de la base de datos con 332 registros del año 2004 se obtuvo un ajuste del semivariograma experimental con el modelo teórico del tipo exponencial.

Algo que es de vital importancia es el ajuste del semivariograma ya que constituye el punto crucial en un estudio geoestadístico debido a que todos los cálculos posteriores se harán utilizando exclusivamente el modelo teórico. Por lo tanto el modelo teórico debe respetar al variograma experimental, sobre todo en los primeros puntos, que son los más confiables.

El diseño de la red óptima se realizó mediante la combinación de métodos hidrogeológicos, geoestadísticos, probabilísticos de optimización. Iniciando con los parámetros del modelo teórico ajustado, para generar la matriz de covarianzas.

La determinación de los puntos de estimación se definió sobre nodos de una malla regular de 500x500 metros con la finalidad de que cubrieran la región donde existieran datos de niveles de agua (puntos de muestreo o pozos existentes).

La red de monitoreo óptima de elevación del nivel freático del acuífero somero de valles centrales de Oaxaca está constituida por 122 pozos.

RECOMENDACIONES

El objetivo de tener pozos que conformen una red es realizar mediciones de niveles piezométricos, sin embargo se puede aprovechar para medir muchas variables por ejemplo: columnas litológicas, calidad de agua, transmisividad,..., etc.

REFERENCIAS

- Ahmed, S. (2007) "Application of geostatistics in hydrosciences". Groundwater. Springer. 358 pags.
- Alfaro, S.M.A. (2007) "Estimación de recursos mineros". Consultado el 29 de septiembre del 2010. Centro de Géosciences – Equipe Géostatistique de l'Ecole des Mines de Paris. [http://cg.ensmp.fr/bibliotheque/public/ALFARO_Cours_00606.pdf].
- ASCE_American Society of Civil Engineers (2003). Long-Term Groundwater Monitoring: The State of the Art , Task Committee on the State of the Art in Long-Term Groundwater Monitoring Desing, U.S.A. 103 pags.
- Aragón S., M., Belmonte J.S.I., y Bautista B.A. (2002). "Evaluación de la capacidad de atenuación de contaminantes del acuífero del Valle de Zaachila, Oax". *Memorias del Congreso Nacional "Una gestión Ambiental por el bien del planeta"* (págs. 1-7). Guanajuato, Guanajuato: XIII Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental.
- Balairón, P. L. (2002) Gestión de recursos hídricos,. Ediciones UPC. 488 pags
- Belmonte, J.S.I., Campos, E.J.O. y Herrera, B.J. (2003). "Determinación de la vulnerabilidad del acuífero del Valle de Etlá, Oaxaca, México". *Revista Geofísica*. Vol-59, pp. 19-32
- Belmonte, J.S.I., Campos E., J.O. y Alatorre, Z.M.A., (2005). "Vulnerability to contamination of the Zaachila aquifer, Oaxaca, Mexico". *Geofísica Internacional*, Vol- 44, pp. 283-300.
- Buller R. D., Gradet A., y Reed V. S. (1984)."Ground water monitoring system design in a complex geologic setting". In proceedings of the fourth national symposium on aquifer restoration and ground water monitoring, national water well association, Worthington, OH, 186-194.
- Buttafuoco G., Castrignanò A. Busoni E., y Dimase A.C. (2005). "Studying the spatial structure evolution of soil water content using multivariate geostatistics". *Journal of Hydrology*. Vol-311 pp. 202-218.
- Comisión Nacional del Agua [CNA] (2001). "Estudio de actualización geohidrológica del acuífero de Valles Centrales, Estado de Oaxaca, SECCIONES GEOLOGICAS". Subdirección General Técnica. Gerencia de Aguas Subterráneas. Subgerencia de Evaluación y Modelación Hidrogeológica.
- Comisión Nacional del Agua [CNA] (2003). "Determinación de la disponibilidad de agua subterránea en el acuífero Valles Centrales, Estado de Oaxaca". Consultado el 22

- de agosto del 2008. Subdirección General Técnica. Gerencia de Aguas Subterráneas. Subgerencia de Evaluación y Modelación Hidrogeológica. [http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/DR_2025.pdf].
- Davis C. B. (1994). "Environmental regulatory statistics. In Handbook of Statistics, Patil G. P. y Rao C. R., eds., Elsevier Science, New York. Vol-12 (26), p.p 817-865
- Davis C. B., y McNichols R. J. (1994 a). Ground water monitoring statistics update: part I: Progress since 1988. Ground water (fall), pp 148-158.
- Davis C. B., y McNichols R. J. (1994 b). Ground water monitoring statistics update: part II: Nonparametric prediction limits. Ground Water (fall), p.p148-158.
- Díaz, V.M.A.(2002). Geoestadística. Instituto de Geofísica, UNAM. Instituto de Geofísica y Astronomía, CITMA, Cuba.
- Fairley J.P y Nicholson K.N. (2006). "Imaging lateral groundwater flow in the shallow subsurface using stochastic temperature fields". Journal of Hydrology. Vol-321, pp.276-285
- Flores, M.E.L., Chávez, R.E., Martínez, S.R.G., Herrera, B.J, Tejero, A.A., y Belmonte, S. (2001) "Geophysical characterization of the Etna Valley aquifer, Oaxaca, México". *Geofísica Internacional*. Vol-40, Num 4. pp. 245-257.
- Flores, M.E.L., Martínez, S.R.G., Chávez, R.E., Crusillo, Y., Jiménez, G. y Campos, E.O. (2008). "Numerical modeling of Etna Valley aquifer, Oax., Mexico: Evolution and remediation scenarios". *Geofísica Internacional*. Vol-47(1),pp 27-40.
- Foster, S., Hirata R., Gomes D., D'Elia M., y Paris M. (2002). Protección de la calidad del agua subterránea. Guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales. Groundwater Management Advisory Team (GW.MATE). 2ª edición. Mundi-Prensa Libros, S.A. 115 pags.
- Herrera Z. G. (2005). "Space time optimization of groundwater quality sampling networks" *Journal Water Resources*. Vol 41. pp 15
- Hudak P. F. y Loáciga H. A. (1993). "An optimization method for monitoring network design in multilayered ground-water flow systems." *Water Resources Research*, Vol-29 (8), p.p. 2835-2845.
- Hudak P.F., Loáciga H. A. y Marino M. A. (1995). "Regional-scale ground-water quality monitoring via interger programming." *Journal of Hydrology*. Vol-164. p.p 153-170.
- Igúzquiza P. E., (1998). "Optimal selection of number and location of rainfall gauges for areal rainfall estimation using geostatistics and simulated annealing". *Journal of Hydrology*. Vol 210. pp 206-220.

- Johnson V.M., Ridley M.N. Tuckfield, y Anderson R.A.(1996). "Reducing the sampling frequency of groundwater monitoring wells. Environmental Science and Technology. Vol-30, p.p. 355-358.
- Kitanidis, P.K. (1997) Introduction to geostatistics, Applications in Hydrogeology. Cambridge University. 249 pags.
- Lin Y, P. y Rouhani. (2001). "Multiple-point variance analysis for optimal adjustment of a monitoring network". Environmental Monitoring and Assessment. Vol-69 pp. 239–266.
- Matheron G. (1969). "Cursos de geoestadística". Los cuadernos del centro de morfología matemática de Fontainebleau. Centro de Géosciences – Equipe Géostatistique de l'Ecole des Mines de Paris. [http://cg.ensmp.fr/bibliotheque/public/MATHERON_Ouvrage_00537.pdf]
- Mogheir Y., Singh, V. P., de Lima J.L.M.P. (2006). "Spatial assessment and redesign of a groundwater quality monitoring network using entropy theory, Gaza Strip, Palestine" *Hydrogeology Journal*. Vol 14 pp. 700-712.
- Molerio L. y Torres J. (2002). "Métodos geomatemáticos de diseño y optimización de redes de monitoreo de aguas subterráneas." *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*. Vol-23 (2). pp. 38-45
- Montero, L.J.M y Larraz, I.B.(2008) Introducción a la geoestadística lineal. Serie Metodología y análisis de datos en ciencias sociales. Netbiblo. 144 pags.
- Nunes L.M., Cunha M.C. y Ribeiro L. (2004). "Optimal space-time coverage and exploration costs in groundwater monitoring networks". *Environmental Monitoring and Assessment* . Vol-93 pp,103–124.
- Samper, C. F.J., y Carrera, R.J. (1996) Geoestadística: Aplicaciones a la hidrogeología. 2ª edición. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería. 484 pags.
- Scheibe TD and Lettenmaier DP (1989) Risk-based selection of monitoring Wells for assessing agricultural chemical contamination of groundwater. Ground Water Monitoring Review. Vol-9(4) pp.98-105.
- Sophocleous M., (1983). "Groundwater observation network design for the Kansas groundwater management districts, U.S.A." *Journal of Hydrology*. Vol-61 pp. 371-389.
- Ridley M. y MacQueen D. (1995). "Cost-effective sampling of groundwater monitoring Wells," HAZMACON 1995. San Jose California

Wingle, W.L. (1997). Evaluating subsurface uncertainty using modified geostatistic techniques. PhD Dissertation #T-4595. Department of Geology and Geological Engineering. Colorado School of Mines. 202 pags.

Anexo A.

GEOESTADISTICA Y TEORIA DE LAS VARIABLES REGIONALIZADAS

La mayoría de la teoría geoestadística se estableció mucho antes de la disponibilidad de computadoras digitales. El término geoestadística fue acuñado por Matheron en 1962, y la definió como “La aplicación del formalismo de las funciones aleatorias al reconocimiento y estimación de fenómenos naturales” (Samper y Carrera, 1996).

La palabra estadística (en singular) se refiere a una metodología para la organización, análisis y presentación de datos (Kitanidis, 1997).

Asimismo, la geoestadística se considera como una rama de la estadística aplicada que se especializa en el análisis y la modelación de la variabilidad espacial en ciencias de la tierra. Su objeto de estudio es el análisis y la predicción de fenómenos en espacio y/o tiempo (Díaz, 2002).

Sus orígenes están en la minería y a partir de aquí sus aplicaciones se han extendido en diversas ramas de las ciencias aplicadas y en las ingenierías, por mencionar algunas tenemos: petróleo, pesca, geofísica, marina, hidrogeología, medio ambiente, estudios forestales, salud pública, ingeniería civil, procesamiento de imágenes, cartografía, finanzas, ciencias materiales, geología, geotecnia, edafología, meteorología, etc.

El papel de la Geoestadística en la hidrogeología, es proporcionar herramientas deterministas y estadísticas, para analizar y modelar la variabilidad espacial de los parámetros y/o variables hidrogeológicas. Es decir, utiliza un conjunto de técnicas para analizar y predecir valores de una propiedad distribuida en el espacio o tiempo.

En particular, la geoestadística fundada en la teoría de variables regionalizadas ha encontrado aplicaciones en casi todos los dominios de la hidrogeología subterránea y se remontan a los años sesenta (Samper y Carrera, 1996), se basa

en la estimación de parámetros de un modelo predictivo para la gestión del agua subterránea, por ejemplo, el diseño de una red de monitoreo de aguas subterráneas, la estimación de parámetros en lugares no determinados, la elaboración de modelos de aguas subterráneas (discretización óptima), imparcial calibración del modelo con errores de estimación y la hora de decidir el mejor modelo para la predicción (Ahmed, 2007).

Diferentes autores dentro de los que destacan: Samper y Carrera, 1996; Díaz, 2002, comparten la idea de que, un análisis geoestadístico en general, lo constituyen tres etapas: (a) el análisis exploratorio de los datos, (b) el análisis estructural y (c) las predicciones (Kriging o simulaciones).

TEORÍA DE LAS VARIABLES REGIONALIZADAS

En la teoría de las variables regionalizadas se propone dos objetivos principales:

- ❖ En el plano teórico, expresar las características estructurales de una variable regionalizada mediante una forma matemática adecuada.
- ❖ En el plano práctico, resolver, de manera satisfactoria, el problema de la estimación de una variable regionalizada a partir de un conjunto de muestras, asignando errores a las estimaciones.

Estos dos objetivos están relacionados: para un mismo conjunto de muestras, el error de estimación depende de las características estructurales (continuidad, anisotropías) y se tendrá un error mayor si la variable regionalizada es más irregular y discontinua en su variación espacial.

Una variable regionalizada es una función que representa la variación en el espacio de una cierta magnitud asociada a un fenómeno natural.

De manera general, se dice que un fenómeno es un regionalizado cuando se desplaza en el espacio, manifestando una cierta estructura (Matheron, 1969 y Alfaro, 2007).

ANALISIS EXPLORATORIO DE DATOS (AED)

Una forma de tener en cuenta la aleatoriedad de las variaciones de los parámetros hidrogeológicos y la incertidumbre asociada con la insuficiente información acerca de su distribución espacial consiste en adoptar una interpretación probabilística.

De esta manera cada parámetro se interpreta como una variable aleatoria que puede adoptar un conjunto infinito de valores de acuerdo con una distribución de probabilidad.

El análisis exploratorio de datos (AED), es un conjunto de técnicas estadísticas cuya finalidad es la de caracterizar a la muestra, de forma tal que se obtenga la mayor información posible a partir de datos disponibles, además de las relaciones existentes entre variables analizadas.

RESUMEN ESTADISTICO

Por lo general, estamos interesados en algunos números que resumen convenientemente las características más importantes de la distribución de los datos experimentales. Estos se conocen como el resumen estadístico.

Los parámetros estadísticos que proporcionan información relevante sobre la muestra se conocen como estadígrafos y son: media, mediana, coeficiente de variación, varianza, desviación estándar, curtosis, coeficiente de simetría, máximo, mínimo y cuartiles.

Los estadígrafos más usados son: la media y la mediana, cada una de estas medidas puede ser diferentes si la distribución tiene un alto grado de asimetría, sin

embargo si la distribución es unimodal y casi simétrica estas medidas muestran resultados similares.

GRÁFICOS PARA REPRESENTAR LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL

El histograma es una forma común para representar la distribución de los datos experimentales (**Figura 28.a**). Considera un conjunto de n mediciones que se ordenan en forma creciente. Por otra parte, el diagrama de caja (**Figura 28.b**) es una forma visualmente eficaz para resumir gráficamente la distribución de los datos. Los cuartiles superior e inferior de los datos definen la parte superior de un rectángulo (la caja).

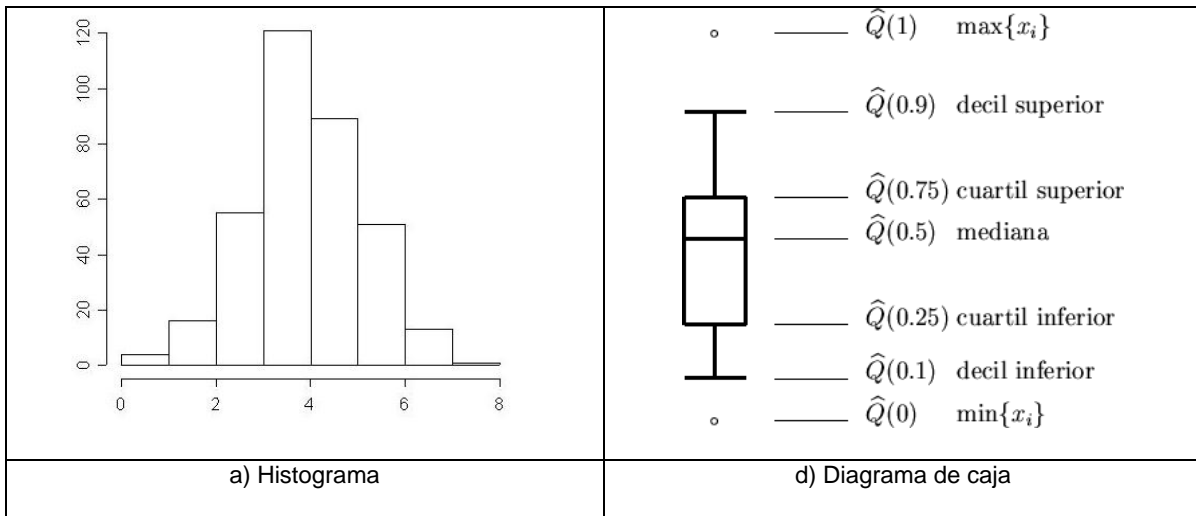


Figura 21. Gráficos de distribución

ANÁLISIS ESTRUCTURAL

A partir de un análisis geoestadístico estructural, y un enfoque estadístico, se puede investigar el incremento en la variabilidad espacial en cualquier superficie.

El análisis estructural de datos es fundamental para que el análisis geoestadístico sea válido, puesto que el mismo está basado en la estimación y modelación de una función que refleja la correlación espacial de la propiedad que se estudia: el semivariograma (Díaz, 2002).

SEMIVARIOGRAMA

El semivariograma es una función para modelar la variación espacial de una variable en distintas direcciones del espacio (**Figura 22**), estas funciones son utilizadas posteriormente para interpolar en el espacio el valor de la variable en sitios no muestreados. Asimismo, es un gráfico de la semivarianza que caracteriza la tasa de cambio de una variable asignada (elevación de nivel freático) con respecto a la distancia (Sophocleous, 1983).

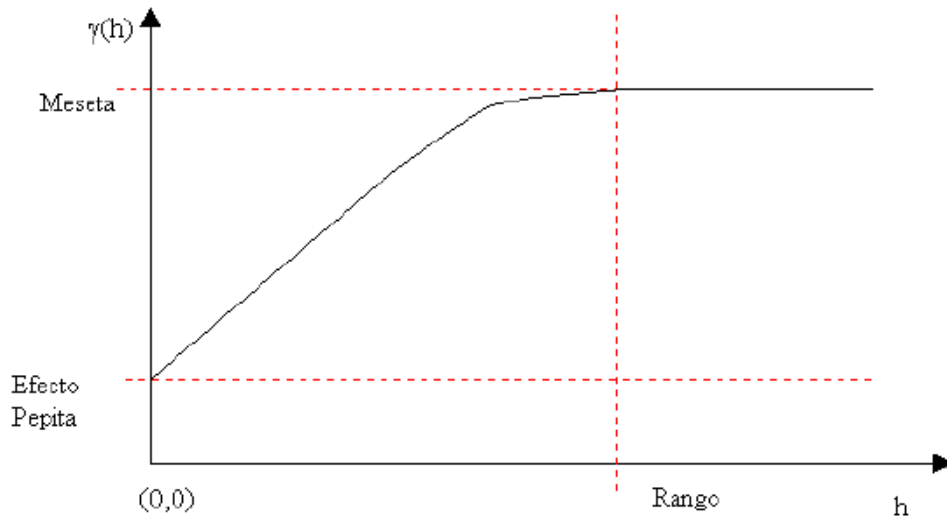


Figura 22. Parámetros del semivariograma (efecto pepita, rango y meseta)

La definición teórica de la función variograma $\gamma(h)$ es la esperanza matemática siguiente:

$$\gamma(\vec{h}) = \frac{1}{2} E \left[\left(Z(x + \vec{h}) - Z(\vec{x}) \right)^2 \right]$$

Las muestras tomadas juntas suelen ser más similares que las muestras separadas por distancias mayores. El semivariograma representa este cambio en la variación con la distancia de separación cada vez mayor (Wingler, 1997).

Los parámetros que definen al semivariograma son:

- ❖ **Meseta (sill):** es el valor de $g(h)$ a partir del cual el semivariograma llega a su valor límite y permanece constante. Puede obtenerse trazando una línea paralela a la abscisa y que se ajuste a los puntos de mayor valor del semivariograma y su valor se lee en la intersección de esta línea con la ordenada.
- ❖ **Alcance (rango):** se representa por a y es la distancia h para la cual las variables $Z(x)$ y $Z(x+h)$ son independientes, es decir, la distancia para la cual los valores de la variable dejan de tener correlación, o lo que es lo mismo, la distancia para la cual el semivariograma alcanza su meseta. El alcance siempre tiene valor positivo.
- ❖ **Efecto pepita (nugget):** el semivariograma por definición es nulo en el origen, pero en la práctica las funciones obtenidas pueden presentar discontinuidad en el origen, a esta discontinuidad se le llama efecto pepita, en inglés (Nugget effect). Puede ser obtenido trazando una línea recta entre los primeros puntos del semivariograma empírico y extender esta hasta que se intercepte con el eje Y. El efecto pepita se representa como C_0 .

SEMIVARIOGRAMA EXPERIMENTAL

Se denomina semivariograma experimental a aquel que es obtenido por estimación a partir de los datos de una muestra (**Figura 23**). El estimador más común se basa en el método de los momentos, que puede escribirse como sigue:

$$\gamma^*(\underline{h}) \cong \frac{1}{2N(\underline{h})} \sum_{i=1}^{N(\underline{h})} [Z(\underline{x}_i + \underline{h}) - Z(\underline{x}_i)]^2$$

Donde γ^* es el semivariograma experimental, $Z(\underline{x}_i)$ son los valores experimentales en los puntos \underline{x}_i , en los que se dispone de datos tanto en \underline{x}_i , como en $\underline{x}_i + \underline{h}$; $N(\underline{h})$ es el numero de pares de puntos separados por una distancia \underline{h} .

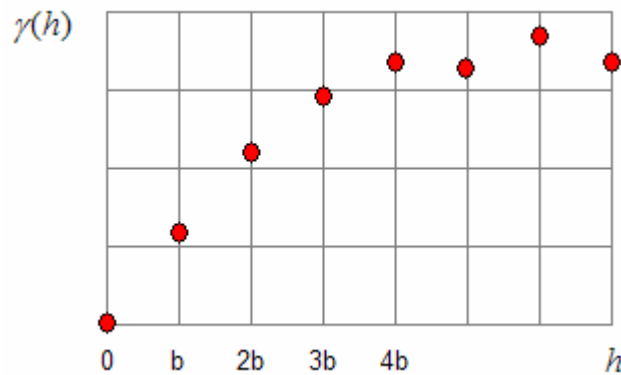


Figura 23. Semivariograma experimental

Motero y Larraz (2008), señalan que las diferencias entre los distintos semivariogramas direccionales pueden ser debidas a la escasez de datos en determinadas direcciones, a la heterogeneidad de las observaciones o a fluctuaciones experimentales y no precisamente a la cuestión de la anisotropía, la cual debe ser tratada en cada caso concreto con sumo cuidado.

ANISOTROPIA

La anisotropía se manifiesta por el comportamiento diferente de los semivariogramas en las diferentes direcciones del espacio. Con frecuencia la anisotropía es el resultado de mecanismos hidrodinámicos o de transporte, aparece con frecuencia en las variables geológicas y puede tener su origen en el comportamiento microscópico del medio o en la variabilidad espacial. Se usa para modelar fenómenos que tienen cambios importantes en la meseta y el alcance en diferentes direcciones.

Para calcular la presencia de anisotropía es necesario calcular el semivariograma en varias direcciones. En la práctica existen dos tipos de comportamientos anisotrópicos (**Figura 24** y **25**) del semivariograma:

- ❖ Anisotropía geométrica: se manifiesta en que el alcance varía con la dirección, la meseta permanece constante.
- ❖ Anisotropía zonal: se presenta cuando existe una fuente de variabilidad adicional en una de las direcciones, y esta se manifiesta cuando la meseta depende de la dirección pero el alcance se mantiene constante (Samper y Carrera 1996, Kitanidis, 1997, y Alfaro 2007).

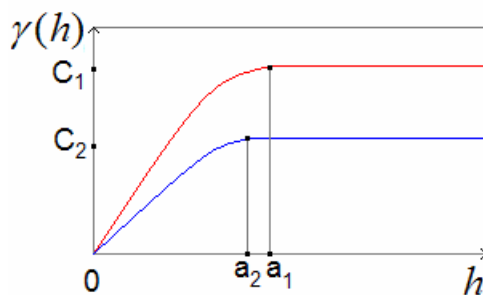


Figura 24. Anisotropía geométrica

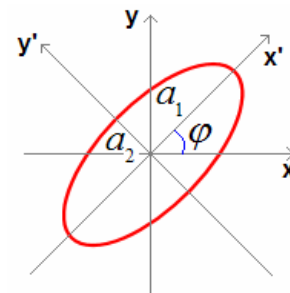


Figura 25. Anisotropía zonal

SEMIVARIOGRAMA TEORICO

En la práctica el semivariograma experimental se calcula y ajusta a un semivariograma teórico (**Figura 26**), los cuales no son más que la combinación de expresiones matemáticas o modelos sencillos diseñados para representar adecuadamente los valores estimados de variogramas reales (Samper y Carrea, 1990).

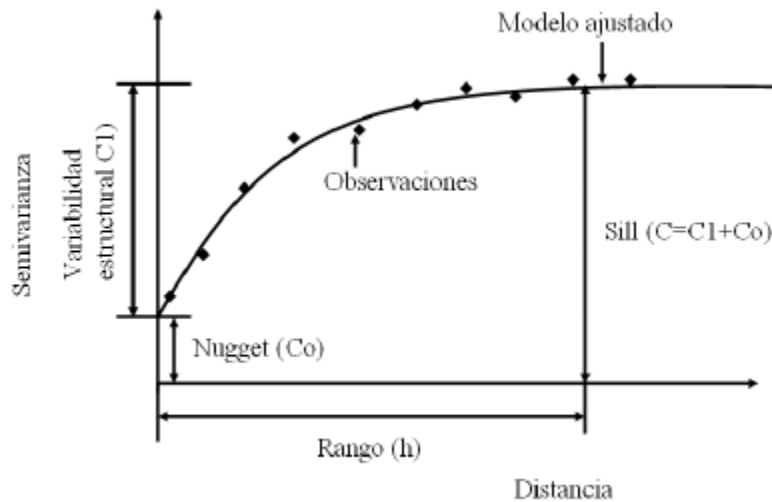


Figura 26. Semivariograma teórico

MODELOS DE SEMIVARIOGRAMA

Así como en estadística existen modelos (ley de Gauss, Lognormal,...) en geoestadística también existen modelos de semivariograma (Alfaro, 2007)

En la actualidad existe una gran variedad de software con utilería que brindan la oportunidad de realizar el ajuste del semivariograma con el apoyo de modelos tales como: circular, tetraesférico, pentaesférico, cuadrático racional, J-Bessel, K-Bessel y estable.

Pero los modelos teóricos (**Figura 27**) convencionales o más usados son: el gaussiano, el exponencial, el esférico, de potencia, lineal con meseta y sin meseta, se describen a continuación:

1. **Modelo efecto pepita puro**, indicativo de un fenómeno sin ninguna autocorrelación espacial. No es común emplearlo solo, sino en combinación con algún otro, ya que la discontinuidad en el origen, (efecto pepita) suele ser indicativa de un comportamiento francamente irregular, tal vez discontinuo y en el que parte de la estructura espacial se concentra a distancias inferiores a las observadas. Su ecuación es:

$$\gamma(\underline{h}) = \begin{cases} 0 & \text{para } \underline{h} = 0 \\ C & \text{para } \underline{h} > 0 \end{cases}$$

Para efectos de modelación basta superponer el efecto pepita puro a cualquiera de los semivariogramas teóricos.

2. El **modelo esférico** es uno de los más importantes y empleados en la práctica. Se caracteriza porque alcanza la meseta para una distancia finita ($\underline{h} = a$). Es indicativo de fenómenos continuos (o con a lo sumo numerable de discontinuidades), aunque no derivables.

Es decir fenómenos cuya representación pueden presentar quiebros. Se define por la ecuación:

$$\gamma(\underline{h}) = \begin{cases} \frac{C}{2} \left[3 \left(\frac{\underline{h}}{a} \right) - \left(\frac{\underline{h}}{a} \right)^3 \right] & \text{para } \underline{h} \leq a \\ C & \underline{h} > a \end{cases}$$

Donde los parámetros son la meseta $C > 0$ y el alcance o rango $a > 0$.

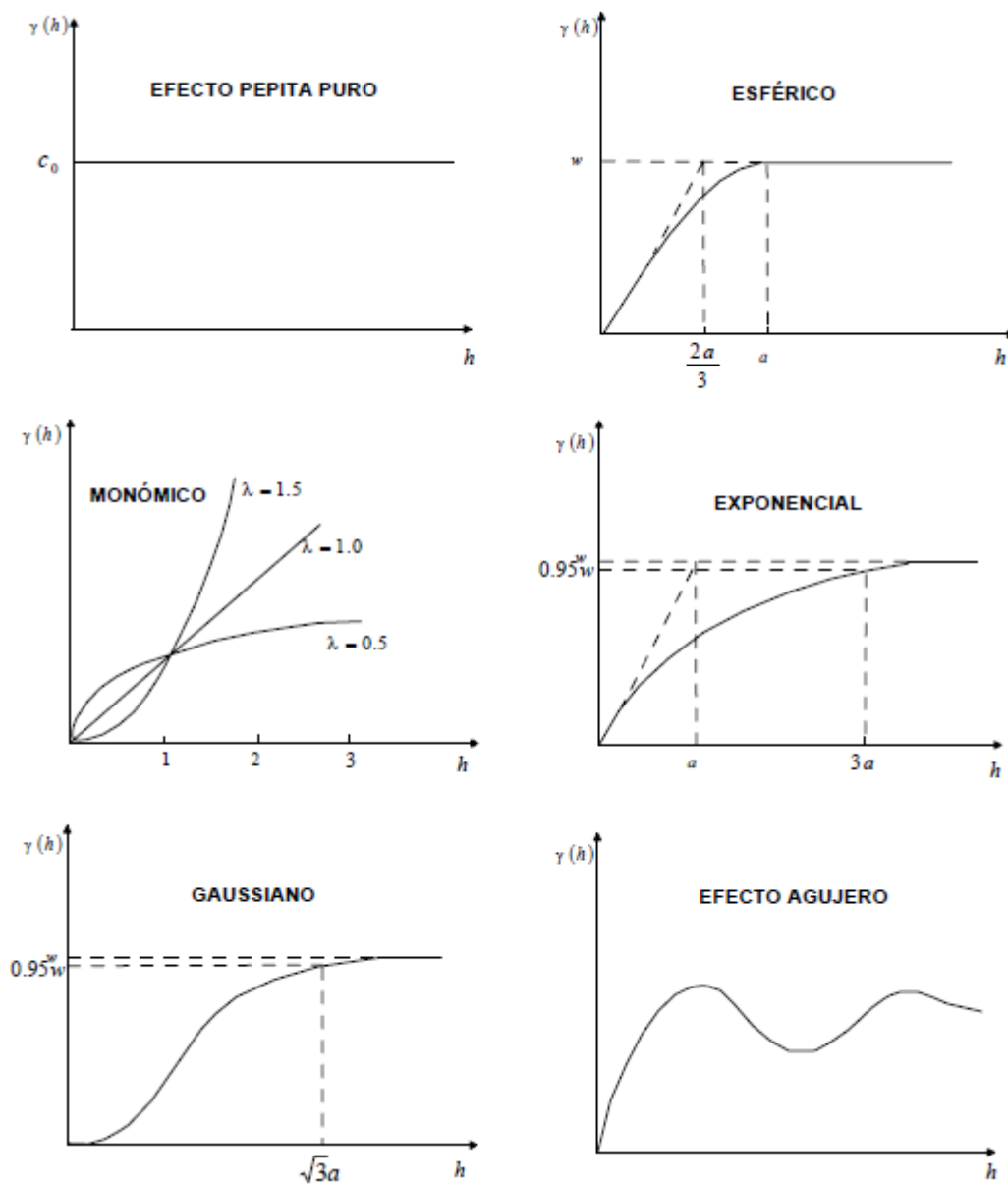


Figura 27. Semivariogramas teóricos más comunes (Samper y Carrera, 1990)

3. Los **modelos monómicos** (en \underline{h}^θ) son los de la forma

$$\gamma(\underline{h}) = K \underline{h}^\theta$$

Donde θ está en el intervalo (0,2) sin tomar sus valores extremos. Nótese que $\theta=0$ corresponde a un efecto pepita puro. Estos semivariogramas no tienen meseta, pues tienden a infinito cuando lo hace \underline{h} . Los modelos monómicos se emplean para representar fenómenos no estacionarios.

4. El **semivariograma exponencial** crece más lentamente que el esférico o cuadrático, es representativo de fenómenos continuos salvo en un conjunto de puntos (en una dimensión), líneas (en dos dimensiones) o planos (en tres dimensiones). Tiene por ecuación:

$$\gamma(\underline{h}) = C \left(1 - e^{-\frac{\underline{h}}{a}} \right)$$

La meseta es C ; el alcance en teoría es infinito pero en la práctica: si $\underline{h} > 3a$, entonces $\gamma(\underline{h}) \cong C$; el alcance práctico es $3a$. Por lo tanto, alcanza su meseta de forma asintótica:

$$meseta = \lim_{\underline{h} \rightarrow \infty} C \left(1 - e^{-\frac{\underline{h}}{a}} \right) = C$$

5. **Modelo gaussiano:** tiene un comportamiento parabólico en el origen con pendiente nula es indicativo de una gran irregularidad, esta dado por la expresión :

$$\gamma(\underline{h}) = C \left[1 - \exp\left(-\frac{\underline{h}^2}{a^2}\right) \right]$$

También alcanza su meseta asintóticamente

$$meseta = \lim_{h \rightarrow \infty} \gamma(\underline{h}) = C$$

Este modelo se emplea para representar fenómenos “suaves”, es decir, continuos en todos los puntos y derivables en la mayoría.

6. El **modelo efecto agujero** es indicativo de fenómenos con componentes periódicas o cuasi-periódicas. los semivariogramas más comunes con efecto agujero son:

$$\gamma(\underline{h}) = C \left(1 - \frac{\text{sen} \cdot \underline{h}}{\underline{h}} \right)$$

Con un comportamiento parabólico en el origen y negativo definido en tres dimensiones. Otra alternativa válida para efecto agujero muy acentuado en una dirección (definido negativo en una dimensión) es el siguiente modelo:

$$\gamma(\underline{h}) = C(1 - \cos \cdot \underline{h})$$

Anexo B

Tabla 7. Registro de elevaciones del nivel estático y piezométrico para el año 2004

Nombre	X	Y	Nivel Estático	Piezometría
E-1	720225.436	1916753.648	0.850	1794.790
E-2	722374.076	1913638.049	5.640	1738.400
E-3	722453.941	1913900.284	8.820	1719.180
E-4	723200.860	1914483.424	5.450	1751.950
E-5	722925.675	1912355.661	3.000	1720.160
E-6	723039.932	1912172.410	3.180	1712.170
E-7	723083.697	1911951.493	1.580	1696.420
E-8	722286.908	1911598.446	2.990	1725.330
E-9	722050.921	1911565.139	3.810	1724.190
E-10	724885.843	1911682.146	2.300	1712.940
E-11	726782.38	1908225.25	4.120	1672.030
E-12	725440.25	1907472.49	4.490	1690.940
E-13	732834.58	1908972.58	1.670	1674.480
E-14	732593.92	1908567.01	3.420	1698.600
E-15	733244.85	1909533.83	2.280	1703.720
E-16	731844.50	1907156.31	4.570	1673.280
E-17	731682.15	1906877.72	9.680	1647.320
E-18	731803.28	1906094.95	6.060	1630.940
E-19	730638.73	1906635.35	13.600	1633.400
E-20	729542.10	1906392.45	3.000	1671.800
E-21	728733.18	1907115.29	2.570	1812.430
E-22	727461.15	1905099.36	3.190	1686.500
E-23	730953.68	1905169.02	6.150	1624.850
E-24	731110.00	1904934.00	4.990	1639.300
E-25	726531.69	1900126.14	0.750	1668.250
E-26	726195.28	1900073.24	1.300	1685.290
E-27	727086.10	1900784.12	1.550	1643.450
E-28	724613.72	1901707.19	0.540	1699.460
E-29	724175.61	1900407.89	1.600	1704.400
E-30	729923.35	1901627.36	5.130	1647.840
E-31	729425.30	1901492.66	4.100	1621.900
E-34	733139.49	1904234.26	9.370	1641.630
E-35	731052.68	1903721.79	5.160	1642.080
E-35 A	731424.70	1903756.72	5.070	1616.930
E-36	733928.39	1903997.20	6.630	1655.370
E-37	733919.34	1901930.64	5.550	1625.800
E-38	734438.77	1904599.58	2.410	1702.610
E-39	733957.34	1897536.78	3.180	1610.230
E-40	732948.16	1900243.73	1.250	1601.750
E-41	731651.91	1899318.92	9.200	1620.300
E-42	731721.62	1899165.95	9.380	1591.620
E-43	732725.53	1898227.05	7.930	1587.070
E-43 A	733542.29	1898420.78	3.380	1620.030
E-44	732405.15	1898586.30	5.880	1588.120
E-45	731235.87	1899511.05	14.210	1591.790
E-46	730665.66	1900273.42	7.550	1607.450
E-47	730688.34	1900888.68	4.300	1633.460
E-48	730329.19	1901284.42	8.150	1611.850
E-49	732538.64	1901954.99	0.070	1609.930
E-50	736555.78	1902215.97	2.280	1717.080
E-51	736741.23	1901510.82	0.770	1692.230
E-52	732759.76	1900696.71	1.730	1599.270
E-53	735033.81	1898293.17	0.100	1607.900
E-54	734177.92	1898160.44	4.010	1590.990
E-55	737139.62	1900285.34	9.450	1659.450
E-56	736964.74	1900068.07	3.600	1677.400
E-57	736519.27	1897664.36	1.650	1648.230
E-58	733360.63	1897228.67	3.410	1586.590
E-59	733231.55	1895566.69	7.270	1585.730
E-60	728355.04	1892683.31	2.300	1669.610
E-61	728179.66	1892496.88	1.730	1641.270
E-62	732172.74	1895062.77	6.300	1620.740

E-32	731082.47	1902120.03	8.130	1621.390
E-32A	730765.65	1901904.31	9.680	1628.080
E-33	732477.72	1903685.56	10.500	1625.500

E-63	734384.23	1895610.47	6.200	1634.070
E-64	736134.20	1895138.36	6.320	1567.680
E-65	736000.14	1896520.63	7.800	1580.200

Continúa....

Nombre	X	Y	Nivel Estático	Piezometría
E-66	731658.19	1901391.56	3.710	1626.200
E-66 A	731561.23	1902128.48	4.170	1603.830
E-67	731841.41	1900870.86	3.900	1602.100
E-68	733262.57	1898057.83	6.070	1607.790
E-69	735524.31	1891564.30	2.900	1578.100
E-70	732711.04	1889257.00	0.300	1632.350
E-71	731506.40	1888536.28	6.100	1659.230
E-72	730905.68	1889359.84	6.820	1656.570
E-73	731516.34	1887644.64	3.500	1660.610
E-74	725894.99	1887767.24	0.560	1740.620
E-75	733579.90	1885638.22	2.770	1650.380
E-76	736276.33	1893048.91	3.610	1570.390
E-77	736813.49	1892624.53	12.890	1597.370
E-78	737370.03	1893092.16	7.420	1578.350
E-79	738056.84	1892515.77	15.140	1545.860
E-80	739508.17	1889764.85	9.480	1590.310
E-81	738082.52	1892854.33	10.200	1547.800
E-82	738887.41	1894862.45	3.000	1609.690
E-83 A	736555.50	1894497.40	9.960	1556.040
T-1	781418.14	1872880.60	4.850	1681.150
T-2	781506.13	1872943.30	2.990	1684.010
T-3	777642.03	1871815.16	11.830	1652.170
T-4	780213.75	1872156.98	12.310	1667.690
T-5	780119.58	1872555.60	7.070	1668.930
T-6	777787.83	1867510.80	6.200	1669.800
T-7	775044.30	1871196.50	6.230	1655.770
T-8	775892.39	1872007.37	5.010	1652.990
T-9	772531.31	1873162.97	4.290	1630.710
T-11	769804.86	1875649.79	9.100	1619.900
T-12	761893.39	1883299.74	6.800	1630.200
T-13	758247.82	1881378.14	9.760	1613.240

Nombre	X	Y	Nivel Estático	Piezometría
T-14	758338.11	1881256.24	9.990	1584.010
T-15	757769.87	1879342.39	11.600	1567.400
T-16	759369.55	1881607.35	10.360	1592.640
T-17	756857.87	1881299.46	10.790	1569.210
T-18	757216.36	1881027.09	10.590	1570.410
T-19	757017.18	1880378.78	12.490	1570.510
T-20	756634.02	1880251.04	10.740	1568.260
T-21	774436.78	1876878.88	4.140	1809.860
T-22	755261.93	1881126.09	6.560	1563.440
T-23	755604.18	1882175.94	10.870	1560.130
T-24	756073.05	1882550.75	23.920	1551.080
T-25	754586.54	1883116.87	4.050	1558.950
T-26	754418.73	1872596.85	4.490	1629.510
T-27	753974.09	1875082.54	1.480	1605.520
T-28	754011.68	1881725.91	4.800	1563.200
T-29	754406.09	1880931.10	5.680	1563.320
T-30	754403.46	1881146.35	4.400	1561.600
T-31	753527.42	1882611.88	4.700	1554.300
T-32	753636.01	1885842.41	2.910	1572.090
T-33	752652.32	1886445.52	9.170	1564.830
T-34	752590.91	1886629.30	11.150	1561.850
T-35	752716.71	1886015.74	4.950	1565.050
T-36	751968.97	1886683.26	6.360	1561.640
T-37	751408.04	1886584.20	4.300	1560.700
T-38	752205.99	1886655.38	7.600	1563.400
T-39	750846.75	1886515.91	0.390	1560.610
T-40	749899.78	1888995.55	12.590	1567.410
T-41	749501.21	1887699.11	12.630	1551.370
T-42	746001.09	1888487.69	21.400	1535.600
T-43	747789.31	1887371.09	8.200	1542.800
T-44	747374.10	1887458.40	8.050	1538.950

Continúa ...

Nombre	X	Y	Nivel Estático	Piezometría
T-45	746310.35	1887353.50	5.400	1537.600
T-46	746904.86	1887114.53	3.910	1541.090
T-46 BIS	771084.84	1875112.70	12.720	1625.280
T-47	767925.04	1874487.61	2.650	1613.350
T-48	766898.97	1871368.06	16.260	1699.740
T-49	767110.62	1877983.50	6.680	1604.320
T-50	766187.27	1878433.07	4.800	1602.200
T-51	766101.22	1878216.67	5.080	1601.920
T-52	765258.87	1879282.44	7.490	1600.510
T-53	761533.59	1876590.43	1.700	1589.300
T-55	761932.53	1877825.66	0.910	1583.090
T-56	764302.52	1880008.46	6.270	1600.730
T-57	758789.02	1883076.40	7.500	1614.500
Z-1	728343.09	1836197.85	3.050	1416.950
Z-2	729344.84	1837899.71	1.790	1417.210
Z-3	729275.30	1837748.30	1.850	1421.150
Z-4	729558.37	1840100.50	2.830	1424.170
Z-5	730422.86	1845964.32	1.780	1440.220
Z-6	729833.91	1845063.17	11.280	1436.720
Z-7	729714.33	1851460.63	1.000	1462.000
Z-8	726245.28	1857778.94	2.020	1552.980
Z-9	728216.27	1854098.03	3.940	1488.060
Z-10	730045.64	1852057.67	0.380	1465.620
Z-12	731283.20	1853230.37	1.690	1470.310
Z-13	731013.82	1854023.83	6.170	1478.830
Z-14	731552.76	1853777.58	2.110	1467.890
Z-15	731939.85	1854141.58	5.110	1461.890
Z-16	735051.26	1856491.34	8.560	1460.440
Z-17	735161.73	1856148.18	2.140	1460.860
Z-18	735749.90	1856536.02	9.800	1457.200
Z-19	734763.68	1856245.23	5.080	1457.920

Nombre	X	Y	Nivel Estático	Piezometría
Z-20	734367.17	1855936.41	11.950	1450.050
Z-21	734248.96	1855375.46	2.500	1456.500
Z-22	734967.66	1855217.38	3.370	1456.630
Z-23	734775.13	1855747.21	4.100	1456.900
Z-24	737404.07	1855644.33	3.100	1459.900
Z-25	736521.80	1857181.17	11.450	1456.550
Z-26	737280.99	1856316.37	2.980	1462.020
Z-27	737174.63	1861564.24	15.680	1460.320
Z-28	737216.04	1861832.24	15.740	1461.260
Z-29	737548.76	1862530.94	5.970	1472.030
Z-30	737837.24	1862949.33	11.870	1465.130
Z-31	739232.50	1862657.62	4.730	1473.270
Z-32	738714.31	1862125.91	6.700	1470.300
Z-33	739125.73	1862149.02	5.990	1471.010
Z-34	738199.00	1861861.77	5.830	1471.170
Z-35	738740.82	1861354.37	13.590	1463.410
Z-36	738018.75	1861300.08	14.210	1462.790
Z-37	737387.05	1861111.53	14.800	1462.200
Z-38	737186.94	1860469.67	13.500	1461.500
Z-39	737180.03	1860029.87	15.200	1454.800
Z-40	737033.43	1858841.26	15.750	1455.250
Z-41	736990.44	1857656.90	13.660	1455.340
Z-42	736805.56	1858294.43	8.670	1459.330
Z-43	737429.62	1858116.93	9.790	1459.210
Z-45	737784.987	1857862.625	10.700	1458.300
Z-46	738045.600	1857342.804	13.540	1453.460
Z-47	737632.385	1856944.550	7.970	1458.030
Z-48	737084.750	1857172.102	11.350	1456.650
Z-49	736718.804	1856519.174	8.780	1455.220
Z-50	736226.928	1855468.174	2.950	1458.050
Z-51	736251.793	1856424.775	7.500	1454.500

Continúa ...

Nombre	X	Y	Nivel Estático	Piezometría
Z-52	738748.968	1859063.542	10.570	1457.430
Z-53	740312.497	1859886.954	10.200	1461.800
Z-54	739884.399	1860284.919	8.810	1464.190
Z-55	736981.259	1862693.679	18.110	1461.890
Z-56	736861.89	1864617.31	9.130	1474.870
Z-57	736976.35	1863656.11	7.850	1471.150
Z-58	737500.47	1863136.18	14.540	1465.460
Z-59	736415.17	1868000.96	6.820	1500.180
Z-60	736689.34	1867318.32	12.320	1489.680
Z-61	736719.47	1866746.70	8.700	1490.300
Z-62	736653.26	1866315.45	9.390	1490.610
Z-63	736294.34	1865053.73	13.600	1481.400
Z-64	737631.97	1863555.87	14.000	1469.000
Z-65	737626.32	1864318.42	11.260	1470.740
Z-66	741327.38	1842013.87	7.440	1491.560
Z-67	741724.81	1844349.27	10.800	1511.200
Z-68	742314.14	1847000.54	0.300	1525.700
Z-69	747628.87	1846714.29	3.820	1566.180
Z-70	743992.54	1848735.66	3.380	1520.620
Z-71	739687.67	1849932.03	1.690	1508.310
Z-72	737399.58	1866828.17	6.750	1488.250
Z-73	738117.80	1866159.78	3.640	1485.360
Z-74	737570.93	1866076.72	6.110	1485.890
Z-75	737957.02	1869374.48	7.000	1492.000
Z-76	738711.85	1867823.98	1.140	1488.860
Z-77	739163.08	1868241.18	2.000	1490.000
Z-78	739345.43	1869387.19	2.650	1490.350
Z-79	739516.56	1869958.04	2.850	1492.150
Z-80	739760.87	1870600.45	2.840	1495.160
Z-81	738447.46	1869204.77	6.800	1512.120
Z-82	738095.23	1870240.14	3.600	1490.400

Nombre	X	Y	Nivel Estático	Piezometría
Z-83	737602.31	1870108.48	5.100	1492.900
Z-84	736798.12	1868700.24	10.520	1497.480
Z-85	736926.93	1868305.01	10.090	1492.910
Z-86	737630.48	1871280.39	8.850	1493.150
Z-87	736326.60	1871133.43	10.940	1499.060
Z-88	738096.08	1871989.87	10.080	1495.920
Z-89	736533.70	1854527.58	2.570	1461.430
Z-90	738394.00	1854554.60	1.350	1465.650
Z-92	742491.37	1851464.53	9.040	1482.960
Z-93	743613.24	1852086.27	8.650	1489.350
Z-94	747431.65	1851936.76	7.660	1515.340
Z-95	747147.15	1852447.00	23.280	1493.720
Z-96	741057.29	1854317.23	5.550	1469.450
Z-97	751847.16	1857158.35	9.400	1538.600
Z-98	751368.74	1857278.74	10.040	1533.960
Z-99	751316.55	1857182.78	9.630	1535.370
Z-100	751530.38	1857139.20	11.510	1532.490
Z-101	749484.16	1857809.95	18.060	1509.940
Z-102	748487.44	1858173.39	44.430	1474.570
Z-103	748294.25	1858730.81	23.380	1494.620
Z-104	754799.64	1856286.50	2.130	1585.870
Z-105	754793.13	1856335.62	3.000	1539.000
Z-106	747055.79	1856213.06	19.550	1484.450
Z-107	741342.44	1858407.28	13.600	1453.400
Z-108	743102.41	1859918.91	14.670	1462.330
Z-109	745510.22	1859190.29	0.220	1496.780
Z-110	747297.58	1861117.79	21.200	1477.800
Z-111	746486.12	1865155.28	7.730	1529.270
Z-112	746644.99	1863222.83	12.850	1499.150
Z-113	748762.92	1863198.53	12.800	1508.200
Z-114	748111.49	1862179.09	3.950	1503.050

Continúa ..

Nombre	X	Y	Nivel Estático	Piezometría
Z-115	748403.69	1862517.73	8.120	1504.880
Z-116	747003.31	1858927.86	22.930	1484.070
Z-117	747064.31	1858777.89	20.220	1488.780
Z-118	747089.16	1858679.77	19.560	1488.440
Z-119	747088.37	1858747.42	21.430	1488.570
Z-120	747611.26	1858870.40	21.550	1490.450
Z-121	746895.57	1859021.93	20.330	1486.670
Z-122	742582.69	1861324.42	13.240	1462.760
Z-123	742743.79	1862510.20	8.190	1474.810
Z-124	740026.51	1867823.59	3.630	1488.370
Z-125	740366.82	1870167.64	3.880	1491.120
Z-126	739626.52	1868624.70	3.500	1509.040
Z-127	740542.89	1869271.73	3.790	1491.210
Z-128	740301.44	1869155.18	2.300	1493.700
Z-129	741577.25	1871236.32	4.430	1510.890
Z-130	741604.07	1871221.25	4.440	1495.560
Z-131	741580.43	1872245.00	4.200	1496.800
Z-132	741762.87	1870543.48	4.540	1502.460
Z-134	742534.46	1874476.30	4.330	1500.670
Z-135	742342.22	1873951.29	4.220	1500.780
Z-137	738534.77	1871419.82	5.560	1495.440
Z-138	740267.16	1876015.39	10.710	1503.290
Z-139	740011.18	1875883.29	9.620	1507.380
Z-140	740710.06	1875079.49	11.970	1497.030
Z-141	739117.67	1874040.29	8.450	1505.550
Z-142	739557.23	1876237.88	7.640	1519.180
Z-143	739587.19	1873879.61	5.520	1501.480
Z-144	740056.94	1871634.00	0.170	1500.830
Z-145	740623.73	1874608.00	5.750	1521.720
Z-146	740508.72	1873539.61	5.820	1498.180
Z-147	741390.18	1874367.74	4.350	1520.720

Nombre	X	Y	Nivel Estático	Piezometría
Z-148	738891.35	1873121.33	7.950	1496.050
Z-149	737805.72	1875399.91	7.780	1521.220
Z-150	740964.59	1876109.52	6.440	1507.560
Z-151	733832.07	1877925.82	2.800	1585.200
Z-152	738410.02	1876913.59	7.600	1519.400
Z-153	742924.25	1876341.31	4.250	1505.750
Z-154	742937.70	1875947.84	7.000	1502.000
Z-155	743011.90	1875930.25	7.310	1535.160
Z-156	741565.15	1875621.35	6.090	1502.910
Z-157	741729.12	1876287.48	6.000	1506.000
Z-158	741271.74	1876423.65	5.230	1505.770
Z-159	744007.09	1878660.33	5.030	1516.970
Z-161	743366.38	1877007.62	4.770	1510.230
Z-162	743677.50	1876977.41	5.190	1510.810
Z-163	738501.02	1877757.20	7.020	1528.980
Z-164	739403.25	1880116.92	2.840	1524.160
Z-165	741383.30	1880087.46	9.320	1511.680
Z-166	743000.54	1880213.86	3.860	1516.140
Z-167	735124.65	1880612.54	0.450	1580.550
Z-168	736293.92	1879527.96	2.810	1562.190
Z-169	736377.75	1879181.42	2.590	1550.410
Z-170	736353.00	1879015.09	2.530	1554.470
Z-171	738664.34	1882107.28	1.080	1541.920
Z-172	738587.88	1882841.36	2.000	1545.000
Z-173	736518.22	1884013.96	2.710	1584.290
Z-174	735559.31	1885088.58	2.580	1597.420
Z-175	739062.19	1881988.83	4.290	1530.710
Z-176	739397.09	1881426.85	4.000	1530.000
Z-177	743703.41	1874754.35	5.450	1508.550
Z-178	741861.91	1881175.46	9.570	1511.430
Z-179	738988.12	1882255.52	8.280	1531.720

Continúa ..

Nombre	X	Y	Nivel Estático	Piezometría
Z-180	740598.93	1880871.79	5.370	1517.630
Z-181	740350.68	1880844.32	4.510	1520.490
Z-182	740398.59	1880282.12	6.970	1516.030
Z-183	740297.74	1881843.14	16.920	1510.080
Z-184	740681.09	1882982.29	2.910	1526.090
Z-185	743403.30	1881962.20	8.040	1518.960
Z-187	744334.47	1884814.62	11.300	1523.700
Z-188	744417.16	1884323.55	9.970	1522.030
Z-189	742130.22	1881769.01	16.180	1510.820
Z-190	742058.60	1883093.59	14.520	1516.480
Z-191	741933.73	1883654.90	14.480	1516.520
Z-192	742516.38	1883673.98	8.220	1520.780
Z-194	741917.96	1884248.22	16.300	1521.700
Z-195	727070.89	1855647.72	0.850	1512.150
Z-196	731100.56	1852862.47	3.830	1470.170
Z-197	739825.64	1859721.51	8.930	1462.070

Anexo C

Análisis geoestadístico de datos crudos de la piezometría del acuífero de valles centrales de Oaxaca

1. Análisis estructural

Uno de los prerrequisitos para la aplicación de métodos de estimación de parámetros es el conocimiento de los estadísticos espaciales de los datos, y es el análisis estructural la etapa que proporciona las herramientas para la caracterización de la variabilidad espacial de un parámetro, variables hidrogeológicas y fenómenos regionalizados.

La heterogeneidad natural del medio subterránea es la principal razón por la que distintos autores han propuesto la utilización de un enfoque probabilístico para el análisis del flujo subterráneo

a. Análisis exploratorio

332 mediciones de nivel freático (**Figura 16**) realizadas en el año 2004, conforman la base de datos utilizada para el análisis exploratorio. En un primer análisis espacial de los datos se observa la existencia de tres concentraciones principales de datos. La primera es hacia la zona sureste de la ciudad de Oaxaca, con 56 pozos, la segunda es hacia el sur-suroeste con 189 pozos y la tercera se encuentra al norte con 87 pozos. Estos pozos están ubicados en una dirección preferencial siguiendo las márgenes de los ríos Atoyac y Salado.

La profundidad de nivel freático incrementa en la zona de noroeste y este del lindero de los valles centrales. Los niveles someros se encuentran en la parte sur, suroeste del valle ubicados en el valle de Zaachila. Además que la mayoría de los pozos están ubicados dentro del valle y son muy pocos los pozos que están en las faldas de los cerros que rodean a los valles centrales de Oaxaca.

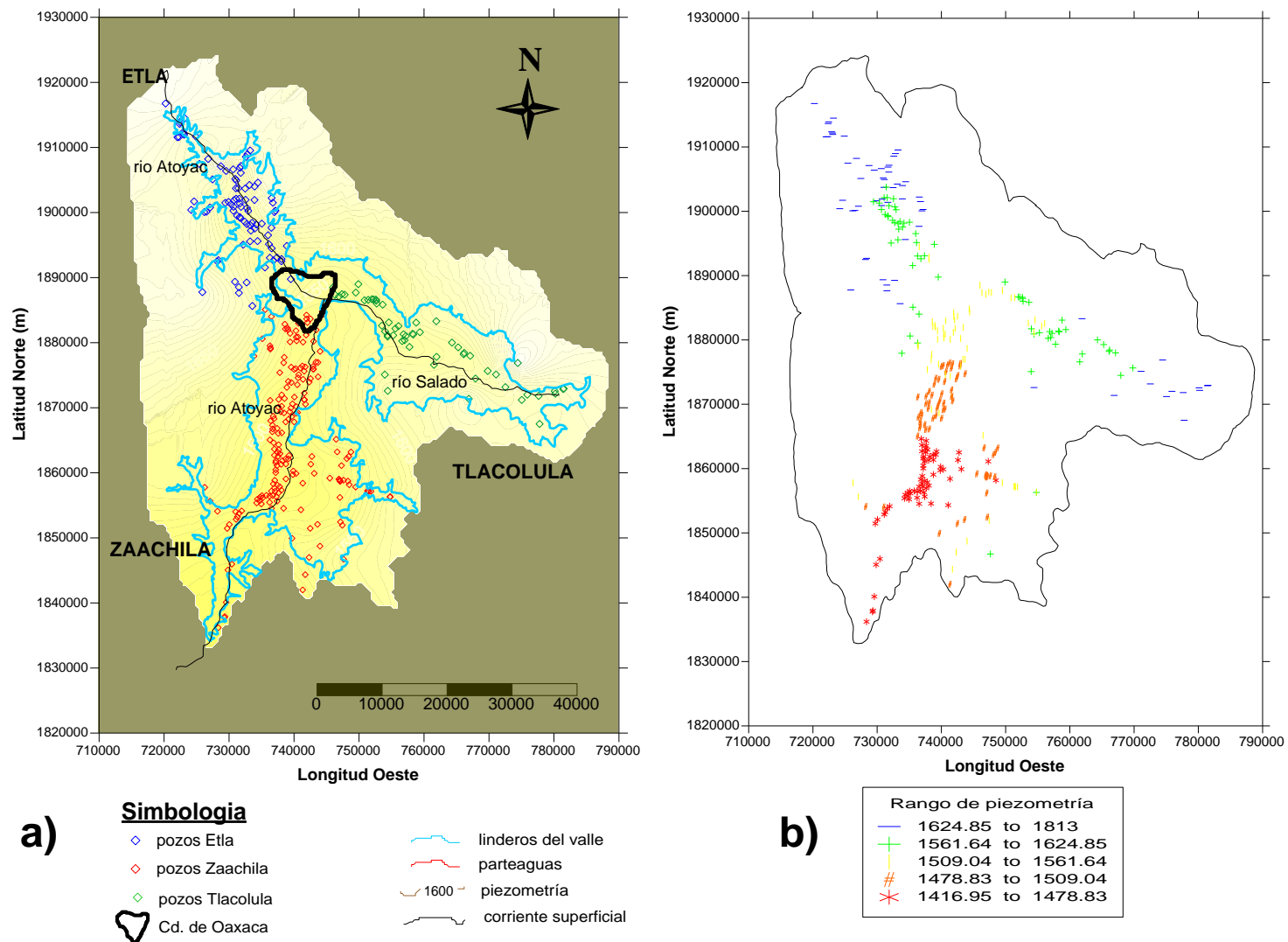


Figura 28. Ubicación de 332 pozos en el área de estudio. a) pozos pertenecientes a cada valles y b) rangos de piezometría

b. Análisis estadístico básico

En la **Tabla 5** se muestran las medidas descriptivas numéricas o estadígrafos de la base de datos. Para este análisis se utilizó el programa GSLIB y Rgeoestad (Díaz et al. 2009).

Los estadígrafos de los datos crudos reportaron una media de los niveles piezométricos (Z) igual a 1551.00 metros, su mediana de 1528.00 metros, con un coeficiente de asimetría = 0.7426, este último valor es indicativo de asimetría en la distribución de los datos, aunque los estadígrafos dan información importante sobre la distribución, es necesario auxiliarse de gráficos como histogramas, diagramas de cajas con bigotes y cuantiles para complementar dicha información.

Tabla 8. Estadísticos básicos

ESTADISTICOS	Datos crudos
Número Total	332
Distancia Máxima	80963.78
Distancia Mínima	30.7607
Media	1551.00
Varianza	6394.6939
Desviación estándar	79.9668
Coefficiente de Variación	0.0516
Rango mínimo	1417.0000
1er Cuantil	1490.0000
Mediana	1528.0000
3er Cuantil	1608.0000
Rango Máximo	1812.0000
Coefficiente de asimetría	0.7426
Curtosis	2.8822

c. Prueba de normalidad

El histograma (**Figura 29**), que de manera visual permite revisar la simetría, muestra un comportamiento asimétrico, desplazándose las barras al lado izquierdo (curtosis=2.882) hacia valores de nivel piezométrico bajos. Dada la variabilidad espacial de los procesos que intervienen en el origen de los materiales geológicos

de la corteza terrestre, es de esperar que la heterogeneidad esté presente en todas las formaciones geológicas como lo es en el caso de la piezometría, y así mismo mostrar asimetría.

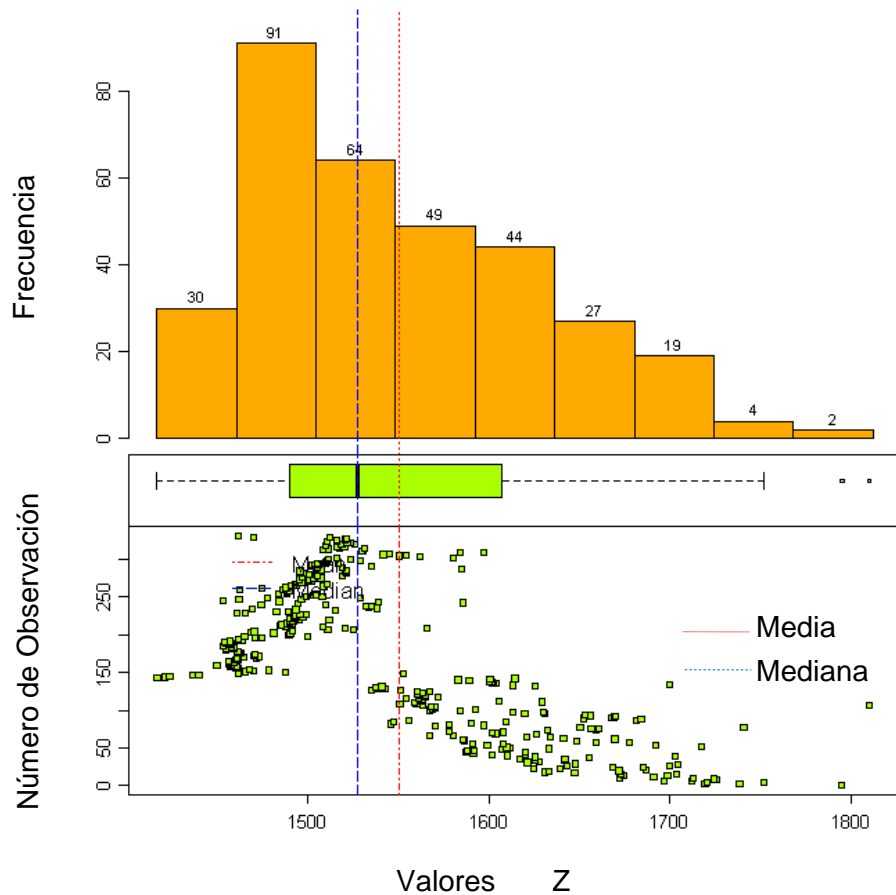


Figura 29 Histograma de la piezometría (Z) de 332 pozos.

La **Figura 30**, muestra el diagrama de cuantiles, apreciándose desviaciones significativas de la hipótesis de normalidad, en ambos extremos de la línea normal, esta falta de normalidad puede estar ligada a un problema de heterocedasticidad, que está influenciada por la asimetría en la distribución de la variable y valores atípicos que posteriormente serán analizados (**Figura 32**).

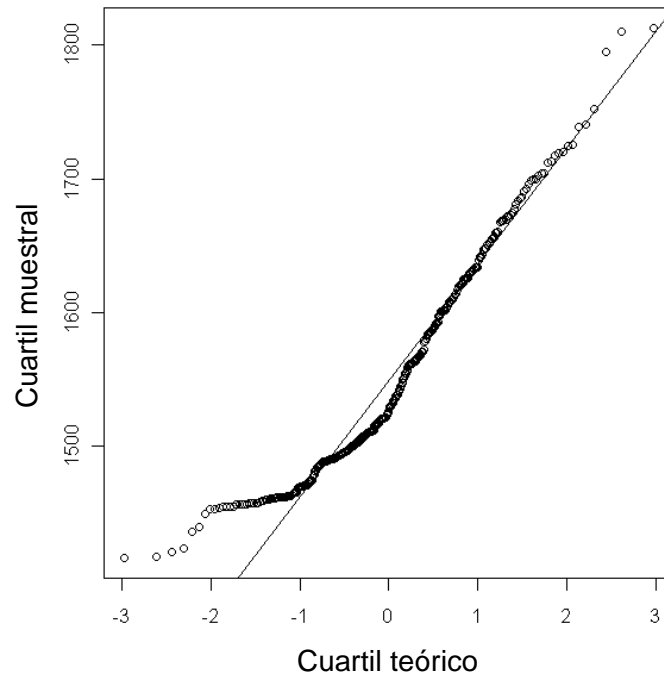


Figura 30. Diagrama de cuantiles de la piezometría (Q-Q Znormal).

d. Análisis de outliers distribucionales y espaciales

En la **Figura 32**, se presenta el análisis de valores atípicos (*outliers*) distribucionales, detectándose 3 valores que representan altitudes de nivel piezométrico altos. Dichos puntos tienen relación con los valores que desplazan las barras de la distribución del anterior histograma.

Por lo anterior, se decidió excluirlos del análisis y realizar nuevamente el histograma para conocer su influencia en la distribución (prueba de normalidad) de los registros.

De igual manera son 3 valores atípicos espaciales detectados en el área de estudio (**Figura 33**), esto se puede detectar analizando los valores vecinos que tengan una diferencia significativa.

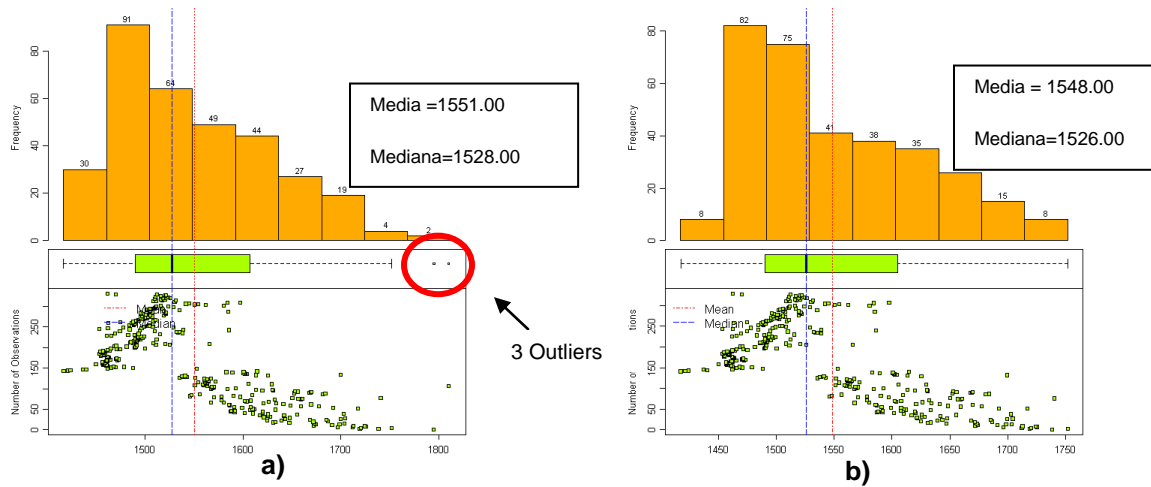


Figura 31. Análisis gráfico de valores atípicos (outliers): a) distribución con 3 outliers y b) distribución sin outliers.

Cabe señalar que estos tres puntos rojos representan a pozos que físicamente se ubican en una zona con alto gradiente topográfico o fuera de los límites del valle, razón por la que tienen influencia en el análisis de normalidad.

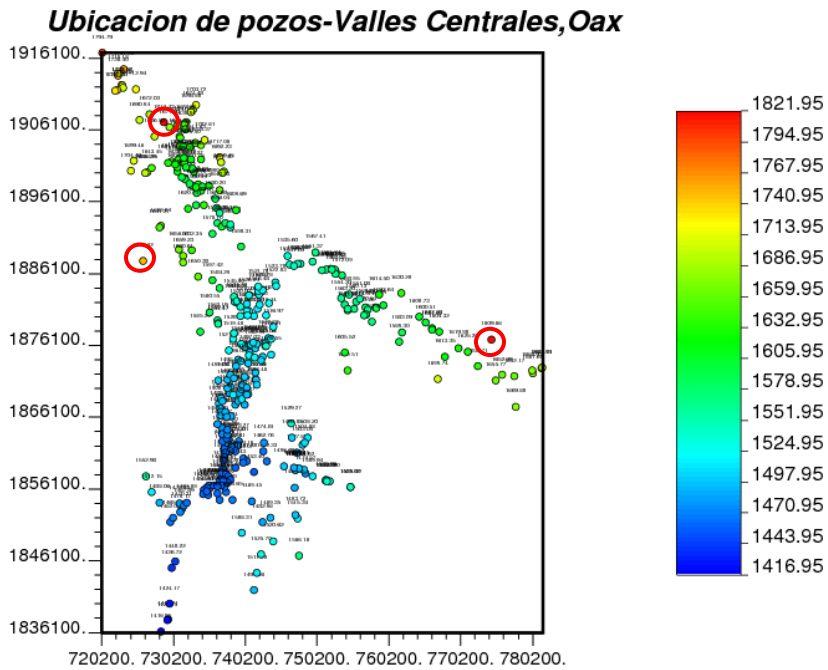


Figura 32. Distribución espacial de los 332 pozos.

Dentro de los objetivos del análisis exploratorio esta el obtener una muestra que presente una distribución normal o se asemeje, siguiendo este criterio se decide realizar algunas transformaciones a los datos y eliminar valores atípicos con el objetivo de mejorar la normalidad en los datos. La **Tabla 9**, presenta los estadígrafos de dichos procesamientos.

Tabla 9. Comparación de estadísticos de la variable.

ESTADISTICOS	Datos crudos	Sin valores Atípicos	Log_Z	Inv_Z	Root_Z
Número Total	332	329	332	332	332
Distancia Máxima	80963.78	78454.28	80963.78	80963.78	80963.78
Distancia Mínima	30.7607	30.7607	30.7607	30.7607	30.7607
Media	1551.00	1548.00	7.3450	0.0006	39.37
Varianza	6394.6939	5852.3797	0.0026	0.0000	1.0134
Desviación estándar	79.9668	76.5008	0.0507	0.0000	1.0067
Coefficiente de Variación	0.0516	0.0494	0.0069	0.0499	0.0256
Rango mínimo	1417.0000	1417.0000	7.2560	0.0006	37.6400
1er Cuantil	1490.0000	1490.0000	7.3060	0.0006	38.6000
Mediana	1528.0000	1526.0000	7.3310	0.0007	39.0800
3er Cuantil	1608.0000	1604.0000	7.3820	0.0007	40.0900
Rango Máximo	1812.0000	1752.0000	7.5020	0.0007	42.5700
Coefficiente de asimetría	0.7426	0.6071	0.6455	-0.5531	0.6934
Curtosis	2.8822	2.4019	2.6621	2.4837	2.7665

Ninguno de los tratamientos de datos presenta una notable mejoría en la distribución normal de los datos (**Figura 33a, 33b y 33c**).

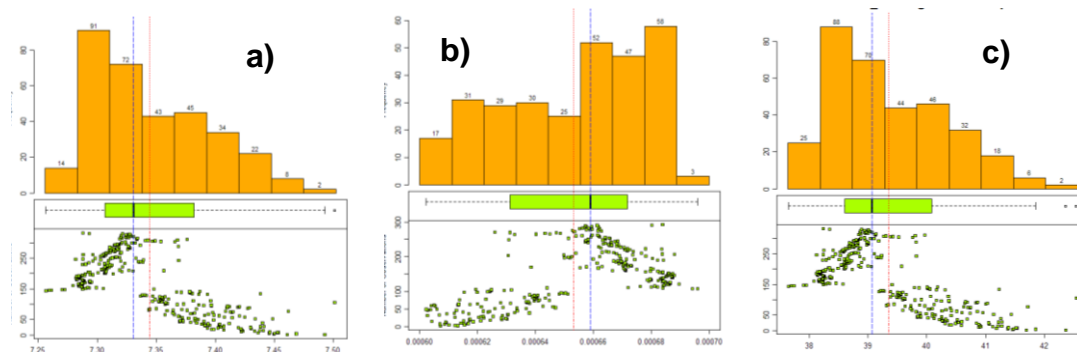


Figura 33. Histogramas de la distribución normal de las transformaciones. a) Log_Z, b) Inv_z y c) root_Z

2. Ajuste del semivariograma

La **Figura 34**, representa al semivariograma muestral obtenido a partir de los datos crudos de 332 registros de la base de datos. Se puede observar claramente un cambio de pendientes a distancias mayores de 20000 metros, existiendo un crecimiento rápido similar al de una función cuadrática, mostrando presencia de posible “tendencia” de los datos, por lo tanto los datos de nivel piezométrico no constituyen una variable estacionaria.

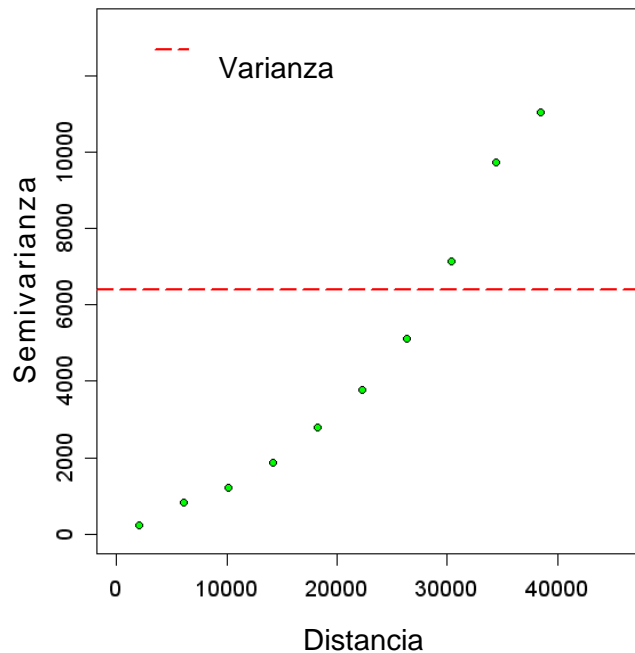


Figura 34. Variograma isotrópico de la Piezometría (Z)

Puesto que no es fácil comprobar si el semivariograma muestral cumple las condiciones necesarias para ser un modelo válido, se opta por ajustar uno de los modelos teóricos al semivariograma muestral.

Para realizar el ajuste de semivariograma muestral, el programa Rgeoestad presenta algunas opciones de modelos teóricos, además de brindar la oportunidad de modificar los parámetros, sin embargo de entrada proporciona parámetros

optimizados. Cabe señalar que la estimación del semivariograma está ligada a las hipótesis sobre el tipo de variable (estacionaria, intrínseca, no intrínseca).

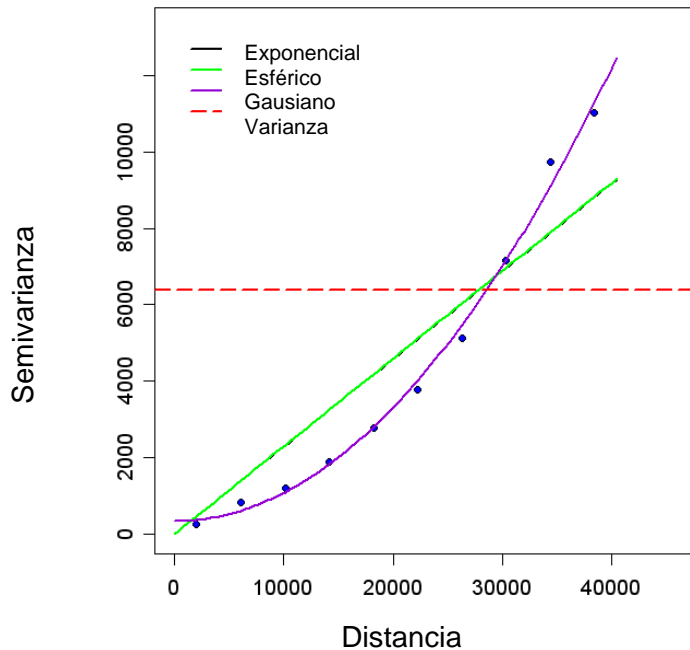


Figura 35. Modelos teóricos ajustados al variograma experimental

Los modelos ajustados se pueden observar en la **Figura 36**, en donde se han ajustado a los datos del semivariograma empírico de la **Figura 35**, siendo el modelo gaussiano el que mejor se ajustó a los datos. Este ajuste permitió extraer una serie de parámetros (**Tabla 11**) que fueron utilizados para la interpolación o estimación estadística y que definen el grado y escala de variación espacial.

Sin embargo al detectar presencia de “tendencia” en los datos, los semivariogramas ajustados no están representando en nuestro caso una correlación espacial confiable.

Tabla 10. Parámetros de los modelos teóricos ajustados

Modelo	Nugget	Sill +Nugget	Rango	SCE
Exponencial	0.00	77905533.07	339672566.19	7.2228e+10
Esferico	0.00	30776260.04	201096869.48	7.2219e+10
Gausiano	332.67	1066772.18	378594.71	3.0703e+09

Por lo tanto se opto por remover la tendencia considerándola un polinomio de segundo grado, aplicando la regresión por mínimos cuadrados.

De esta manera se obtienen los residuos o errores, con los que se realiza nuevamente el análisis geoestadístico, que a continuación se explica (**Anexo D**).

Anexo D.

Análisis geoestadístico de los residuos (errores) de segundo orden de la piezometría de valles centrales de Oaxaca

a. Análisis estadístico básico

En un segundo análisis se realizó en base al análisis de los datos crudos, considerando realizar el análisis geoestadístico de los errores, y así eliminar la tendencia que presentaban los datos. La **Tabla 11**, se observa una media de los errores igual a 0.00 metros, su mediana de -7.2510 metros, con un coeficiente de asimetría = 2.1473, este ultimo valor es indicativo de asimetría en la distribución de los errores.

Tabla 11. Estadígrafos de los residuos (errores)

ESTADISTICOS	Errores
Número Total	332
Distancia Máxima	80963.7764
Distancia Mínima	30.7607
Media	0.0000
Varianza	838.9415
Desviación estándar	28.9645
Coficiente de Variación	24040524.2195
Rango mínimo	-42.9000
1er Cuantil	-16.2600
Mediana	-7.2510
3er Cuantil	5.3000
Rango Máximo	152.9000
Coficiente de asimetría	2.1473
Curtosis	9.1804

b. Prueba de normalidad

Al analizar el histograma (**Figura 36**) de los residuos (errores) se observa asimetría, debido a que las columnas se desplazan hacia el lado izquierdo hacia los valores negativos.

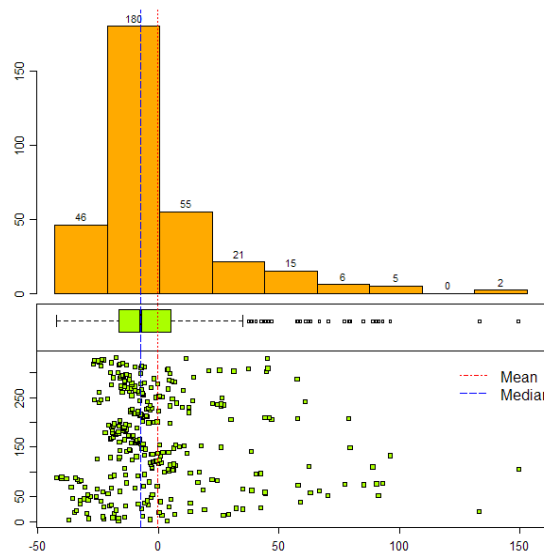


Figura 36. Histograma de los errores de 332 datos de piezometría

El diagrama de cuantiles (**Figura 37**), es una más de las pruebas graficas de normalidad. Para los errores se reporta desviaciones significativas de la hipótesis de normalidad, en el extremo derecho de la línea normal, esta falta de normalidad está influenciada por la asimetría en la distribución de la variable y valores atípicos que posteriormente serán analizados (**Figura 38**).

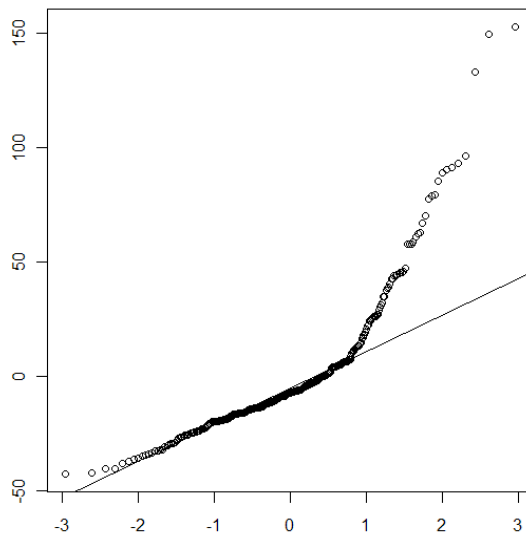


Figura 37. Diagrama de los cuantiles de los errores

c. Análisis de outliers distribucionales y espaciales

En la **Figura 38**, se presenta el análisis de valores atípicos (*outliers*) distribucionales, observándose 54 datos con valores altos. Dichos puntos tienen relación con los valores que desplazan las barras de la distribución del anterior histograma.

Para evaluar si estos datos tienen influencia significativa en la distribución (prueba de normalidad) de los errores se decidió excluirlos del análisis. Con este procedimiento se encontró una media= -9.9170, mediana= -9.9680 y un coeficiente de simetría= 0.0165, favoreciendo de esta manera a la hipótesis de normalidad.

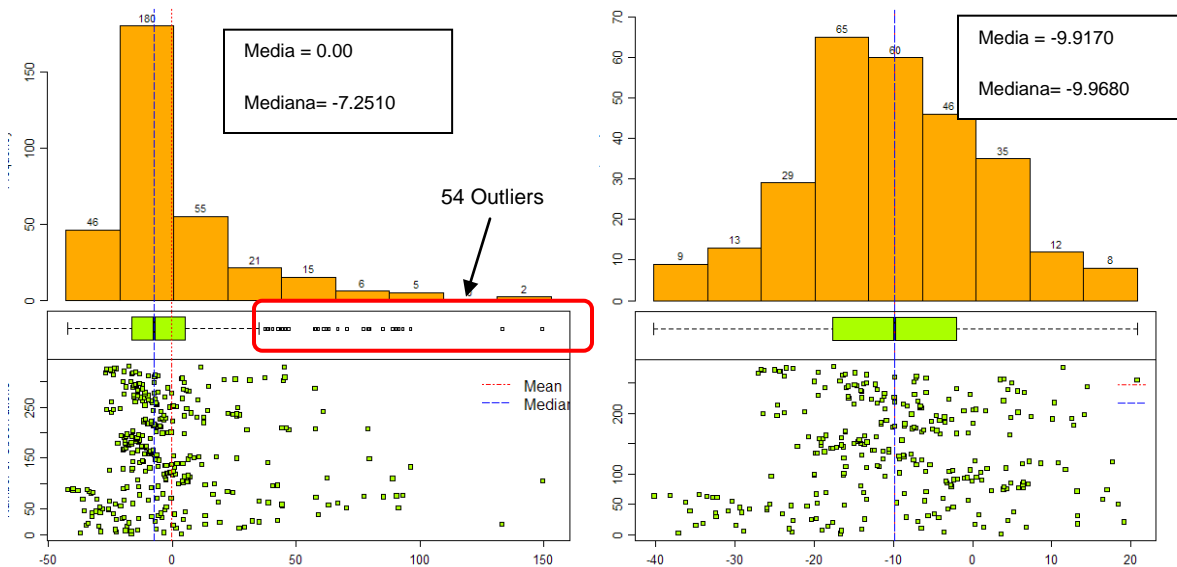


Figura 38. Análisis grafico de valores atípicos (outliers)

Al obtener la grafica de cuantiles (**Figura 39**) para los residuos, se comprueba la hipótesis de normalidad, siendo que los datos se ajustan más a la línea normal.

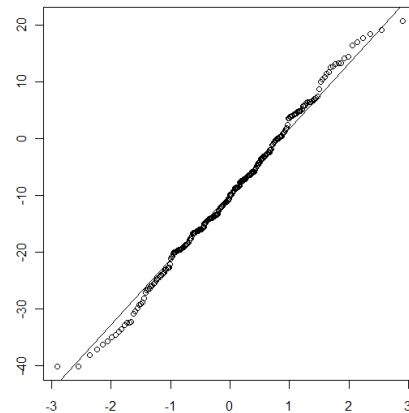


Figura 39. Cuantiles de los errores sin valores atípicos

Del análisis de outliers espaciales de los errores (**Figura 40**), se detectan 3 valores, coinciden con los reportados en la **Figura 32**. Estos tres puntos rojos representan a pozos que físicamente se ubican en una zona de fuertes pendientes topográficas o fuera de los linderos del valle, y tienen influencia en el análisis de normalidad.

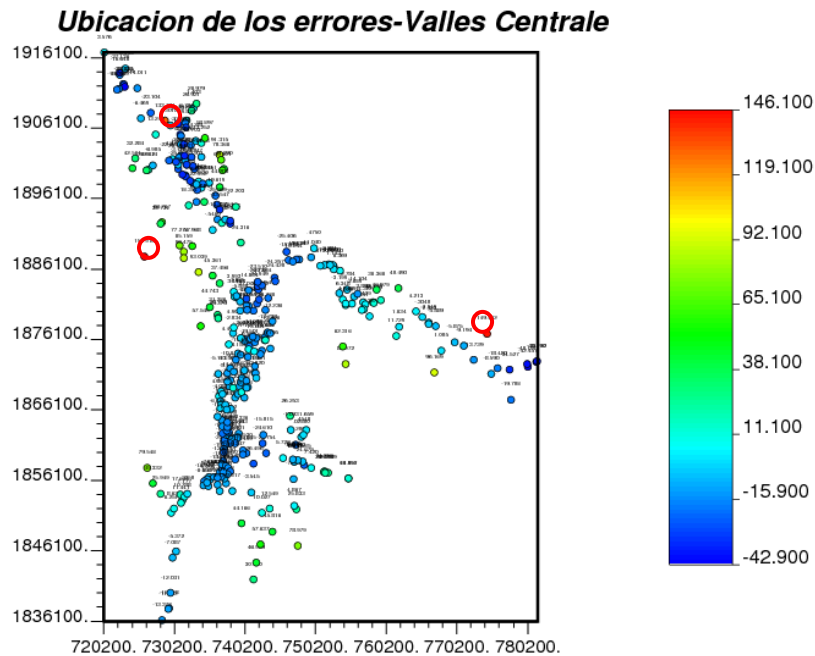


Figura 40. Distribución espacial de los 332 residuos (errores)

e. Análisis de estacionaridad

Un análisis de estacionaridad fue requerido para verificar si los errores son estacionarios o presentan alguna tendencia en las coordenadas X e Y. La **Figura 41**, se observa que los errores no representan ningún comportamiento preferencial, es decir no presenta tendencia.

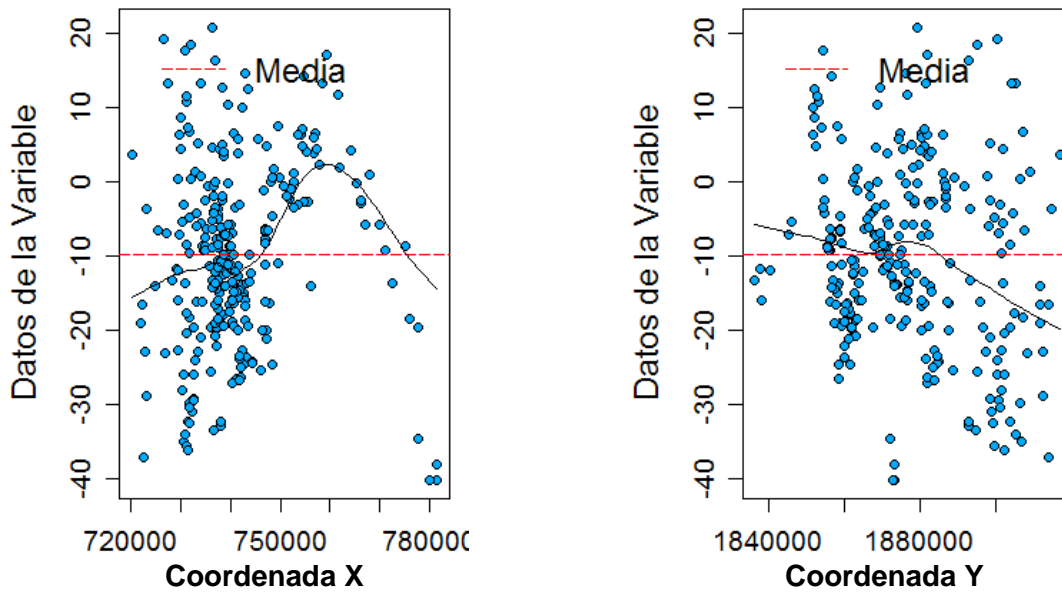


Figura 41. Representación de los errores en las coordenadas X y Y

Para comprobar los resultados obtenidos del análisis grafico de estacionaridad se obtuvo el semivariograma muestral (**Figura 42**) de los errores (semivariograma isotrópico), el cual coincide con lo anterior, ya que tiene un comportamiento diferente al de una función cuadrática.

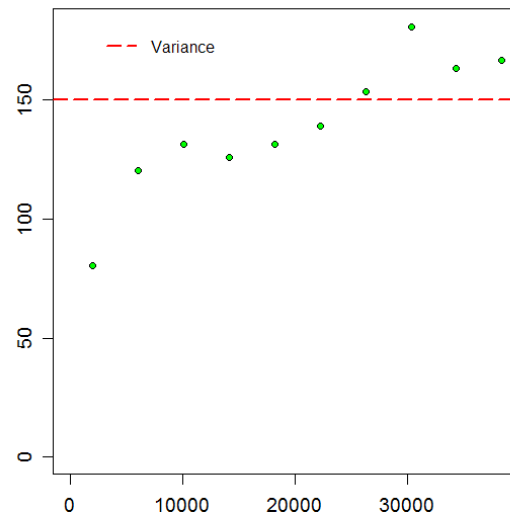
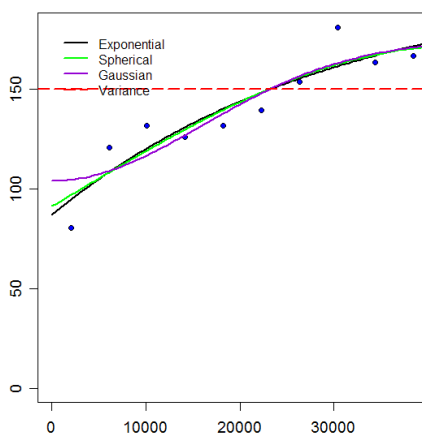


Figura 42. Semivariograma isotrópico de los errores

d. Ajuste de semivariograma

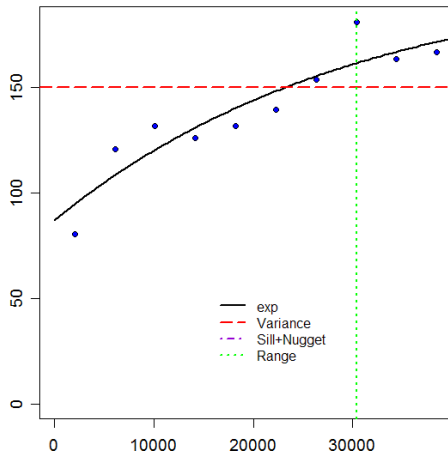
Los modelos (Figura 43) teóricos propuestos para ajustarse al semivariograma muestral fueron de tipo: exponencial, gaussiano y esférico, con sus respectivos parámetros, siendo el exponencial el de mejor ajuste.



Modelo	Nugget	Meseta	Alcance
Exponencial	86.99	204.64	30361.02
Esférico	91.16	171.37	42606.44
Gaussian	103.95	174.72	22638.01

Figura 43. Modelos teóricos usados en el ajuste del semivariograma muestral

La **Figura 44**, se muestra la grafica del modelo exponencial ajustado, y sus parámetros, los cuales se utilizaron para el diseño de la red de monitoreo y sirvieron para generar la matriz de covarianzas.



ESTADISTICOS	Errores
Modelo	Exponencial
Efecto nugget	86.99
Meseta	201.61
Alcance	29104.18
Numero de Lag	10
Tamaño de Lag	4048.188

Figura 44. Modelo exponencial ajustado al semivariograma muestral

El modelo exponencial se comprobó mediante un proceso de validación cruzada obteniendo una media = 0.00636, desviación estándar = 9.69 y coeficiente de simetría = 0.5935, lo cual indica que fue el mejor modelo seleccionado, la **Figura 45** muestra el histograma de los errores obtenidos en la validación.

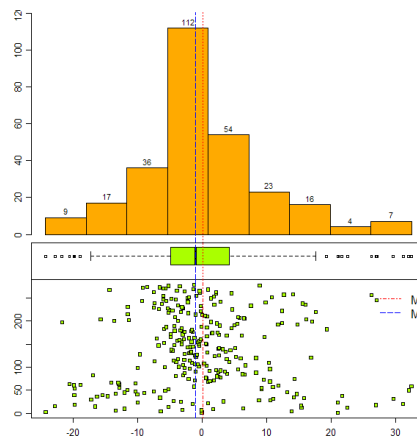


Figura 45. Histograma de los errores obtenidos de la validación cruzada