



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA
CONSTRUCCIÓN**

**CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO
AMBIENTE**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERA GEÓGRAFA Y DEL MEDIO AMBIENTE**

**TEMA: “DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE CONCENTRACIONES DE
ARSÉNICO TOTAL EN LA LAGUNA DE PAPALLACTA Y PROPUESTA
DE REMOCIÓN CON NANOPARTÍCULAS”**

AUTORA: JÁCOME GÓMEZ, GISSELA ESTEFANÍA

DIRECTORA: Ph.D. QUIM. MURGUEITIO HERRERA, ERIKA SOFÍA

SANGOLQUÍ

2020



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “**DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE CONCENTRACIONES DE ARSÉNICO TOTAL EN LA LAGUNA DE PAPALLACTA Y PROPUESTA DE REMOCIÓN CON NANOPARTÍCULAS**” fue realizado por la señorita *Jácome Gómez, Gissela Estefanía* el mismo que ha sido revisado en su totalidad , analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 6 de febrero de 2020

Firma:

.....
PhD. Quím. Murgueitio-Herrera, Erika Sofia.
C.C.: 1708947559



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, *Jácome Gómez, Gissela Estefanía*, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación : **“DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE CONCENTRACIONES DE ARSÉNICO TOTAL EN LA LAGUNA DE PAPALLACTA Y PROPUESTA DE REMOCIÓN CON NANOPARTÍCULAS”** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de esta investigación es veraz.

Sangolquí, 6 de febrero de 2020

Firma:

.....
Jácome Gómez, Gissela Estefanía

C.C.: 1724246093



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA
CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO
AMBIENTE

EXCEPCIÓN DE AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Yo, Jácome Gómez, Gissela Estefanía, con cédula de identidad 1724246093 autora del trabajo de titulación: **“DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE CONCENTRACIONES DE ARSÉNICO TOTAL EN LA LAGUNA DE PAPALLACTA Y PROPUESTA DE REMOCIÓN CON NANOPARTÍCULAS”** adjunto al presente remito mi solicitud que fue presentada al señor Vicerrector de Docencia de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, en la que consta la no publicación temporal en el Repositorio Institucional del trabajo de titulación antes mencionado, razón por la cual se publicará dentro de 180 días a partir de 3 de febrero de 2020.

Sangolquí, 07 de febrero de 2020

.....

Jácome Gómez, Gissela Estefanía

1724246093

DEDICATORIA

A mis padres (Esther y Gilberto) por ser excelentes padres que siguieron, cuidaron y guiaron mis pasos en este largo camino con esmero y comprensión. Por brindarme su cariño y paciencia ayudándome a sobrellevar las diferentes y complicadas circunstancias de la vida que nunca me hicieron rendirme. A ellos les debo todo por su confianza, dedicación y ayuda a cumplir mis sueños, promesas y metas.

A mi hermana (Alejandra), por compartir su vida, risas, llantos y cariño. Por ser la fuente de superación e inspiración para nunca parar de soñar ni rendirse ante un obstáculo en el cumplimiento de un sueño.

A mis mejores amigos Rodrigo (Rofi) y Paola (Pao bb), por ser personas especiales y únicas que me brindaron su apoyo y consejos en los momentos más difíciles para seguir adelante y cumplir mis ideales.

AGRADECIMIENTO

A mi familia: A mis padres (Esther y Gilberto) y a mi hermana (Alejandra), por guiarme y brindarme sus consejos, paciencia y cuidados; por secarme el llanto y darme su amor incondicional y su esmero en tratar de hacer de mí una persona leal, paciente, sincera con calidad personal. Sin ustedes todo esto no hubiese sido posible, gracias por hacerlo posible.

A mi mejor amigo Rodrigo (Rofi), por ser esa persona especial y llena de luz que apareció en mi vida para ayudarme a seguir este largo y difícil camino. Cuando todo parecía oscuro estabas ahí al final del túnel brillando intensamente dándome tu mano para levantarme

A mi mejor amiga Paola (Pao bb), por ser esa persona especial que me brindó su amistad incondicional estando dispuesta siempre a escuchar y darme aliento en los momentos más difíciles. Gracias amiga por las risas, llantos y consejos compartidos que me demostraron que la amistad verdadera y sincera existe; espero que sigamos con esta amistad muchos años más, sigamos siendo el dúo dinámico.

A mi tutora Erika Murgueitio, por su tiempo, conocimiento ayudando y siendo parte del cumplimiento de una de mis metas.

A los Ingenieros César Leiva e Izar Sinde por su dedicación, tiempo y conocimientos brindados durante esta etapa universitaria siendo ejemplos de profesionales íntegros.

A los Doctores Alfonso Tierra, Fabián Rodríguez y Rodolfo Salazar por todos los conocimientos compartidos y las palabras de aliento dichas en este difícil proceso; gracias por ser excelentes mentores y seres humanos.

A Natalie Villarroel por ser una persona presta a ayudar siempre con las dudas y problemas que se presentaron en esta nueva área experimentada; gracias por tu amistad, consejos y conocimientos porque sin ti no hubiese logrado culminar con éxito esta etapa.

A todas las personas que se cruzaron por mi vida y que trataron a toda costa de hacer el camino más difícil, gracias por ser parte de las piedras que utilice para construir mi sendero.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICADO DEL DIRECTOR	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	iii
EXCEPCIÓN DE AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiii
RESUMEN.....	xv
ABSTRACT	xvi
CAPÍTULO I.....	1
ASPECTOS GENERALES	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Planteamiento del problema	4
1.3 Justificación e importancia del problema.....	5
1.4 Objetivos	6
1.4.1 Objetivo General	6
1.4.2 Objetivos Específicos.....	6
1.5 Metas	7
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO	8
2.1 Contaminación	8
2.1.1 Definición.....	8
2.1.2 Contaminación atmosférica.....	8
2.1.3 Contaminación del suelo	9

2.1.4 Contaminación del agua	9
2.1.4.1 Parámetros físico-químicos del Agua	10
2.2 Arsénico	13
2.2.1. Origen y Abundancia	13
2.2.2 Propiedades	14
2.2.3 Toxicidad.....	14
2.2.4 Métodos de determinación de Arsénico	16
2.2.4.1 Método de Espectrofotometría de absorción atómica con generación de hidruros.....	16
2.2.4.2 Método de Azul de Molibdeno.....	17
2.2.4.3 Método de Gutzeit.....	19
2.2.4.4 Método dietilditiocarbamato de plata.....	19
2.3 Nanotecnología.....	21
2.3.1 Definición.....	21
2.3.2 Nanotecnología Verde.....	22
2.3.3 Nanopartículas.....	23
2.3.3.1 Definición.....	23
2.3.3.2 Nanopartículas Metálicas	23
2.3.3.3 Aplicaciones de las nanopartículas metálicas	24
2.4 Conceptos Geográficos	25
2.4.1 Sistemas de Información Geográficos (SIG)	25
2.4.2 Aplicaciones de los Sistemas de Información Geográficos (SIG)	26
2.5 Interpolación Espacial	28
2.5.1. Métodos de Interpolación Determinísticos	28
2.5.1.1 Método de Interpolación IDW	29
2.5.2 Métodos Geoestadísticos.....	29

2.5.2.1 Definición.....	29
2.5.3 Análisis Exploratorio de Datos	30
2.5.3.2 Gráficos Exploratorios	31
2.5.4 Análisis Estructural de Datos	31
2.5.4.1 Introducción	31
2.5.4.2 Variograma Experimental	32
2.5.4.3 Nube Variográfica.....	35
2.5.4.4 Variogramas Teóricos	35
2.5.5.1 Introducción	42
2.5.5.2 Método de Interpolación Kriging.....	42
2.5.6 Validación del Modelo	43
2.5.6.1 Introducción	43
CAPÍTULO III METODOLOGÍA.....	44
3.1 Descripción del área de estudio.....	44
3.2 Recopilación de datos.....	47
Muestreo.....	47
3.2.1 Recolección de las muestras.....	47
Fase Ambiental	50
3.3 Medición de los parámetros físico- químicos	50
3.3.1 Temperatura	50
3.3.2 Potencial de hidrógeno (pH)	50
3.4 Parámetros de análisis en laboratorio.....	51
3.4.1 Sulfatos.....	51
3.4.2 Nitratos	51
3.4.3 Turbidez	52

3.4.4 Arsénico	52
3.5 Preparación de extracto de borajó	53
3.6 Síntesis de nanopartículas	54
3.6.1 Síntesis de nanopartículas de Hierro	54
3.6.2 Síntesis de nanopartículas de Manganeseo	55
3.7 Diseño Experimental	56
3.7.1 Preparación de diluciones de arsénico	56
3.7.2 Medición de la concentración inicial de las diluciones de arsénico.....	57
3.7.3 Aplicación de las nanopartículas de hierro en diluciones de arsénico	58
3.7.4 Aplicación de nanopartículas de manganeso en diluciones de arsénico	59
3.7.5 Medición de la concentración de hierro en las diluciones de arsénico	59
3.7.6 Medición de la concentración de manganeso en las diluciones de arsénico	60
3.7.7 Evaluación de la remoción de arsénico con nanopartículas de hierro.....	61
3.7.8 Evaluación de la remoción de arsénico con nanopartículas de manganeso	61
3.7.9 Calculo de porcentaje de remoción de arsénico	62
3.8 Fase Geográfica.....	62
3.8.1 Recopilación y generación de una base de datos	62
3.8.2 Determinación de la variable principal	63
3.8.3 Determinación de variables auxiliares	63
3.8.4 Tamaño de muestra	64
3.8.5 Coeficiente de Pearson	64
3.8.6 Modelos Geoestadísticos de predicción de las variables de estudio	66
3.8.6.1 Análisis Exploratorio de Datos	66
3.8.6.2 Análisis estructural de datos.....	73
3.8.6.3 Predicción.....	82

CAPÍTULO IV ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	89
Fase Ambiental	89
4.1 Análisis Físico-Químico de las muestras de agua de la Laguna Papallacta.....	89
4.1.1 Caracterización Química	89
4.1.1.1 Parámetros “in situ”	89
4.2 Diseño Experimental	100
4.3 Porcentaje de Remoción.....	108
4.3.1 Porcentaje de Remoción de As.....	108
4.3.2 Porcentaje de presencia de Manganeseo en las NPs al final del tratamiento.....	118
Fase Geográfica	120
4.4 Modelos Geoestadísticos	120
4.4.1 Modelo Geoestadístico de Arsénico.....	129
4.4.2 Modelo Geoestadístico de pH	130
4.4.3 Modelo Geoestadístico de temperatura	131
CAPÍTULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	133
5.1 Conclusiones	133
5.2 Recomendaciones.....	134
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	136
ANEXOS	149

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Resumen estadístico de la variable As</i>	66
Tabla 2. <i>Resumen estadístico de la variable pH</i>	68
Tabla 3. <i>Resumen estadístico de la variable temperatura</i>	69
Tabla 4. <i>Parámetros básicos del variograma-Variable As</i>	78
Tabla 5. <i>Parámetros básicos del variograma-Variable pH</i>	79
Tabla 6. <i>Parámetros básicos del variograma-Variable temperatura</i>	80
Tabla 7. <i>Error de verificación del modelo de As</i>	84
Tabla 8. <i>Resumen estadístico del error de verificación del modelo de As</i>	85
Tabla 9. <i>Error de verificación del modelo de pH</i>	86
Tabla 10. <i>Resumen estadístico del error de verificación del modelo pH</i>	86
Tabla 11. <i>Error de verificación del modelo de temperatura</i>	87
Tabla 12. <i>Resumen estadístico del error de verificación del modelo temperatura</i>	88
Tabla 13. <i>Resumen de los parámetros "in situ" de las muestras de agua</i>	89
Tabla 14. <i>Resumen de los parámetros analizados en laboratorio</i>	93
Tabla 15. <i>Resumen de los datos de concentración de As-Laguna Papallacta</i>	95
Tabla 16. <i>Datos de concentración de As inicial de las unidades experimentales</i>	100
Tabla 17. <i>Concentraciones iniciales de Fe y Mn de las nanopartículas</i>	102
Tabla 18. <i>Concentraciones finales de As aplicadas nanopartículas de Mn</i>	102
Tabla 19. <i>Concentraciones finales de As aplicadas nanopartículas de Fe</i>	105
Tabla 20. <i>Porcentaje de remoción de As aplicadas nanopartículas de Mn</i>	108
Tabla 21. <i>Porcentaje de remoción de As aplicadas nanopartículas de Fe</i>	112
Tabla 22. <i>Concentración de Mn final de las unidades experimentales</i>	115
Tabla 23. <i>Concentración de Fe final de las unidades experimentales</i>	116
Tabla 24. <i>Porcentaje de presencia de Mn en las NPs al final del tratamiento</i>	118
Tabla 25. <i>Porcentaje de presencia de Fe en las NPs al final del tratamiento</i>	119
Tabla 26. <i>Parámetros estadísticos del error de verificación de As</i>	130
Tabla 27. <i>Parámetros estadísticos del error de verificación de pH</i>	131
Tabla 28. <i>Parámetros estadísticos del error de verificación de temperatura</i>	131

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i> Aplicaciones de las nanopartículas metálicas.....	25
<i>Figura 2.</i> Aplicaciones de los SIG.....	27
<i>Figura 3.</i> Parámetros del variograma	34
<i>Figura 4.</i> Nube Variográfica	35
<i>Figura 5.</i> Modelo Cúbico	36
<i>Figura 6.</i> Modelo esférico	37
<i>Figura 7.</i> Modelo Gaussiano	38
<i>Figura 8.</i> Modelo Pepita Puro	39
<i>Figura 9.</i> Modelo Lineal.....	40
<i>Figura 10.</i> Modelo Potencia	41
<i>Figura 11.</i> Mapa de ubicación de la zona de estudio	46
<i>Figura 12.</i> Mapa de ubicación de los puntos muestreados en la Laguna Papallacta.....	49
<i>Figura 13.</i> Lecturas de arsénico de las muestras de la Laguna Papallacta.....	53
<i>Figura 14.</i> Borojé licuado, cernido y filtrado.....	54
<i>Figura 15.</i> Formación y filtración de Np de hierro	55
<i>Figura 16.</i> Formación y filtración de Np de Manganeseo	56
<i>Figura 17.</i> Preparación de solución madre y diluciones de arsénico	57
<i>Figura 18.</i> Medición de la concentración inicial de las diluciones de As	58
<i>Figura 19.</i> Nanopartículas de Fe aplicadas en las soluciones de As	58
<i>Figura 20.</i> Nanopartículas de Mn aplicadas en las soluciones de As.....	59
<i>Figura 21.</i> Medición de la concentración de Fe en las diluciones de As	60
<i>Figura 22.</i> Medición de la concentración de Mn en las diluciones de As.....	60
<i>Figura 23.</i> Matriz de correlación.....	65
<i>Figura 24.</i> Matriz gráfica de correlación.....	65
<i>Figura 25.</i> Histograma de Concentración de arsénico.	67
<i>Figura 26.</i> Histograma de pH.....	68
<i>Figura 27.</i> Histograma de Temperatura	69
<i>Figura 28.</i> Diagrama de caja de la concentración de arsénico	70

Figura 29. Diagrama de caja de pH.....	70
Figura 30. Diagrama de caja de temperatura	71
Figura 31. Gráfico de dispersión de Concentración de arsénico vs Oeste	71
Figura 32. Gráfico de dispersión de Concentración de arsénico vs Sur.....	72
Figura 33. Gráfico de dispersión de pH vs Oeste.....	72
Figura 34. Gráfico de dispersión de pH vs Sur	72
Figura 35. Gráfico de dispersión de temperatura vs Oeste	73
Figura 36. Gráfico de dispersión de temperatura vs Sur	73
Figura 37. Variograma Omnidireccional - Concentración de arsénico.....	74
Figura 38. Variograma Omnidireccional – pH	74
Figura 39. Variograma Omnidireccional – Temperatura	75
Figura 40. Nube variográfica de arsénico	76
Figura 41. Nube variográfica de pH.....	76
Figura 42. Nube variográfica de Temperatura	76
Figura 43. Variograma ajustado-concentración arsénico.....	78
Figura 44. Variograma ajustado-pH.....	79
Figura 45. Variograma ajustado – Temperatura	79
Figura 46. Histograma de error de validación cruzada- Arsénico	81
Figura 47. Histograma de error de validación cruzada- pH.....	81
Figura 48. Histograma de error de validación cruzada- Temperatura	82
Figura 49. Histograma del error de verificación del modelo de As	85
Figura 50. Histograma del error de verificación del modelo pH	87
Figura 51. Histograma del error de verificación del modelo	88
Figura 52. Muestras vs Concentración (mg/l).....	100
Figura 53. Modelo de predicción de Arsénico ($\mu\text{g/l}$) utilizando IDW	123
Figura 54. Modelo de predicción de Arsénico (mg/l) utilizando IDW	124
Figura 55. Modelo geoestadístico para la variable pH.....	125
Figura 56. Modelo de error de predicción para la variable pH	126
Figura 57. Modelo geoestadístico para la variable Temperatura	127
Figura 58. Modelo de error de predicción para la variable Temperatura.....	128

RESUMEN

En este estudio se determinó las distribuciones espaciales de Arsénico, pH y temperatura de la laguna de Papallacta para generar una propuesta de remoción de Arsénico con nanopartículas. Se efectuó un muestreo en la Laguna Papallacta para conseguir muestras de agua con sus respectivas ubicaciones geográficas y parámetros “in situ”. En laboratorio se caracterizó las muestras de la Laguna Papallacta mostrando que no son aptas para consumo humano o uso doméstico. Para el proceso de remoción de arsénico se realizó un diseño experimental a nivel de laboratorio; en este, se crearon diluciones de Arsénico y se sintetizaron nanopartículas metálicas. Se aplicaron nanopartículas de Hierro y Manganeseo en las unidades experimentales obteniendo porcentajes de remoción de Arsénico 63.59 % y 67.56 % respectivamente. Además, se generó una base georreferenciada de los parámetros físicos–químicos de las muestras de la Laguna Papallacta; esta base, fue el insumo principal del software R. Este programa utilizó las variables Arsénico, pH y temperatura para ejecutar un estudio Geoestadístico compuesto de tres fases principales. La primera fase o análisis exploratorio de datos; obtuvo el resumen de los estadísticos principales, diagramas de caja y de dispersión de las variables en estudio. La segunda fase o análisis estructural; calculó los variogramas experimentales para ajustarlos a los variograma teóricos de las variables de estudio. La última fase de predicción; empleó un interpolador para realizar la predicción de las variables de estudio en zonas no muestreadas dando como resultado modelos predictivos de Arsénico, pH y temperatura de la Laguna.

PALABRAS CLAVE:

- **ARSÉNICO**
- **NANOPARTÍCULAS**
- **REMOCIÓN**
- **PREDICCIÓN**
- **GEOESTADÍSTICA**

ABSTRACT

In this study the spatial distributions of Arsenic, pH and temperature of the Papallacta lagoon were determined to generate a proposal for arsenic removal with nanoparticles. Sampling was carried out in the Papallacta Lagoon to obtain water samples with their respective geographical locations and “in situ” parameters. In the laboratory, samples from the Papallacta Lagoon were characterized, showing that they are not suitable for human consumption or domestic use. For the arsenic removal process an experimental design was carried out at the laboratory level; in this, arsenic dilutions were created and metal nanoparticles were synthesized. Iron and Manganese nanoparticles were applied in the experimental units obtaining 63.59% and 67.56% Arsenic removal percentages respectively. In addition, a database of the physical-chemical parameters of the samples of the Papallacta Lagoon was generated; this base was the main input of the R software. This program used the Arsenic, pH and temperature variables to execute a geostatistical study composed of three main phases. The first phase or exploratory data analysis; He obtained the summary of the main statistics, cash diagrams and dispersion of the variables under study. The second phase or structural analysis; He calculated the experimental variograms to fit the theoretical variograms of the study variables. The last prediction phase; He used an interpolator to predict the study variables in unsampled areas, resulting in arsenic, pH and temperature predictive models of the Lagoon.

KEYWORDS:

- **ARSENIC**
- **NANOPARTICLES**
- **REMOVAL**
- **PREDICTION**
- **GEOSTATISTICS**

CAPÍTULO I

ASPECTOS GENERALES

1.1. Antecedentes

El Arsénico se encuentra distribuido abundantemente en la naturaleza y puede encontrarse en el aire, agua y suelo pues este elemento puede liberarse al ambiente por algunos procesos agrícolas e industriales. Este elemento puede estar en dos estados orgánico e inorgánico, en estado inorgánico es más peligroso que en estado orgánico (Instituto Nacional del Cáncer, 2015).

Este elemento es uno de los más nocivos que se pueden encontrar, debido a lo cual la exposición de este a los humanos resulta peligroso. Los seres humanos pueden estar expuestos al Arsénico mediante tres vías principales: por inhalación de aire, por absorción dérmica, por ingestión de alimentos y agua. La principal vía de exposición al Arsénico es a través de alimentos y agua (Medina Pizzali, Robles, Mendoza, & Torres, 2018).

Existen varios reportes sobre exposición al Arsénico por agua de consumo humano, varios de estos casos podemos verlos en Argentina, Chile, México, El Salvador, Nicaragua, Perú, Bolivia, España, Tailandia, China; se debe resaltar que la Organización Mundial de Salud (OMS) categorizó al Arsénico como un elemento químico nocivo para la salud pública (FLUENCE, 2018).

Por ejemplo en la ciudad de Colima en México se efectuó un estudio de riesgos potenciales de salud por consumo de agua con Arsénico, en este estudio se evalúa los peligros futuros de salud

debido al consumo prolongado de agua con Arsénico empleando herramientas geoestadísticas del software ArcGIS. Además en este proyecto se presenta un modelo de ponderación del inverso de la distancia, para estimar la ruta de exposición de consumo en cada localidad (Mendoza, y otros, 2017).

Otro estudio se ejecutó en España en donde se estudió la presencia de As en las aguas subterráneas como un problema de salud pública. En esta investigación se usan diferentes técnicas geoestadísticas para generar el mejor mapa probabilístico sobre el exceso del límite permisible de Arsénico por la OMS en los manantiales de Ávila demostrando que el indicador Kriging es la mejor opción (Guardiola, Pardo, & Giménez, 2017).

También existen algunos estudios sobre el contenido de Arsénico en aguas geotérmicas, subterráneas, sedimentos de algunas regiones o provincias del Ecuador. Por ejemplo en la región andina Centro-Norte se encontró Arsénico, estos resultados muestran que el Arsénico total en aguas geotérmicas tiene un rango 2 $\mu\text{g/L}$ a 969 $\mu\text{g/L}$ (Cumbal, y otros, 2009).

En particular al estudiar la laguna de Papallacta, esta suministra la sexta parte de agua a la población de Quito y Papallacta; los habitantes de Papallacta que en su mayoría es una población totalmente rural dependen del agua y alimento de esta zona que debido al consumo cotidiano de agua con presencia de Arsénico se encuentran expuestos a un riesgo real de contaminación (EcoFondo Ecuador, 2015).

Otro caso de contaminación con Arsénico es el caso de las aguas naturales de la Laguna Papallacta, sitio donde ocurrió un derrame el 8 de abril del 2003 producido por la construcción del OCP el cual puso en peligro el agua de Quito. Este accidente se debió a una rotura del SOTE que

produjo un derrame de crudo en la reserva Cayambe Coca, la misma que afecto a la laguna de Papallacta cubriendo cerca de la mitad de su extensión (Weemaels, 2003).

Debido a este problema latente de contaminación en los años 2006-2009 se realizaron algunos proyectos; uno de estos trabajos fue realizado por el CEINCI (Centro de Investigaciones Científicas), hoy llamado CENCINAT (Centro de Nanociencia y Nanotecnología), proyecto en donde se encontró que las concentraciones de Arsénico en Laguna de Papallacta fueron entre 390 y 670 $\mu\text{g/L}$ y entre 39 a 10.560 $\mu\text{g/L}$ en las aguas termales y ríos (Oilwatch Latino América, 2006). Además en este proyecto se efectuó la remoción de Arsénico logrando remover más del 90% del metaloide absorbido con el método de sorbentes emergentes (Zuñiga Salazar, 2009).

Existen varias técnicas para remover Arsénico en aguas contaminadas; sin embargo la eficacia y costos de las mismas son muy variados. Estas tecnologías se han aplicado en varios países en donde se han presentado problemas de Arsénico en aguas. En busca de procesos económicamente amigables e innovadores se realizan nuevas investigaciones en donde se aplican nanopartículas metálicas (Cumbal, Delgado & Delgado, 2011).

Un estudio recientemente efectuado con nanopartículas fue en México en donde se empleó nanopartículas magnéticas de Cobre y Zinc sintetizadas para remover más del 50% de Arsénico (III y V) en muestras de agua del estado de Campeche (Morales, 2018).

Otra investigación aplicando nanopartículas fue realizada por la doctora Virginia Montero y el máster Allen Puente, docentes de la Escuela de Química del Tecnológico de Costa Rica (TEC), los cuales desarrollaron un dispositivo encargado de eliminar Arsénico del agua potable. Este estudio contó con muestras de agua de una zona afectada en donde fueron utilizadas nanopartículas

magnéticas de óxidos de Hierro inmovilizadas en un prototipo de laboratorio para remover Arsénico del agua apta para consumo humano (Jiménez, 2016).

Un nuevo proyecto en donde se empleó nanopartículas obtenidas de frutos nativos del Ecuador como el capulí fue “Síntesis de Nanopartículas de Hierro utilizando Extractos de Frutos Nativos de Ecuador, como Capulí (*Prunus serotina*) y Mortiño (*Vaccinium floribundum*)”. En esta investigación la autora detalla una síntesis ecológica para la producción de nanopartículas de Hierro de valor cero, manipulando como materia prima extractos de capulí y mortiño. El presente proyecto considerara el procedimiento realizado en el estudio antes mencionado para la obtención de nanopartículas (Murgueitio, Cumbal, Debut, & Landivar, 2016).

1.2.Planteamiento del problema

El proyecto tiene como objetivo determinar la distribución espacial de las concentraciones de Arsénico total en la laguna de Papallacta mediante el método probabilístico Kriging para generar una propuesta de remoción con nanopartículas. Este estudio usará nanopartículas para pruebas de remoción de Arsénico en aguas; además medirá su concentración inicial y final de Arsénico mediante el método de espectroscopia de absorción atómica (AA). La ejecución de este proyecto tendrá algunas fases:

La primera fase iniciará con un muestreo obteniendo 75 muestras de agua de la laguna Papallacta además se conseguirá la ubicación geográfica de las concentraciones de Arsénico por medio del GPS, conjuntamente se tomarán algunos parámetros “in situ” de las muestras de agua de la laguna.

La siguiente fase corresponde a laboratorio, en este proceso se efectuará la determinación de las concentraciones de Arsénico por espectroscopia y se sintetizará nanopartículas metálicas las cuales serán evaluadas para determinar su efectividad y cinética de remoción.

La última fase será de gabinete en donde se utilizará la información de concentración de Arsénico y las coordenadas geográficas de cada una de las muestras para crear una base de datos, la cual se manipulará como insumo principal en el programa R. El programa utilizará el script desarrollado por Leiva (2014) el cual arrojará parámetros estadísticos como media, moda, mediana, varianza, diagrama de caja, diagrama de dispersión, variogramas los cuales servirán para realizar un análisis adecuado generando como resultado un modelo predictivo espacial de concentración de Arsénico total de la Laguna Papallacta.

1.3 Justificación e importancia del problema

El proyecto de investigación es de importancia, debido a que según fuentes previas documentadas como (Cumbal, y otros, 2009) con su investigación del origen del Arsénico en las aguas y sedimentos del área del lago Papallacta en Ecuador. También el proyecto de (Zuñiga Salazar, 2009) acerca de síntesis de sorbentes híbridos para la remoción selectiva de Arsénico, con aplicación en la descontaminación de aguas superficiales. Asimismo una reciente investigación en esta misma zona por (González Narváez, 2018) acerca de la determinación del estado actual de contaminación de Papallacta por sondeo eléctrico vertical realizada advirtió la existencia de Arsénico en la zona de Papallacta, motivo por el cual este proyecto pretende actualizar, aportar con nuevos datos de concentraciones de Arsénico del agua de la Laguna. También este estudio propone utilizar una nueva tecnología verde de bajo costo, eficiente y amigable con la naturaleza.

Además cabe recalcar que con los antecedentes se tiene la necesidad de evaluar los riesgos potenciales en la salud que enfrenta la población de Papallacta ya que la misma podría estar consumiendo Arsénico por medio del agua de la laguna; igualmente se piensa realizar un diagnóstico de la laguna de Papallacta ya que se analizarán los parámetros físico- químicos de esta que indicaran los niveles de contaminación (González Narváez, 2018).

Conjuntamente, ante la responsabilidad de cumplir con el reglamento propuesto por la ONU “Objetivos del Desarrollo Sostenible” considerando el objetivo salud y bienestar es primordial acatar la Constitución de la República del Ecuador, 2008 que cuida y vela por el medio ambiente garantizando a la población un acceso equitativo, sano y de calidad al agua, razón por la que se plantea efectuar este estudio (Constitución del Ecuador, 2008).

En este contexto la nanotecnología es un nuevo método de remediación, económicamente factible, eficiente y amigable con el medio ambiente. Igualmente se ha verificado que las nanopartículas metálicas son muy eficaces para la transformación y la desintoxicación de una amplia variedad de contaminantes ambientales (Zhang, 2003).

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Determinar la distribución espacial de las concentraciones de Arsénico total en la laguna de Papallacta mediante el método probabilístico Kriging para generar una propuesta de remoción con nanopartículas.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Determinar el contenido de Arsénico total de 75 muestras de agua de la Laguna de Papallacta midiendo su concentración inicial, empleando el espectrómetro de absorción atómica.

- Caracterizar el agua de las muestras obtenidas de la Laguna de Papallacta evaluando los parámetros Físico-Químicos: pH, Temperatura, Turbidez, Sulfatos y Nitratos, mediante el empleo del medidor multiparamétrico.
- Sintetizar nanopartículas de Hierro y Manganeseo, con extractos de borrojó para la remoción de Arsénico mediante el método Bottom Up/ Química verde.
- Realizar un modelamiento Geoestadístico, a partir de los datos de concentraciones de arsénico inicial mediante las librerías del software libre R para generar un modelo predictivo espacial de concentración de Arsénico Total de la Laguna Papallacta.

1.5 Metas

- 75 muestras de agua de la laguna de Papallacta.
- Una base de datos de las muestras de agua de la laguna de Papallacta con el contenido total de Arsénico inicial.
- Una base de datos de la información geográfica y parámetros Físico-Químicos de las muestras de agua de la laguna de Papallacta.
- Un informe de resultados del porcentaje de remoción de Arsénico de las nanopartículas de Hierro y Manganeseo aplicadas.
- Un modelo de predicción espacial de concentraciones de Arsénico total de la laguna Papallacta.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Contaminación

2.1.1 Definición

Es la presencia o adición de sustancias, elementos dañinos al ambiente en cantidades tales que perturben la salud, bienestar del hombre o ecosistemas. Existen diferentes tipos de contaminación entre las cuales se puede mencionar la afectación a las diferentes matrices como son: agua, aire, suelo; estas matrices se encuentran muy ligadas entre sí lo cual permite fácil que el contaminante migre de un lado a otro (Bermúdez, 2010).

2.1.2 Contaminación atmosférica

Se dice que existe contaminación atmosférica cuando en la atmósfera se encuentra presente sustancias de origen natural o artificial y en una proporción que genere riesgo, alteraciones o preocupaciones para la salud de personas, animales y plantas. Una de las principales formas de contaminación en el aire es a través de procesos industriales que intervienen combustión, estos procesos a su vez generan gases contaminantes los cuales pueden ser: óxido de nitrógeno, dióxido de carbono, monóxido de carbono. Esta contaminación puede tener diferentes escales de afectación

dependiendo la amplitud y la magnitud del impacto de esta ya que puede ser de escala local, regional y global (Semmartin, 2013).

2.1.3 Contaminación del suelo

El suelo es el medio físico sobre el cual se desarrolla la vida siendo la fuente principal de materias primas y procesos de fabricación que efectúa el hombre como: industria, infraestructura, agricultura. Este recurso desde siglos antiguos ha sido utilizado, aprovechado por el ser humano para conseguir mejores condiciones de vida debido a lo cual este fue explotado sin ningún control ni cuidado acarreando grandes problemas de contaminación en años venideros. La contaminación del suelo es un problema grave el cual sucede con la entrada de sustancias extrañas de cualquier origen y en cantidades que genere daños o efectos nocivos para los seres que habitan en esta matriz (Silva Arroyave & Correa Restrepo, 2009).

2.1.4 Contaminación del agua

El agua es un recurso no renovable, indispensable para los seres vivos y el desarrollo de la vida pues este provee a todo el planeta en un 90%. Este medio es una matriz esencial por lo cual debe suministrarse con cuidado sin embargo en los últimos años debido al rápido crecimiento económico y humano se efectuaron un mal manejo y explotación logrando hoy en día la contaminación de este recurso (Korbut, 2015).

Se define como contaminación del agua a la introducción de elementos, sustancias, compuestos de origen natural o antrópico que en cierta cantidad cause cambios en las características del agua

generando efectos perjudiciales, nocivos o daños a los seres que o viven en este medio (Orta Arrazcaeta, 2002).

2.1.4.1 Parámetros físico-químicos del Agua

Los parámetros físico-químicos proporcionan una información profunda acerca de la composición física y química del agua dejando de lado la información del dominio en la vida acuática. Estas variables físico-químicas pueden ser valoradas en forma individual o grupal y son utilizadas para evaluar la calidad de agua de los recursos hídricos (Samboni Ruiz, Carvajal Escobar, & Escobar, 2007).

- **Arsénico**

El Arsénico es uno de los elementos más abundante en la Tierra. Se encuentra en cantidades trazas de agua, aire, suelo y roca. El Arsénico se puede presentar en algunos estados de valencia siendo el arsenito y arseniato los principales elementos en el ambiente. Además puede decirse que las concentraciones naturales de Arsénico en agua puede variar entre 1 y 10 $\mu\text{g/L}$. El Arsénico en los alimentos se encuentra en forma orgánica e inorgánica (Galetovic Carabantes & de Fernicola, 2003).

- **Nitratos**

Los nitratos son iones compuestos por un átomo de nitrógeno con una carga negativa (NO_3^-) y por tres átomos de oxígeno. No posee sabor ni color, están presentes en la naturaleza disueltos en el agua. Los nitratos aparecen en aguas subterráneas principalmente debido a la presencia de sistemas sépticos, almacenamiento de estiércol, fertilizantes; los nitratos son los contaminantes más frecuentes de aguas subterráneas en áreas rurales (Lenntech, 2019). La presencia de nitratos en aguas subterráneas o superficiales se debe al ciclo natural del nitrógeno, sin embargo existen zonas que poseen grandes cantidades de nitratos lo cual es debido al uso excesivo abonos nitrogenados y a su posterior arrastre por la lluvia o riesgos. Hoy en día la Comunidad Europea tiene fijado como nivel máximo permitido de nitratos en aguas potables 50 mg/l, siendo 25 mg/l el valor guía (Palomares, 2013).

- **pH**

Este parámetro se determina como el logaritmo inverso de la concentración de hidrogeniones. El pH es un factor muy importante, se encuentra dentro del rango de 0 y 14. Cuando el pH de una sustancia es mayor de 7 es una sustancia básica, caso contrario si el pH de una sustancia es menor de 7 es una sustancia ácida (Lenntech, 2019). Si existe una gran concentración de los iones de hidrógeno en el agua, el valor de su pH será menor. El pH ideal para el desarrollo de la vida es muy estrecho y crítico, la mayoría de animales acuáticos viven dentro de un rango de 6.5 a 8.0, fuera de este intervalo los animales sufren estrés fisiológico y se les hace muy difícil la reproducción (CORTOLIMA, 2007).

- **Sulfatos**

Los sulfatos pertenecen al rango de sales de moderadamente solubles a muy solubles. Los sulfatos pueden originarse cuando las aguas cruzan terrenos con alto contenido de yeso o cuando existe contaminación con aguas residuales industriales. Este parámetro en bajas cantidades no afecta seriamente al agua pero en grandes cantidades pueden ocasionar trastornos gastrointestinales en los niños. El reglamento técnico-sanitaria española establece como valor instructor de calidad de agua en sulfatos 250 mg/l y como límite máximo tolerable 400 mg/l (ambientum, 2019).

- **Temperatura**

La temperatura está definida por la suma de energía calórica (ondas del infrarrojo que es atraída por el agua, iones o moléculas en una sustancia o combinación de sustancias en un momento determinado. La solubilidad del oxígeno en el agua modifica la temperatura, por lo tanto a mayor temperatura menor solubilidad y recíprocamente. Las descargas de aguas a temperaturas elevadas pueden ocasionar daños a la fauna y flora de las aguas receptoras pues están interfieren en la reproducción de especies, proliferación de bacterias (CORTOLIMA, 2008).

- **Turbidez**

La turbiedad establece el grado de opacidad ocasionado en el agua por la materia particulada en suspensión. Esto se debe a que los materiales que provocan la turbiedad son los responsables del color, la concentración de las sustancias definen la transparencia del agua ya que estas obstaculizan el paso de la luz a través de las mismas. Además se puede determinar a la turbidez como una expresión de la propiedad óptica que origina que la luz se disgregue y absorba en vez de transmitirse a través de la muestra, incurre en el flujo de energía y la productividad dentro del ecosistema (CORTOLIMA, 2008).

2.2 Arsénico

2.2.1. Origen y Abundancia

El Arsénico es un semi-metal o metaloide que posee propiedades de metales y no metales , generalmente es clasificado como un metal el cual se encuentra presente abundantemente en la naturaleza en diferentes compuestos arsénicos teniendo una cantidad de 5×10^{-4} % de la superficie terrestre, estas especies arsénicas pueden en estado líquido o sólido. Este elemento es el resultado de procesos geológicos, actividades biológicas, emisiones volcánicas y procesos antropogénicos los cuales ayudan a distribuir a este metal en diferentes cantidades en el planeta (Bundschuh, Pérez Carrera, & Litter, 2008).

El arsénico presente en la naturaleza es variable ya que este puede juntarse con otras partículas que al reaccionar con moléculas de otros elementos logran modificar su estado de oxidación, este proceso ayuda a que el arsénico se encuentre disponible para estar localizado en diferentes espacios (Bundschuh, Pérez Carrera, & Litter, 2008). Este elemento es extremadamente peligroso para los seres vivos en altas concentraciones pero también en bajas concentraciones durante un largo tiempo de exposición puede ser letal ya que el mismo causa efectos crónicos para la salud (Lillo, 2008).

Existen dos tipos de compuestos con arsénico que son muy tóxicos para los seres humanos, estos son los inorgánicos y los orgánicos. Los compuestos orgánicos se producen cuando el hidrógeno y el carbono se combinan, estos son menos tóxicos que los inorgánicos y se pueden encontrar en algunos alimentos (Aragonés Sanz, y otros, 2001). Los compuestos inorgánicos son el resultado del arsénico combinado con otros elementos (oxígeno, cloro y azufre), estos elementos son los más

tóxicos y podemos hallarlos con frecuencia en el medio ambiente en el suelo, rocas y el agua ; se presentan en especies como pentóxido de arsénico y trióxido de arsénico (Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades, 2007).

2.2.2 Propiedades

El arsénico es un elemento traza que muestra características de los metales y no metales, posee un peso atómico de 74.922 con una representación simbólica igual a As; este elemento es el tercero de la familia VA, su número atómico es 33 y muestra estados de oxidación -3,+3,+5 siendo el arsénico pentavalente (V) el más utilizado con fines comerciales (Sandoval Pinto, 2011).

Este compuesto es soluble en agua y puede encontrarse en la naturaleza en tres estados alotrópicos (amarillo, gris, negro); este elemento depende de la fuente en que se encuentre para tener una forma química orgánica o inorgánica, el arsénico inorgánico vendrá de fuentes de origen mineral o antrópico y el arsénico orgánicos se generara por la naturaleza (Castelo Granizo, 2015).

2.2.3 Toxicidad

El arsénico puede presentarse en varias formas de minerales en el ambiente, estas especies arsenicales pueden ser más o menos tóxicas dependiendo de su estructura química dividiéndolas en compuestos orgánicos e inorgánicos. Los compuestos orgánicos son especies menos tóxicas que las especies inorgánicas y pueden encontrarse en alimentos, poseen un medio principal de propagación el cual es la ingestión (Rangel Montoya, Montañez Hernández, Luévanos Escareño, & Balagurusamy, 2015).

Los compuestos inorgánicos son especies más peligrosas que los compuestos orgánicos y se encuentran presentes en todas las aguas naturales pues poseen algunos estados de oxidación (+3,+5, 0,-3) que les permiten estar en este medio. Estas especies pueden tener una baja o alta toxicidad dependiendo de varios factores como: forma, estado de oxidación, solubilidad en otros medios, estructura (Rangel Montoya, Montañez Hernández, Luévanos Escareño, & Balagurusamy, 2015).

El arsénico (III) es más peligroso que el arsénico (V), debido a que el mismo tiene la posibilidad de metilarse siendo tóxicos a otros grupos principales de cualquier ser vivo interrumpiendo funcionamientos vitales; también cabe mencionar que el arsénico (V) aunque es menos tóxico que el arsénico (III) sigue siendo peligroso para los seres vivos pues el mismo sustituye el fosfato, bloqueando enzimas o metabolismos causando daños en el mismo (Castro de Esparza, Presencia de arsénico en el agua de bebida en América Latina y su efecto en la salud pública, 2006).

El arsénico inorgánico entra en el organismo del ser humano por medio de las vías respiratorias viaja a través de la sangre, los tejidos y finalmente es expulsado del cuerpo por medio de la orina cuando la concentración de arsénico es baja; por otro lado si la concentración de arsénico es alta se acumula en las uñas y el cabello de la persona. Los efectos que pueden causar la ingestión de arsénico variarán de una persona a otra ya que dependerán del metabolismo, alimentación, estado de ánimo, genética que posea; los seres humanos más propensos a acumular arsénico son niños, mujeres embarazadas y personas con deficiencias en su nutrición (Cabrera, Pinos, & Pulla, 2013).

2.2.4 Métodos de determinación de Arsénico

2.2.4.1 Método de Espectrofotometría de absorción atómica con generación de hidruros

El método de espectrometría de absorción atómica con generación de hidruros es una técnica manipulada para la determinación de especiación de Arsénico utilizando el proceso HPLC- HG-AAS, esta metodología es aplicada para reducir las muestras de agua con diferentes especies arsenicales a Arsénico (III) por reacción al Yoduro de potasio en un medio ácido (HCl). Posteriormente, estas especies de arsénico (III) al encontrarse con el compuesto de NaBH_4 se transforman en arsina; este hidruro de arsénico viaja con un flujo de argón hacia a una celda de absorción de cuarzo localizada en la parte óptima del espectro de absorción que ayuda a transmutar en hidruros volátiles (Blanes, Garro, Giménez, & Hunzicker, 2006).

Estos compuestos pequeños y gaseosos al no poseer la capacidad de emitir una señal de absorción atómica calientan la celda del muestreo para disociar átomos libres en gaseosos, estos hidruros en estado gaseoso al calentar la celda genera que la absorción atómica aumente o disminuya conforme los hidruros gaseosos se vayan creando y saliendo de la celda que los creó. Cuando se posee un nivel máximo de absorción o picos cromatográficos como señal analítica debe medirse la misma, para conocer la concentración de arsénico de las muestras en estudio; esta técnica de espectrometría es una metodología aplicadas a varios metales como: Bi, Ge, As, Se, Sn, Te, Hg (Secretaría de Salud México, 1995).

Materiales y Métodos

Materiales

Los equipos utilizados para emplear esta técnica es un espectrómetro de absorción atómica con un sistema automático HG-AAS equipado con una lámpara de Arsénico; además se emplearon lámparas de descarga sin electrodos las cuales son la base para la radiación aplicada en la determinación de la concentración de Arsénico (Smichowski & Valiente, 2007) .

Métodos

Se emplearan 1000 mg/L de soluciones estándar de Arsénico trivalente y pentavalente para formar la solución madre, esta solución será diluida a diferentes concentraciones para formar los estándares de arsénico que ocupara el equipo en el establecimiento de las concentraciones arsenicales (Smichowski & Valiente, 2007).

Posteriormente, se prepara el agente reductor utilizando soluciones de Borohidruro de sodio al 3 % e hidróxido de sodio al 1% en agua destilada y el agente transportador empleara ácido clorhídrico al 10% en agua destilada; estos compuestos serán empleadas para la generación y dispersión de hidruros, transporte y fragmentación de hidruros en sustancias más pequeñas en el espectro de absorción atómica (Smichowski & Valiente, 2007) .

2.2.4.2 Método de Azul de Molibdeno

Existen algunos métodos para la determinación de Arsénico, entre estos procesos podemos mencionar la técnica Azul de Molibdeno basada en el uso del espectrofotómetro aplicando el

reactivo arsénico molíbdico de color azul formado entre el arseniato y molibdato de amonio que reacciona al sulfato de hidracina (reductor). Además esta metodología emplea para la absorción el reactivo arsina creada con ácido clorhídrico (HCl) y bromato de potasio, la arsina ayuda a la oxidación del arsénico (III) a arsénico (V) reduciendo daños y toxicidad en el ambiente (Fiestas Eca & Millones Ñiquen, 2019).

Esta técnica es una manera efectiva, accesible, sensible, rápida, sencilla y precisa para la determinación de concentraciones de diferentes rangos de arsénico orgánico presentes en agua; apoya a la lectura de varios elementos metálicos presentes en diferentes matrices como agua, suelo, aire (Fiestas Eca & Millones Ñiquen, 2019).

Materiales y Métodos

Materiales

Los equipos utilizados para esta técnica es un espectrómetro de haz simple UV/Visible con celdas de 1 cm de camino óptico, los espectros de absorción eran fosfo-molibdato y arseno-molibdato creados con reactivos colorantes en diferentes concentraciones (Sarmiento, Peralta, & Rosa, 2015).

Métodos

Para la aplicación de este proceso se agregó dos gotas de metil anaranjado en la solución y se equilibró la misma con una dilución de hidróxido de amonio obteniendo un indicador amarillo.

Seguidamente, se añade gota a gota ácido clorhídrico hasta lograr una tonalidad roja obteniendo 10 ml de este reactivo diluido y 1 ml de bromato de potasio. Posteriormente, se calienta a una temperatura de 50 °C los reactivos metil naranja y arsénico luego se agrega 5 ml de molibdato de amonio para emparejar la solución. Por último, se incrementan 2 ml de sulfato de hidracina y se mantiene a fuego durante 10 minutos; se espera que llegue a temperatura ambiente para lograr llevar el volumen del líquido al volumen del material de vidrio que se quiere (Ramírez González, Jiménez Prieto, Esperanza Pérez, Ribalta Quesada, & Rodríguez Rivero, 2017).

2.2.4.3 Método de Gutzeit

El método de Gutzeit es un proceso clásico para la determinación de concentraciones de arsénico creado hace más de 100 años, esta metodología tiene como base la conversión del arsénico inorgánico presente en el agua en un compuesto llamado Arsina (AsH_3) por medio del uso de un elemento reductor. Para poder saber el valor de concentración de arsénico se emplea la curva de calibración la cual manipula estándares de concentraciones conocidas para saber la concentración inicial de la muestra; este método arroja valores de concentración poco confiables con una alta dispersión (Martínez & Gasquez, 2005)

2.2.4.4 Método dietilditiocarbamato de plata

El método dietilditiocarbamato de plata (DEDTCP) es una técnica espectrofotométrica empleada por la normativa para la determinación de arsénico en agua de uso humano. Este proceso inicia manipulando el zinc (reductor) en medio ácido para transformar el arsénico orgánico de las muestras de agua a arsina, este compuesto AsH_3 continua con un viaje por un depurador lleno de

una disolución de acetato de plomo y luego pasa a través de un tubo absorbente de solución de Dietilditiocarbamato de plata con Piridina (Pérez Moreno, Prieto García, Barrado Esteban, Rojas Hernández , & Méndez Marzo, 2002)

La arsina durante la reacción con la sal de plata logra formar un reactivo soluble de color rojo con una absorbancia ideal (520-540nm) para ser aplica en el establecimiento de la concentración de arsénico en el espectrofotómetro, el contenido de arsénico de la muestra es directamente proporcional a la intensidad del color del reactivo soluble rojo (Montesdeoca Rivera & Zamora Loor, 2017).

Materiales y Métodos

Materiales

Para determinar las concentraciones de arsénico en las muestras de agua con arsénico se empleó un espectrofotómetro UV-Visible; también se manejó un generador de vidrio compuesto por un tubo de absorción en forma de U y un matraz Erlenmeyer para la producción de arsina (Giménez, Benítez, Osicka, & Castro, 2000).

Métodos

Para la aplicación de esta metodología se manejó 200 ml Piridina en 1 gramo de un compuesto de plata para crear dietilditiocarbamato de plata, seguidamente se usan 40 ml de hidróxido de sodio al 0.5 N con 1 g de Clorhidrato de Efedrina y se elimina la Efedrina con 200 ml de cloroformo para tener como compuesto final Efedrina/ Cloroformo; esta solución con el dietilditiocarbamato de plata se manejan conjuntamente para espectroscopia. Además se generan algunas soluciones entre

ellas podemos mencionar: Solución madre de arsénico ($1g/L$), solución de yoduro de potasio (15%), compuesto de sulfato cúprico al 0.5%, compuesto cloruro de estaño (II) y compuesto de acetato de plomo al 10% (Giménez, Benítez, Osicka, & Castro, 2000).

2.3 Nanotecnología

2.3.1 Definición

La nanotecnología viene del vocablo griego nanno cuyo significado es enano, este término fue acuñado por Richard Feynman y Taniguchi Norio en una conferencia realizada en 1959. Esta ciencia controla la materia que se encuentra a escala atómica, subatómica y molecular mostrando de dimensión el rango 1-100 nanómetros característica con la cual puede aportar a solucionar problemas futuros de la sociedad (Mejias Sánchez, Cabrera Cruz, Toledo Fernández, & Duany Machado, 2009).

La palabra nanotecnología es usada frecuentemente para detallar el estudio, diseño, síntesis, manipulación y aplicación de ciencias o tecnologías que trabajan en un rango de 1-100 nanómetros pudiendo utilizarse estructuras moleculares y atómicas que ayuden a la fabricación de materiales y máquinas (Záyago Lau & Foladori, 2010) .

La nanotecnología es el diseño, caracterización y la práctica de estructuras, unidades y sistemas complejos vigilados por su forma, tamaño y propiedades de la materia a escala nanométrica. La definición "nanotecnología" comprende un enorme campo de tecnologías, herramientas y técnicas potenciales debido a lo cual varios investigadores encuentran más adecuado llamarlas nanotecnologías; existen algunas disciplinas que fusionan con la nanotecnología en ellas se puede

mencionar la ingeniería, química, biología, medicina, etc. (Mendoza Uribe & Rodríguez López, 2006).

El concepto acuñado por el profesor Norio Taniguchi define a la Nanotecnología como una ciencia que disgrega o separa, consolida y distorsiona a los elementos desde sus estructuras básicas (átomos y moléculas) con el fin de fabricar o generar nuevos productos, materiales o tecnologías que ayuden a remediar las dificultades del ser humano y ambiente (Alonso Gutiérrez, López Meléndez, Rodríguez Liñan, & Lázaro López, 2015).

2.3.2 Nanotecnología Verde

Es una técnica innovadora que considera como la “química verde”, una nueva forma de crear nanopartículas que utiliza plantas para este propósito. Esta metodología recientemente ha empezado a tomar fuerza debido a los científicos han empezado a buscar cómo reducir el uso de ingredientes tóxicos en la producción de nanopartículas (Dominguez, 2015).

La nanotecnología verde es un nuevo enfoque de la nanotecnología tradicional , ya que esta enfatiza la creación de nuevos materiales aplicando metodologías que respeten el medio ambiente, cuiden y preserven la vida de los seres vivos logrando un camino sostenible para el desarrollo de la vida. La Química verde intenta solucionar los problemas de síntesis de materiales nano cristalinos que posee la nanotecnología tradicional evitando el consumo exagerado de energía y reactivos los mismos que al ser desechados al ambiente causan impactos negativos (Sifontes, 2014).

2.3.3 Nanopartículas

2.3.3.1 Definición

Material natural, secundario o fabricado que contenga partículas, sueltas o formando un agregado o aglomerado y en el que el 50% o más de las partículas en la granulometría numérica presente una o más dimensiones externas en el intervalo de tamaños comprendido entre 1 nm y 100 nm (Comisión Europea, 2012).

Las nanopartículas están formadas por materia especial diferente del macromundo que poseen un tamaño menor a cien nanómetros y al menos una dimensión; además presentan propiedades especiales propias de su tamaño que las hacen importantes y únicas para lograr mejorar o remediar materiales, sistemas o tecnologías que manipula el hombre (Calvo Gómez, 2006).

2.3.3.2 Nanopartículas Metálicas

Las nanopartículas metálicas son entidades de tamaño entre 1-100 nanómetros elaboradas de metales nobles (plata, platino, paladio, oro) cuya morfología generalmente puede ser esférica, barras, discos y prismas. Estas nanopartículas últimamente han sido estudiadas con mayor énfasis debido a las propiedades físicas, químicas, biológicas, magnéticas, catalíticas, eléctricas y ópticas que poseen; estas particularidades son características útiles y favorables que ayudan a resolver problemas de diferentes ámbitos (Castillo Rodríguez, 2012)

2.3.3.3 Aplicaciones de las nanopartículas metálicas

En estos últimos años han existido varios estudios acerca de materia química de tamaño nanométrico (0-100 nanómetros) ya que las mismas han mostrado poseer propiedades físicas especiales propias de su composición que han logrado abrir una enorme puerta hacia nuevas opciones para resolver ciertos problemas o necesidades futuras que podría tener la sociedad (Hernando Grande, 2007).

También debe recordarse que existen varios elementos a escala nanométrica entre los cuales podemos mencionar a las nanopartículas orgánicas, estas están conformadas por nanopartículas metálicas las cuales presentan un tamaño nanométrico con una composición de óxidos metálicos o componentes de origen metálico que muestra características exclusivas biológicas y físicas que las hacen únicas (Monge, 2009). Estas propiedades propias de la dimensión de las nanopartículas han logrado llamar mucho la atención de varios investigadores los cuales han iniciado varias pruebas para conocer, emplear y desarrollar nuevas aplicaciones para este material nanométrico en diferentes áreas como las mostradas a continuación:

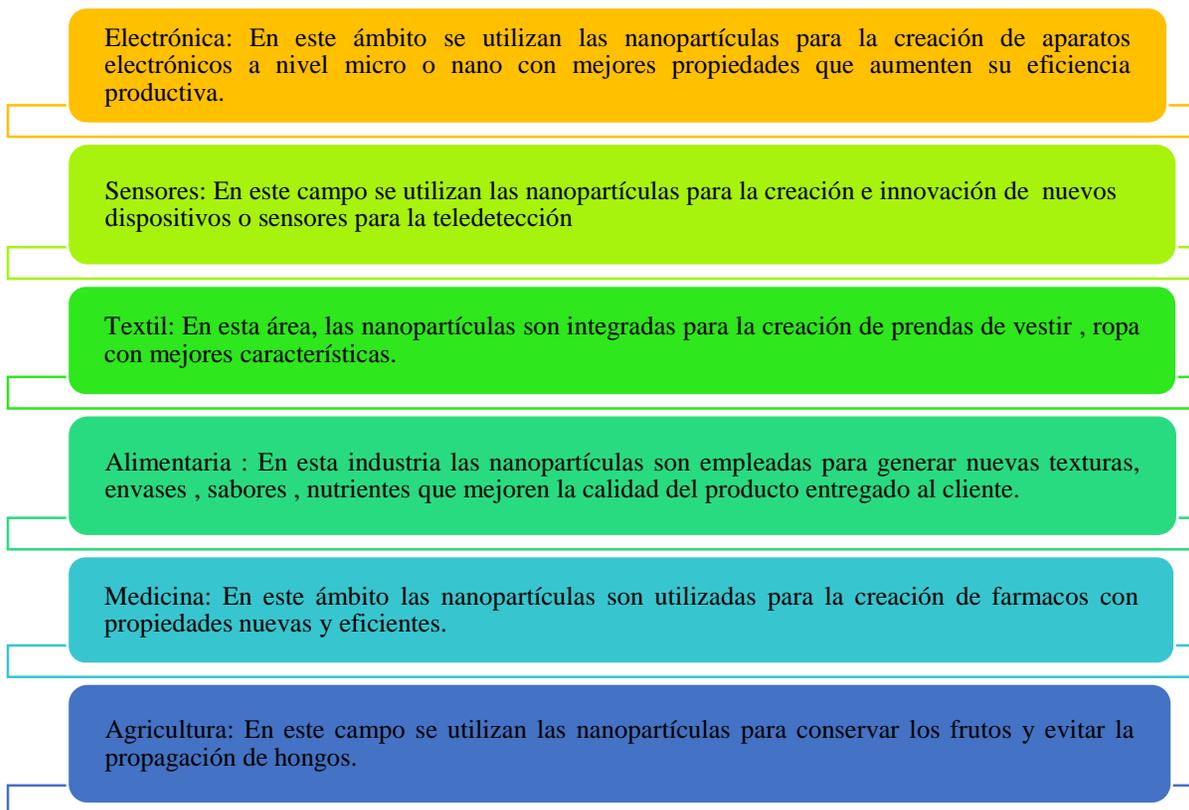


Figura 1. Aplicaciones de las nanopartículas metálicas

Fuente: (Ávalos, Haza, & Morales, 2013)

2.4 Conceptos Geográficos

2.4.1 Sistemas de Información Geográficos (SIG)

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son programas informáticos que obtienen, almacenan, procesan, analizan y manipulan varios tipos de datos que poseen posicionamiento espacial (ubicación geográfica). Estos datos son utilizados frecuentemente para generar mapas o coberturas las mismas que al combinarse ayudan a caracterizar o saber el comportamiento de las diferentes variables que intervienen en este proceso (Niño, 2008). Recientemente los

investigadores han empezado a utilizar los sistemas geográficos como herramientas para la caracterización, predicción, estimación o creación de modelos que muestren la distribución geográfica de una variable (Niño, 2008).

2.4.2 Aplicaciones de los Sistemas de Información Geográficos (SIG)

El desarrollo socio-económico de una ciudad está ligado fuertemente con la administración, gestión y planificación de su territorio. Para poder gestionar y ordenar el territorio es necesario conocer las características, cualidades de sus elementos creando gran cantidad de información la cual es importante para la toma de decisiones futuras que son almacenadas en Sistemas de Información Geográfica (Ager Ingenieros, 2003). Los beneficios que brindan los SIG son innumerables, estos sistemas se fundamentan en la integración o recopilación de información que será desarrollada y empleada en diferentes áreas como se muestra a continuación:



Figura 2. Aplicaciones de los SIG

Fuente: (Ager Ingenieros, 2003)

Los usuarios al manipular, caracterizar y modelar ciertas variables por medio de los sistemas de información geográfica han logrado obtener resultados no muy confiables debido a lo cual es importante el manejo de un programa estadístico que completamente estos sistemas. Además, este análisis estadístico empleado debe ser confiable y significativo debido a lo cual se deben utilizar herramientas estadísticas proporcionadas por una ciencia exacta como es la Geoestadística; esta ciencia ayuda a la investigación de la distribución de variables espaciales con relación a su comportamiento espacial (Moral García, 2004).

2.5 Interpolación Espacial

Método gráfico y numérico que ayuda estimar datos desconocidos por medio de datos ya conocidos. También se puede decir que esta técnica predice valores según los datos muestra, como: elevaciones, precipitaciones, concentraciones químicas y niveles de ruido. Además, la interpolación muestra la distribución y correlación espacial que poseen los objetos (Martínez, 2013). Las herramientas de interpolación de superficie crean una superficie continua (o predicción) a partir de valores de punto de muestra. Las herramientas de interpolación, por lo general, se dividen en métodos determinísticos y de estadísticas geográficas (ESRI, 2019).

La interpolación espacial es una técnica que busca estimar o predecir el valor y comportamiento de una variable espacial en una región a partir de valores conocidos (muestra) para generar valores desconocidos utilizando técnicas de interpolación que pueden ser simples o Geoestadísticas (Cely Pulido, Siabato Vaca, Sánchez Ipia, & Rangel Sotter, 2002).

2.5.1. Métodos de Interpolación Determinísticos

Los métodos determinísticos generan superficies utilizando como base los puntos medidos del estudio que posean distancias semejantes, estos modelos se dividen en dos conjuntos: locales y globales. Las técnicas globales utilizan todos los puntos muestreados del estudio para predecir el valor del nuevo punto y las técnicas locales usan los puntos cercanos (vecindad) para predecir el valor del punto que se desea (ESRI, 2019).

2.5.1.1 Método de Interpolación IDW

El método de la distancia inversa ponderada (IDW) se fundamenta en la continuidad espacial sustentando que los valores de puntos conocidos de una región serán similares a los valores de puntos vecinos de la misma no obstante también expresa que los valores de los puntos serán diferentes conforme los puntos estén más alejados unos de otros. Este método ha sido muy utilizado para la representación de variables espaciales, predicción de variables espaciales a futuro, mapas de pendientes, isócronas (Cebrián Abellán & García González, 2006).

El método determinístico IDW (Inverso de la distancia ponderada) coloca pesos a los datos conocidos del estudio que van a ser manipulados para obtener el valor del dato desconocido que se quiere encontrar utilizando como base la función inversa distancia-peso la establece que a mayor distancia menor peso y viceversa (Álvarez Osorio, Cárdenas Contreras, & Matiz León, 2011).

2.5.2 Métodos Geoestadísticos

2.5.2.1 Definición

La Geoestadística es 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, tales como: ley de metales, porosidades, concentraciones de un contaminante (Díaz Viera, 2002).

Los métodos de estadísticas geográficas están asentados en modelos estadísticos que incluyen la autocorrelación (la relación estadística entre los puntos medidos). Debido a esto, las técnicas de

estadística geográfica no sólo muestra la capacidad de originar una superficie de predicción, sino que también suministran alguna medida de certeza o exactitud de las predicciones (ESRI, 2019).

En algunos estudios mencionan que para realizar un estudio Geoestadístico se efectúan algunos pasos entre ellos se puede mencionar puntualmente dos. El primer paso es el análisis estructural, en este proceso se efectúa un estudio de correspondencia entre los puntos muestreados de la variable con su ubicación geográfica. El segundo paso utiliza un interpolador para poder realizar la estimación de valores de la variable de estudio en zonas no muestreadas o desconocidas regularmente se usa la técnica Kriging (interpolador); este predictor asigna pesos a los puntos muestreados según la correlación que existe entre ellos. A continuación se detalla de manera más detenida los procesos que se efectúan en estas dos pasos o fases básicas (Giraldo Henao, 2007).

2.5.3 Análisis Exploratorio de Datos

2.5.3.1 Introducción

La primera fase de este estudio Geográfico es el Análisis Exploratorio de datos (EDA), proceso en donde se ejecuta un estudio descriptivo de los datos de la variable de estudio analizando los estadísticos básicos (medidas de localización) y representaciones gráficas diferentes que ayudarán a localizar datos anómalos y los patrones del comportamiento regular de la variable (Chica Olmo, 2003).

Además cabe mencionar que esta fase posee un gran peso en el estudio Geoestadístico pues al efectuar la prueba cualitativa y examinar parámetros como gráficos, forma de distribución, medidas descriptivas se establecerán el cumplimiento o no de las hipótesis o requisitos mínimos para la aplicación de la Geoestadística (Leiva, 2014).

2.5.3.2 Gráficos Exploratorios

Existe gran cantidad de métodos gráficos ocupados para el Análisis exploratorio de datos (EDA) en los últimos años. Estas representaciones gráficas son consideradas métodos gráficos efectivos cuando al ser evaluadas y valoradas poseen capacidad de análisis y características de distribución espacial (alisado y asperezas). Una de las características de distribución espacial es la propiedad de alisado; cualidad global cuyo campo temporal expresa medidas de tendencia central de la variable (media, moda, mediana) y dispersión de observaciones georreferenciadas de la variable con correlación espacial. Otra propiedad son las asperezas de distribución; cualidad local que se refiere a todos los datos ubicados a una distancia de un elemento con propiedades de alisado, un ejemplo de esta característica son las observaciones anómalas. Las representaciones gráficas se dividen en alisados (diagramas de tallo y hoja e histogramas) y asperezas (gráficos de dispersión y diagrama de caja). Una nueva manera de clasificación para procesos de Análisis exploratorio de datos es la consideración de dos aspectos importantes como: los procesos de representación de distribución espacial y específicos de visualización de la variable de estudio con unificación espacial (global, local y multivalente) (Chasco Yrigoyen, 2003).

2.5.4 Análisis Estructural de Datos

2.5.4.1 Introducción

El Análisis estructural o variográfico, es la fase en donde se examina la correspondencia que concurre entre la variable con su posición geográfica y la continuidad espacial de la misma por

medio de la función de correlación espacial creada en esta etapa. Además, en este paso se generan gráficos de dispersión de la variable con respecto a sus coordenadas, semivariogramas experimentales que serán ajustados a modelos teóricos pues estos no poseen una función matemática que los defina ; los semivariogramas muestran la variabilidad espacial que gobierna la variable de análisis (Guerra, Gómez, González, & Zambrano, 2006).

2.5.4.2 Variograma Experimental

El semivariograma o variograma es considerado como la base de la Geoestadística, función intrínseca aleatoria que muestra la porción promedio espacial cuadrática de los valores numéricos de la variable a una longitud denominada h (Jiménez Espinosa, 2003). La función $2\gamma(h)$ es considerada como variograma, la cual aplicando la definición matemática de la varianza en función de un valor deseado de una variable aleatoria, obtenemos:

$$2\gamma(h) = V(Z(x+h) - Z(x)) \quad \text{Ecuación (1)}$$

$$= E \left((Z(x+h) - Z(x))^2 \right) - \underbrace{E(Z(x+h) - Z(x))^2}_0 \quad \text{Ecuación (2)}$$

$$\text{Para funciones estacionarias } E(Z(x+h) - Z(x)) = 0 \quad \text{Ecuación (3)}$$

$$= E \left((Z(x+h) - Z(x))^2 \right) - (E(Z(x+h) - Z(x))^2) \quad \text{Ecuación (4)}$$

$$= E \left((Z(x+h) - Z(x))^2 \right) \quad \text{Ecuación (5)}$$

La función variograma o semivariograma cuando es dividida a la mitad representa la función semivarianza $\bar{\gamma}(h)$, caracterizada por mantener la correspondencia espacial de la variable. La

función semivarianza es calculada a través del semivariograma experimental del estudio utilizando la técnica de momentos para su obtención por medio

$$\bar{\gamma}(h) = \frac{\sum(Z(x+h)-Z(x))^2}{2n} \quad \text{Ecuación (6)}$$

Siendo $Z(x)$ el valor de la variable en una posición x , $Z(x + h)$ será el valor de la variable de otra muestra cercana a x y separada a una distancia h , n es el número de parejas alejadas por la misma distancia h . La función semivarianza comúnmente es determinada varias veces con diferentes distancias debido a que la misma es aplicada generalmente en estudios de muestreo irregular con varios intervalos de distancia. El semivariograma experimental utiliza como base una distancia promedio entre dos puntos lo cuales son pertenecientes a un intervalo con una distancia h definida, el número de parejas n no es igual para cada intervalo. La función variograma muestra que los puntos que se encuentren próximos entre sí tendrán mayor aproximación o correlación espacial mientras que los puntos más alejados poseerán una gran diferencia en sus valores (Giraldo Henao, 2007).

2.5.4.2.1 Partes de un semivariograma

- **Meseta o sill**

Se considera como el valor máximo constante entre cierta longitud denominada h del variograma; este valor puede nombrarse también como la varianza a priori de la función semivariograma que posee procesos estacionarios de orden dos y covarianza que aparece cuando el valor h tiende a infinito (Hernández Palma & Corvalán Vera, 2000).

- **Efecto Pepita**

Se representa como una discontinuidad en el origen de la función semivariograma denotada como C_0 , muestra la carencia de dependencia espacial del variograma alcanzando la meseta instantáneamente. El efecto pepita es un caso poco usual atribuido a la presencia de posibles errores de medición resultante de distancias erróneas propuestas que pueden ser demasiado grandes o pequeñas para el intervalo de muestreo necesario, produciendo que la continuidad espacial de la variable sea mínima (Johnston, Ver Hoef, Krivoruchko, & Lucas, 2003).

- **Rango**

Se entiende como rango a la distancia donde dos puntos muestreados logran su independencia espacial generando un dominio influyente. Cuando el valor del rango sea vaya minimizando se aproximará más el modelo de independencia puesto que mientras más lejos estén un punto de otro menor correlación tendrá; se denomina rango efectivo cuando una distancia logra el 95% de la meseta de la función semivariograma (Cardona Ríos, 2015).

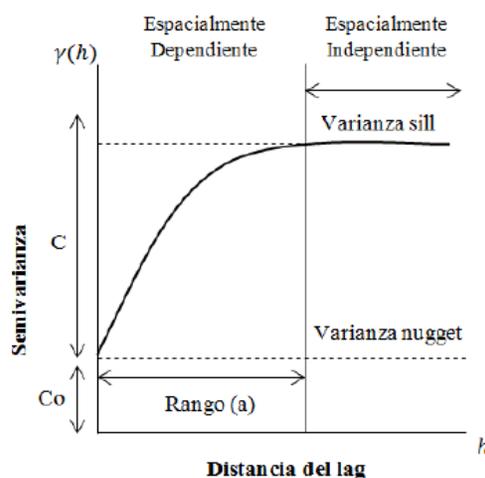


Figura 3. Parámetros del variograma
Fuente: (Guajala Agila & Zambrano Solís, 2016)

2.5.4.3 Nube Variográfica

La nube variográfica expresa el valor de las diferencias al cuadrado de todas las observaciones de una variable en una dirección establecida presentando una longitud base h . Esta función ayuda con la localización de valores extraños de la variable cuando se calcula el variograma experimental, su representación matemática es:

$$\frac{1}{2} [z(x_i - x_j)]^2 \quad \text{Ecuación (7)}$$

Donde z representa la variable regionalizada, x_i y x_j son puntos observados de alguna variable o propiedad (Alfaro Sironvalle, 2007).

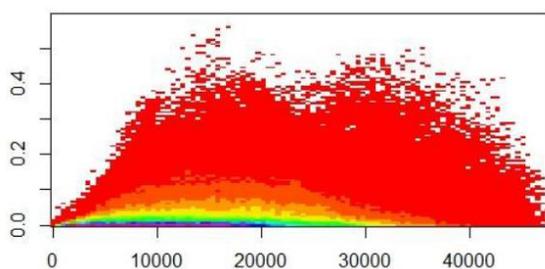


Figura 4. Nube Variográfica
Fuente: (Leiva, 2014)

2.5.4.4 Variogramas Teóricos

Existen algunos variogramas experimentales de variables de investigación que son ajustados por procesos matemáticos a variogramas teóricos, comúnmente se utiliza la metodología de mínimos cuadrados ponderados para efectuar este ajuste. Los modelos teóricos son usados frecuentemente como ejemplos para los variogramas experimentales debido a que estos poseen una expresión matemática, propiedades y requerimientos que los modelos experimentales carecen haciéndolos imposible a la hora de la aplicación de un interpolador , interrumpiendo el proceso de

estudio. Hay varios modelos teóricos para aplicar que aseguran una varianza positiva; entre los modelos más conocidos podemos mencionar a las funciones esférico, gaussiano, exponencial, cubico, efecto pepita entre otros (Sommer C, Fernández L, Rivas S, & Gutiérrez R, 2000).

2.5.4.4.1 Modelo Cúbico

El modelo cúbico muestra una representación parabólica en la parte del origen del semivariograma al igual que el modelo Gaussiano también posee un alcance o rango (a) de valor finito, este modelo o variograma puede representarse matemáticamente con la siguiente formula:

$$\gamma(h) = \begin{cases} C \left(7 \left(\frac{h}{a} \right)^2 - 8.75 \left(\frac{h}{a} \right)^3 + 3.5 \left(\frac{h}{a} \right)^5 - 0.75 \left(\frac{h}{a} \right)^7 \right) & \text{Si } h \leq a \\ C & \text{Si } h > a \end{cases} \quad \text{Ecuación (8)}$$

Siendo $\gamma(h)$ el variograma Cúbico, a es el rango, y C es la meseta o sill para un intervalo de distancia h (Alfaro Sironvalle, 2007).

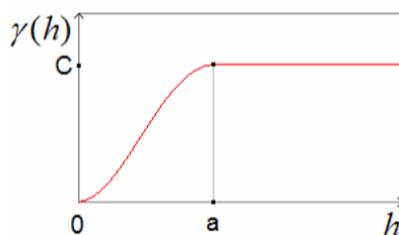


Figura 5. Modelo Cúbico
Fuente: (Alfaro Sironvalle, 2007)

2.5.4.4.2 Modelo Esférico

El modelo teórico esférico muestra un aumento paulatino en el valor de la semivarianza y un decrecimiento gradual en la correlación espacial a cierta distancia h en donde su valor llega a 0 teniendo un valor de meseta máximo cuando $h=a$; este modelo es uno de los más aplicados en los

estudios de algunas variables geoespaciales desde una a tres dimensiones, su representación matemática es la siguiente:

$$\gamma(h) = \begin{cases} C \left\{ \frac{3h}{2a} - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right\} & \text{para } h \leq a \\ C & \text{para } h > a \end{cases} \quad \text{Ecuación (9)}$$

Siendo $\gamma(h)$ el semivariograma esférico, a es el rango y c es la meseta o sill para un intervalo de distancia h (Pacheco Niveló, 2014).

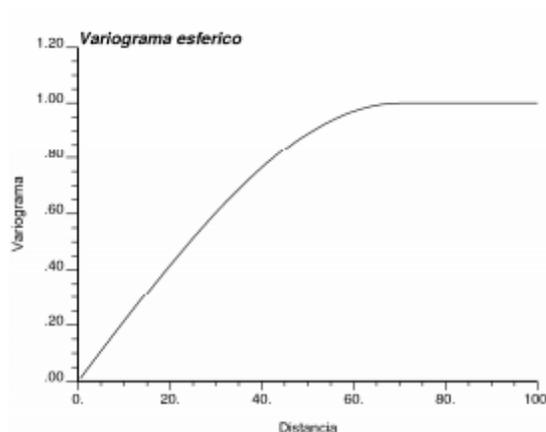


Figura 6. Modelo esférico
Fuente: (Emery, 2013)

2.5.4.4.3 Modelo Exponencial

El modelo exponencial se caracteriza por tener una meseta indefinida o infinita que tiende a 0 cuando tiene un rango finito además posee un valor máximo de distancia igual al triple de su rango (3a) cuando la función variograma logra un 95% de su meseta y su definición matemática es:

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{h}{a}\right) \right\} & \text{para } 0 < h \\ 0 & \text{para } h = 0 \end{cases} \quad \text{Ecuación (10)}$$

Siendo $\gamma(h)$ el semivariograma exponencial, a es el rango, c_0 es varianza de pepita y c es la meseta o sill para un intervalo de distancia h (Oliver & Webster, 2015).

2.5.4.4 Modelo Gaussiano

Este semivariograma presenta una forma parabólica al empezar desde el origen alcanzando un 95% de la meseta como el modelo exponencial; la dependencia espacial en este modelo va decreciendo conforme su distancia h tiende al infinito, matemáticamente puede ser expresada con la siguiente formula:

$$\gamma(h) = C_0 + C \left(1 - \exp\left(-\frac{h^2}{a^2}\right) \right) \quad \text{Ecuación (11)}$$

En donde $\gamma(h)$ representa el semivariograma Gaussiano, la meseta o sill ($C_0 + C$), distancia h y rango a (Guajala Agila & Zambrano Solís, 2016).

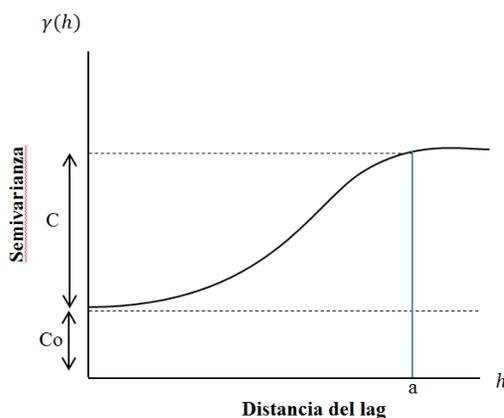


Figura 7. Modelo Gaussiano
Fuente: (Guajala Agila & Zambrano Solís, 2016)

2.5.4.4.5 Modelo de Independencia (Pepita Puro)

El modelo Pepito puro expresa la ausencia de dependencia espacial de las muestras de la variable en estudio cuyo comportamiento es aleatorio sin autocorrelación entre las observaciones investigadas (Guatibonza, Álvarez Herrera, & Sanabria, 2009). Comúnmente este modelo es añadido a otro modelo para la obtención de un modelo anidado, su expresión matemática es:

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 & \text{para } h > 0 \\ 0 & \text{para } h = 0 \end{cases}, \text{ donde } C_0 > 0 \quad \text{Ecuación (12)}$$

Siendo $\gamma(h)$ el modelo de independencia, c_0 es varianza de pepita para un intervalo de distancia h (Pazmiño Cuenca, 2010).

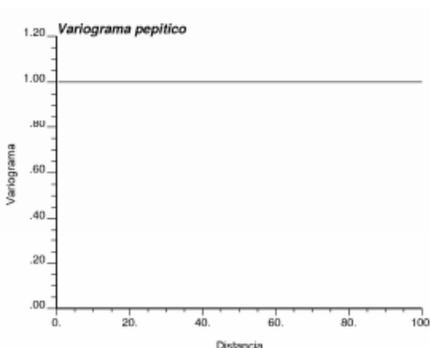


Figura 8. Modelo Pepita Puro

Fuente: (Emery, 2013)

2.5.4.4.6 Modelo Lineal

Este semivariograma muestra un comportamiento proporcional ya que la misma aumenta cuando el valor de la variable en estudio se encuentra a distancias grandes además pertenece a proceso estacionario con una varianza cuyo incremento es indeterminado, su fórmula matemática es:

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C * h & \text{para } h > 0 \\ 0 & \text{para } h = 0 \end{cases} \quad \text{Ecuación (13)}$$

Siendo $\gamma(h)$ el semivariograma lineal, c_0 es varianza de pepita y c es la meseta o sill para un intervalo de distancia h (Ginzo Villamayor, 2011).

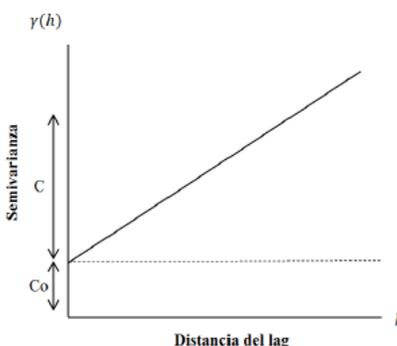


Figura 9. Modelo Lineal

Fuente: (Guajala Agila & Zambrano Solís, 2016)

2.5.4.4.7 Modelo Potencia

El modelo potencia es un tipo de semivariograma que no posee rango ni meseta definida ya que las mismas no conservan una forma concreta por estar en constante crecimiento siendo indefinidas; este modelo presenta un exponente θ cuyo intervalo oscila entre 0-2 , tiene una expresión matemática definida así:

$$\gamma(h) = \omega |h|^\theta \quad \text{Ecuación (14)}$$

En donde $\gamma(h)$ es el variograma potencia, pendiente ω , θ el exponente y h la distancia (Emery, 2013).

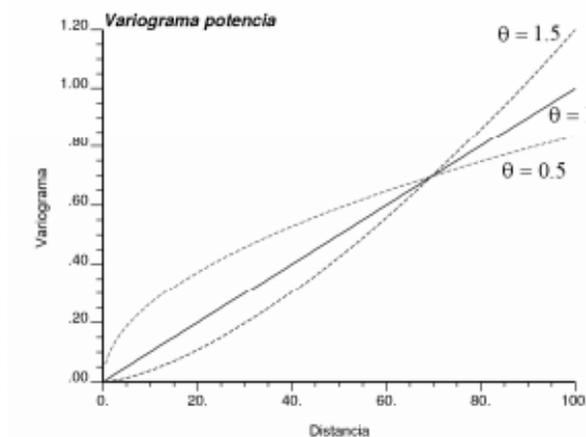


Figura 10. Modelo Potencia

Fuente: (Emery, 2013)

2.5.4.4.8 Modelo J-Bessel

El modelo J-Bessel representa una serie de sistemas de funciones determinadas que nacen en el origen, presenta un rango muy amplio que abarca el campo numérico entre el intervalo $[-\infty, +\infty]$ ideal para examinar funciones que muestran raíces en intervalos irregulares y posee una correlación exponencial lo cual le ayuda a ser un variograma más flexible para una aplicación general (Arias García & González Barbosa, 2016).

2.5.4.4.9 Modelo Anidado

Un variograma anidado es el resultado de quiebres de pendiente de la función modelada que contiene variaciones en la relación espacial de la variable teniendo como base una distancia. Este modelo anidado también representa la combinación de varias estructuras elementales que mantienen su continuidad espacial, su expresión matemática es:

$$\gamma(h) = \gamma_1(h) + \gamma_2(h) + \dots + \gamma_n(h) \quad \text{Ecuación (15)}$$

En donde $\gamma(h)$ es un variograma anidado, $\gamma_1(h)$ y $\gamma_2(h)$ son variogramas elementales (Lange Balboa, 2012).

2.5.5 Predicción

2.5.5.1 Introducción

En la etapa de Predicción Espacial se efectúan procesos de estimación de la variable en puntos donde se desconozca su valor sobre un mallado, también se calcula el respectivo error de predicción de estos puntos teniendo como insumo básico el semivariograma el cual muestra la función correlación espacial con los puntos muestreados (Moral García, 2004).

2.5.5.2 Método de Interpolación Kriging

Kriging es un conjunto de pasos intensivos del procesador. La velocidad al efectuar esta herramienta dependerá de la cantidad de puntos en el dataset de entrada y del tamaño de la ventana de búsqueda; los valores altos indican que es necesario más datos. El kriging universal reconoce que existe un elemento estructural presente y que la tendencia local varía de una localización a otra (ESRI, 2019).

2.5.5.2.1 Kriging Ordinario

Es un predictor insesgado espacial basado en la correlación espacial de la propiedad. Además es método de predicción que genera modelos continuos en base a datos discretos los cuales son estacionarios sin tendencia y suponen una media desconocida pero de valor constante. El Kriging Ordinario manipula los datos para eliminar la tendencia y proveer medidas estadísticas o medidas de error (Delgado & Martínez, 2015).

2.5.5.2.2 Kriging Universal

El Kriging universal es interpolador que crea mapas de contornos tomando como base puntos conocidos ubicados en una malla irregular con una tendencia evidente, asume una covarianza conocida para expresar una correlación de puntos vecinos (Warnes, 1986). Además podemos decir que el Kriging Universal es un predictor local aplicado a los datos para minimizar el error de estimación de los puntos a predecirse, identifica de manera cuantitativa y cualitativa los datos estimando la semi-varianzas y semivariogramas obtenidos para ser utilizados en la interpolación (Burgess & Webster, 1980).

2.5.6 Validación del Modelo

2.5.6.1 Introducción

Esta fase se ejecutada la predicción de los valores de la variable en lugares desconocidos y la validación de dichos puntos para lo se efectúa la eliminación de los datos obtenidos del semivariograma y se estima los valores a partir del semivariograma ajustado obteniendo así los valores predicción de los puntos nuevos y sus respectivos de errores de predicción (Guerra, Gómez, González, & Zambrano, 2006).

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

Este estudio está compuesto por dos fases, una fase ambiental la cual se efectuó en campo combinándola con laboratorio y una fase geográfica la misma que se realizó también en campo fusionándola con gabinete. En seguida, se detallan los procedimientos y metodologías aplicadas para la ejecución de esta investigación.

3.1 Descripción del área de estudio

La laguna Papallacta se encuentra localizada en la Parroquia Papallacta perteneciente al Cantón Quijos de la Provincia Napo. Se encuentra localizada en la vía Quito Papallacta-Baeza, dos kilómetros antes de llegar a la población de la Parroquia Papallacta y dos horas al este de la ciudad de Quito ; su ubicación geográfica es 00°22'10" latitud (sur) y 78°10'06" longitud (oeste) (Galarza Álvarez, 2014) (ver figura 11). Este cuerpo de agua está ubicado entre los parques Nacionales Cayambe-Coca y Antisana, posee una temperatura mayor a 4 °C calentándose constantemente en la mañana para enfriarse en la noche. Esta Laguna es el resultado de mezclas periódicas de agua que dan como resultado una estratificación termal con diversas profundidades (Molina Santos, 2013).

Además, esta laguna nace en la cordillera y posee características únicas, extraordinarias en flora y fauna que la hacen poseedora de un paisaje excepcional con múltiples atractivos turísticos. Actualmente, las aguas de la laguna Papallacta se encuentran forzadas debido al proyecto Papallacta de la Empresa Municipal de Agua Potable de Quito, que canaliza su caudal y sus

múltiples afluentes para abastecer a toda la población Quiteña de agua (Sandoval Rivas & Andrade Hurtado, 2012). Esta laguna posee una extensión de 324000 m² con una temperatura promedio entre 9.8 °C hasta 22 °C, está situada a una altura de 3180 m.s.n.m. y presenta una precipitación anual 1525 milímetros. Las aguas de esta laguna provienen principalmente de los páramos del valle Tambo y presentan colores intensos, oscuros que reflejan su profundidad (Molina Santos, 2013).

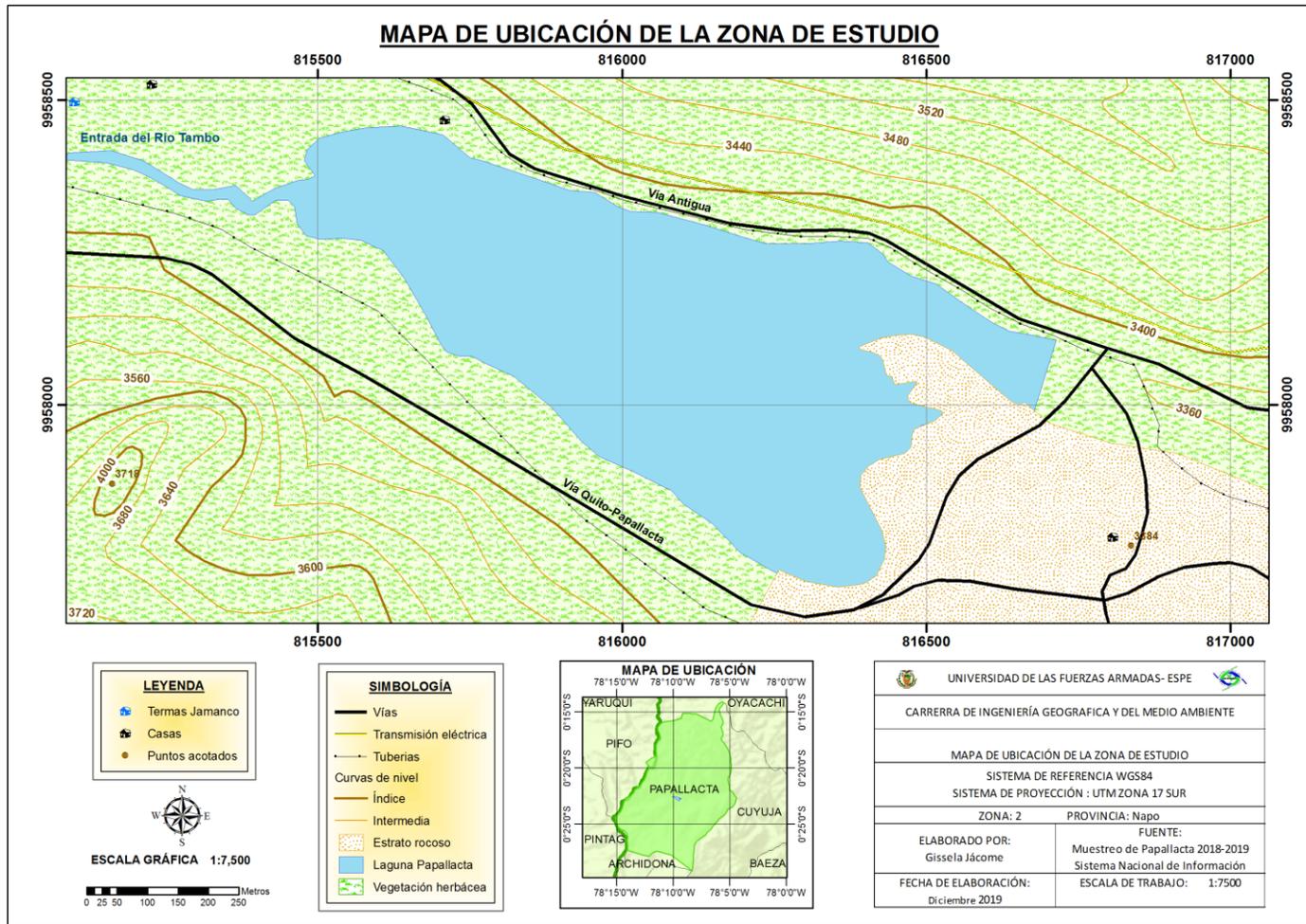


Figura 11. Mapa de ubicación de la zona de estudio

3.2 Recopilación de datos

Muestreo

3.2.1 Recolección de las muestras

Para el desarrollo de este estudio se utilizaron como insumo base las muestras de agua de la Laguna Papallacta, estas muestras fueron tomadas en campo en diferentes fechas siendo el primer muestreo el 21 de septiembre del 2018 en la periferia de la Laguna Papallacta, el segundo muestreo fue hecho en la parte interna de la Laguna de Papallacta el 28 de septiembre del 2018 y el último muestreo fue el 19 de enero del 2019 en la parte interna de la Laguna (ver figura 12).

En esta investigación se utilizó la ayuda del GPS Mobile Mapper Field Spectra 20 para los muestreos efectuados en las campañas anteriormente mencionadas, determinando la ubicación geográfica de 75 muestras de agua recolectadas en todas las salidas de campo; estas muestras de agua fueron recogidas a una distancia similar una de otra, a una profundidad entre 2m -15m mediante un equipo para muestreo de agua (batómetro) (INEN, 2014).

Estas muestras fueron recolectadas en botellas de plástico de 500 ml seguidamente fueron etiquetadas, almacenadas en un cooler de espuma flex y finalmente fueron transportadas al Centro de Nanociencia y Nanotecnología (CENCINAT) ubicada en la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE”, se aplicó la norma técnica ecuatoriana para calidad del agua, muestreo, manejo y conservación de muestras (NTE INEN 2169:2013) .

También, se aplicó la técnica de muestreo probabilístico aleatorio simple para que todas las muestras seleccionadas al azar tengan la misma oportunidad de ser escogidas; demostrando que

todas tienen la misma oportunidad de ser elegidas, además estas muestras deben representar todas las características o propiedades del conjunto del cual van a ser extraídas es decir deberán ser representativas (Peliza Ancallay, 2010).

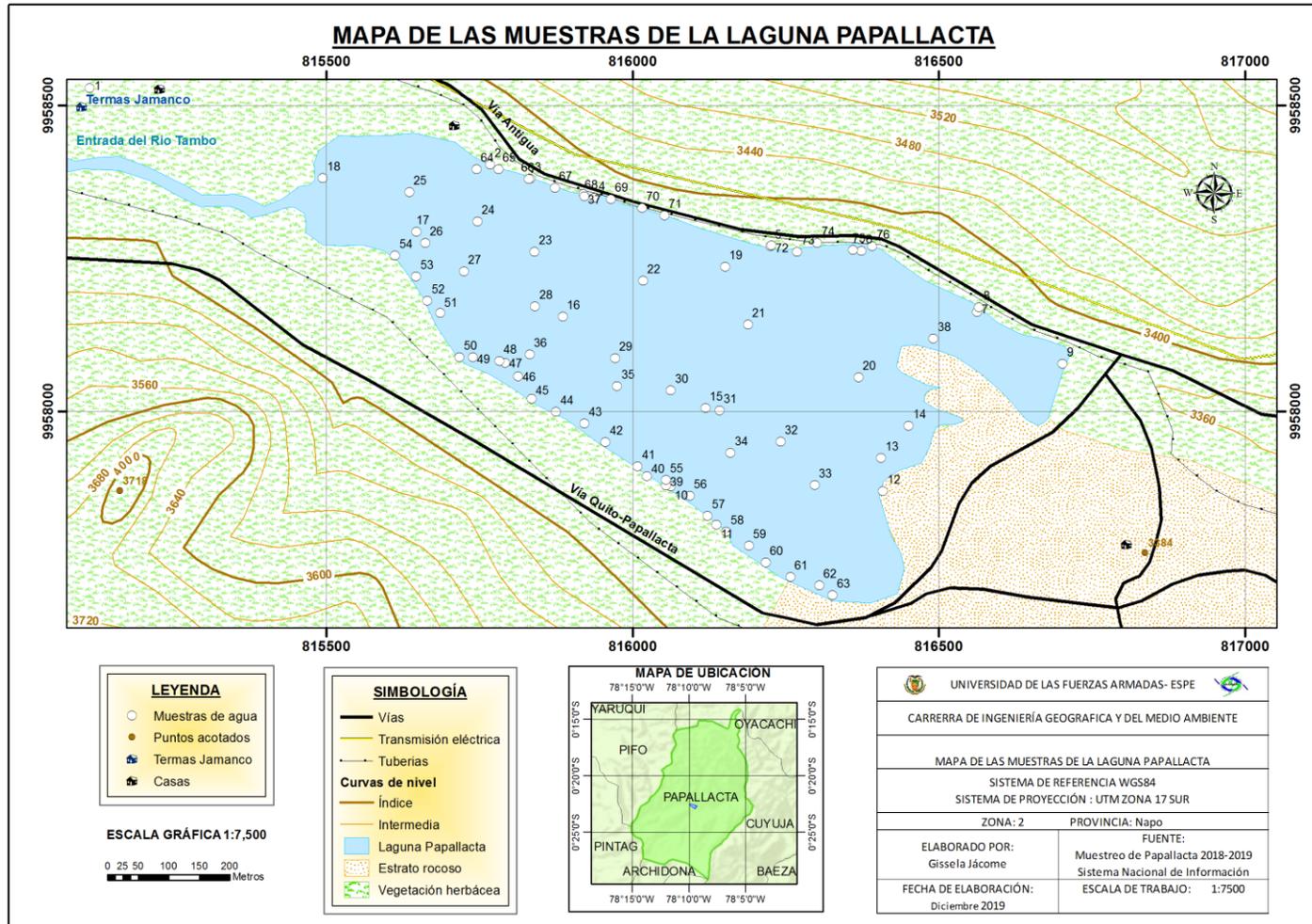


Figura 12. Mapa de ubicación de los puntos muestreados en la Laguna Papallacta

Fase Ambiental

3.3 Medición de los parámetros físico- químicos

En las salidas de campo efectuadas también se realizó a la par la recolección de varios datos físico-químicos de las muestras de agua, algunas de las variables analizadas de las muestras (in situ) fueron: temperatura, potencial de hidrógeno (pH).

3.3.1 Temperatura

En la determinación de la temperatura en campo se utilizó el equipo multiparamétrico HQ 30 d. Este equipo se aplicará directamente en el cuerpo de agua que se desee saber la temperatura, el resultado será instantáneo en la pantalla del equipo con un valor con una o dos cifras decimales. El establecimiento de este parámetro se lo realiza aplicando la metodología N° Método 2550 (2-61 y 2-62) descrita en el Manual de Métodos Estándar para la examinación de agua y aguas residuales (APHA, 1992).

3.3.2 Potencial de hidrógeno (pH)

El establecimiento del potencial de hidrógeno (pH) en campo se utilizó el equipo multiparamétrico HQ 30 d previsto de una sonda. Este equipo antes de la salida a campo fue calibrado en el laboratorio mediante los buffer con pH 4, 7, 9. El establecimiento de este parámetro se lo realiza aplicando la metodología Electrométrico 4500- H^+ B descrita en el Manual de Métodos Estándar para la examinación de agua y aguas residuales (APHA, 1992).

3.4 Parámetros de análisis en laboratorio

3.4.1 Sulfatos

La determinación de este parámetro empezó con la refrigeración de las muestras durante 24 horas en el congelador, posteriormente estas muestras fueron estabilizadas a temperatura ambiente para proceder a sus lecturas de contenido de sulfatos. Seguidamente, se colocó en un vaso de precipitación 50 ml de la muestra, se adicionó 2.5 ml de solución acondicionadora y se mezcló bien; esta nueva solución se le agregó una cucharita de cristales de cloruro de bario y se agita nuevamente.

Finalmente, con esta nueva solución se determinó el contenido de sulfatos empleando procesos experimentales del espectrofotómetro con lámpara UV/Visible (Hach modelo Specord S600) a 420 nm; para este proceso se empleó la metodología $4500 SO_4^{2-}$ E descrita en el Manual de Métodos Estándar para la examinación de agua y aguas residuales (APHA, 1992).

3.4.2 Nitratos

El establecimiento de este parámetro se inició con la refrigeración de las muestras durante 24 horas en el congelador, posteriormente estas muestras fueron estabilizadas a temperatura ambiente para a ser filtradas mediante el uso de una jeringa y un filtro de jeringa (0.45 μ m) para eliminar cualquier rastro de sedimentos si existiera en las mismas. Seguidamente, se colocó en un vaso de precipitación 50 ml de la muestra filtrada, se adicionó 1 ml de ácido clorhídrico y se mezcló bien.

Finalmente, con esta nueva solución se determinó el contenido de nitratos empleando procesos experimentales del espectrofotómetro con lámpara UV/Visible (Hach modelo Specord S600) a una longitud de onda entre 220 nm y 275 nm; para este proceso se empleó la metodología 4500 NO_3^- B descrita en el Manual de Métodos Estándar para la examinación de agua y aguas residuales (APHA, 1992).

3.4.3 Turbidez

La determinación de este parámetro emprendió con la refrigeración de las muestras durante 24 horas en el congelador, posteriormente estas muestras fueron estabilizadas a temperatura ambiente para proceder a sus lecturas de turbidez. Para determinar la turbidez de las muestras de agua de la Laguna Papallacta se utilizó un turbidímetro aplicando el método nefelométrico 2130 B descrita en el Manual de Métodos Estándar para la examinación de agua y aguas residuales (APHA, 1992).

3.4.4 Arsénico

Las muestras de agua de la Laguna Papallacta fueron filtradas mediante el uso de una jeringa y un filtro de jeringa (0.45 μm) para eliminar cualquier rastro de sedimentos si existiera en las mismas. Las muestras filtradas son tratadas para que puedan establecerse su concentración de arsénico, de esta manera se extrajo 1 ml de la muestra de agua de la laguna luego se añadió 1 ml de ácido clorhídrico concentrado y 1 ml de la solución compuesta por yoduro de potasio (5%) más ácido ascórbico (5%) se esperó que estas sustancias reaccionen durante el tiempo de 45 minutos para últimamente añadir 7 ml de agua destilada.

Finalmente, se determinó las concentraciones de arsénico de las muestras tratadas mediante procesos experimentales del espectrómetro de absorción atómica (EAA) Perkin Elmer AAnalyst 800 aplicando su sistema de inyección FIAS; para este proceso se ejecutó la metodología 3500 B arsénico sección 3114 descrita en el Manual de Métodos Estándar para la examinación de agua y aguas residuales (APHA, 1992) (ver Figura 13).

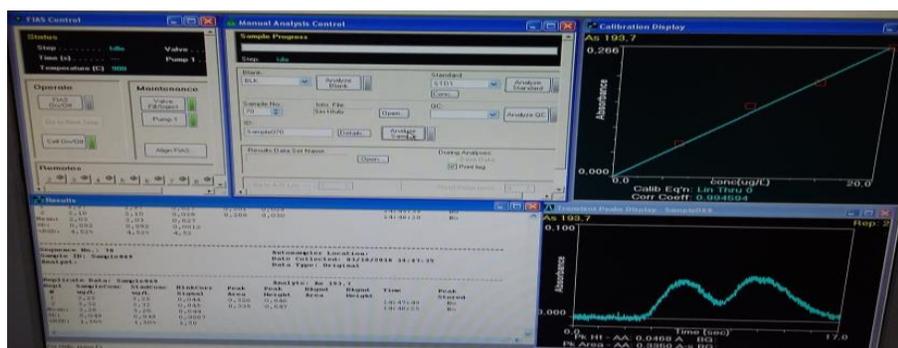


Figura 13. Lecturas de arsénico de las muestras de la Laguna Papallacta

3.5 Preparación de extracto de borjój

En el proceso de preparación de las nanopartículas metálicas se utilizó como agente reductor el extracto de borjój; esta fruta fue escogida debido a su bajo costo, gran masa (250-1000 gramos), facilidad de adquirirla en cualquier lugar y la compatibilidad que posee con el metal utilizado para crear las nanopartículas. La metodología usada como modelo para preparar el extracto de borjój fue de los doctores Murgueitio, Cumbal, Debut y Landivar (2016) ; este protocolo tuvo algunas variaciones entre la más importante podemos destacar el uso de otra fruta nativa. Para iniciar este proceso se lavó la fruta varias veces con agua potable y agua destilada, seguidamente se colocó el borjój en una balanza obteniendo un peso de 850.84 g (Murgueitio, Cumbal, Debut, & Landivar, 2016).

Dicho peso sirvió para realizar una solución con relación 1:1 (borojó: etanol), esta mezcla fue puesta en una licuadora para ser procesada. Posteriormente se usó dos matraces (2000 ml) para colocar la mezcla obtenida, estos matraces fueron colocados en el agitador orbital para agitación continua durante 72 horas (Murgueitio Herrera, 2018). Después, los extractos de borojó de los matraces fue filtrado algunas veces por tamices y colocados en tubos Falcon (50 ml) para ser centrifugados durante 15-20 minutos; se filtró nuevamente manejando jeringas con sus propios filtros primero se empleó los filtros de $0.45\ \mu\text{m}$ y finalmente $0.22\ \mu\text{m}$, se almaceno estos extractos en tubos Falcon (50 ml) para finalmente ser refrigerados (ver figura 14).



Figura 14. Borojó licuado, cernido y filtrado

3.6 Síntesis de nanopartículas

3.6.1 Síntesis de nanopartículas de Hierro

En el desarrollo de la síntesis de nanopartículas de Hierro se aplicó el protocolo de Murgueitio (2018) ; se prepararon soluciones de cloruro férrico 1M e hidróxido de sodio 2M .Para preparar el cloruro férrico se pesó 27.03 g de cloruro de hierro (III) hexahidratado diluido en 1000 ml de agua destilada hervida también se preparó la solución de hidróxido de sodio pesando 160 g de Hidróxido de sodio aforado a 500 ml con agua destilada.

Al extracto de borojó se le añadió gota a gota la solución de hidróxido de sodio 2M mezclando constantemente y midiendo con el equipo multiparamétrico HQ 30 d hasta alcanzar un pH entre 9-10. A continuación, se añade gota a gota el cloruro de hierro al extracto de borojó

cambiado de pH mientras se agita continuamente la solución; la relación volumen de esta solución será 1:1 (cloruro férrico: extracto de borjón cambiado el pH) (Murgueitio Herrera, 2018). Seguidamente, esta solución es filtrada mediante papel filtro y manejando jeringas con sus propios filtros primero se empleó los filtros de $0.45\ \mu\text{m}$ y finalmente $0.22\ \mu\text{m}$, esta nueva solución filtrada de color negro fue aplicada a las muestras experimentales con arsénico (ver figura 15).



Figura 15. Formación y filtración de Np de hierro

3.6.2 Síntesis de nanopartículas de Manganeso

Para el desenvolvimiento de la síntesis de nanopartículas de Manganeso se aplicó el protocolo de Murgueitio (2018) ; se prepararon soluciones de cloruro de manganeso 1M e hidróxido de sodio 2M .Para preparar el cloruro de manganeso se pesó 14.38 g de cloruro de manganeso (II) monohidratado diluido en 1000 ml de agua destilada hervida también se preparó la solución de hidróxido de sodio pesando 160 g de Hidróxido de sodio aforado a 500 ml con agua destilada.

Al extracto de borjón se le añadió gota a gota la solución de hidróxido de sodio 2M mezclando constantemente y midiendo con el equipo multiparamétrico HQ 30 d hasta alcanzar un pH entre 9-10. A continuación, se añade gota a gota el cloruro de manganeso al extracto de borjón cambiado de pH mientras se agita continuamente la solución; la relación volumen de esta solución será 1:1 (cloruro manganeso: extracto de borjón cambiado el pH) (Murgueitio Herrera,

2018). Seguidamente, esta solución es filtrada mediante papel filtro y manejando jeringas con sus propios filtros primero se empleó los filtros de 0.45 μm y finalmente 0.22 μm , esta nueva solución filtrada de color marrón fue aplicada a las muestras experimentales con arsénico (ver figura 16).



Figura 16. Formación y filtración de Np de Manganeso

3.7 Diseño Experimental

En la ejecución del ensayo de remoción de arsénico se aplicó un diseño experimental aleatorio; este esquema consistía en crear una solución base de arsénico (250 ppm), esta solución sirvió para crear las diferentes diluciones de arsénico de: 5 ppm, 10ppm, 25ppm, 50ppm, 100ppm, 150 ppm. Cada dilución de arsénico tuvo tres replicas para efectuar las pruebas de remoción de arsénico en laboratorio.

3.7.1 Preparación de diluciones de arsénico

Para ejecutar la solución madre de arsénico (250 ppm) se pesó 1.04 g arsenato de sodio dibásico heptahidratado; esta sal se disuelve con agua destilada en un vaso de precipitación de 100 ml. Seguidamente, esta solución es afora con agua destilada en un balón de 1000 ml. Posteriormente, se procedió a crear las diferentes diluciones de arsénico a partir de la solución base; para preparar las diluciones se utilizó la siguiente fórmula:

$$C_1 * V_1 = C_2 * V_2 \quad \text{Ecuación (16)}$$

Donde:

C_1 = Concentración de la solución madre (250 ppm)

C_2 = Concentración de la dilución que vamos a crear

V_1 = Volumen de la solución madre de arsénico que necesitamos tomar

V_2 = Volumen de la dilución (100 ml)

La fórmula anteriormente mencionada ayudó a conocer la cantidad necesaria de solución madre arsénico que se debía tomarse para crear las diferentes diluciones, todas estas diluciones fueron aforadas con agua destilada en frascos de plástico de 100 ml. Además, cada dilución de arsénico fue repetida tres veces logrando obtener 18 botellas de plástico de 100 ml de capacidad (ver figura 17).



Figura 17. Preparación de solución madre y diluciones de arsénico

3.7.2 Medición de la concentración inicial de las diluciones de arsénico

En la medición de arsénico de las diluciones se debieron tratar las muestras de arsénico; se inició el proceso extrayendo 1 ml de solución de cada una de las botellas plásticas, estas soluciones fueron colocadas tubos de ensayo. Seguidamente, en los tubos de ensayo con 1 ml de solución se añadió 1 ml de ácido clorhídrico concentrado y 1 ml de la solución compuesta por yoduro de potasio (5%) más ácido ascórbico (5%) se esperó que estas sustancias reaccionen durante el tiempo de 45 minutos para últimamente añadir 7 ml de agua destilada.

Últimamente, se determinó las concentraciones de arsénico de las diluciones tratadas mediante procesos experimentales del espectrómetro de absorción atómica (EAA) Perkin Elmer AAnalyst 800 aplicando su sistema de inyección FIAS; para este proceso se ejecutó la metodología 3500 B arsénico sección 3114 descrita en el Manual de Métodos Estándar para la examinación de agua y aguas residuales (APHA, 1992)(ver figura 18).

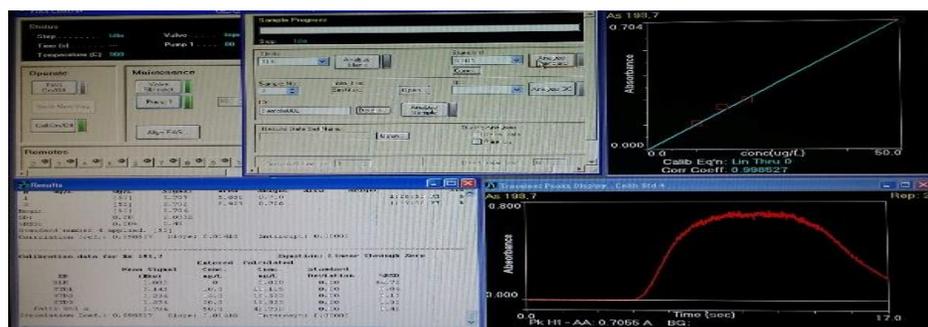


Figura 18. Medición de la concentración inicial de las diluciones de As

3.7.3 Aplicación de las nanopartículas de hierro en diluciones de arsénico

Para la aplicación de nanopartículas de hierro en las soluciones de arsénico; se inició este proceso con la extracción de 5 ml de cada dilución de arsénico con concentraciones de 5, 10, 25, 50, 100, 150 ppm; estas soluciones extraídas fueron puestas en tubos de ensayo. A continuación, se agregó 5 ml de nanopartículas líquidas de hierro en los tubos de ensayo; los 18 tubos fueron agitados mediante un agitador orbital digital marca WiseShake SHO-2D durante 24 horas a 150 rpm (ver figura 19).



Figura 19. Nanopartículas de Fe aplicadas en las soluciones de As

3.7.4 Aplicación de nanopartículas de manganeso en diluciones de arsénico

Para la aplicación de nanopartículas de manganeso en las soluciones de arsénico; se inició esta fase con la extracción de 5 ml de cada dilución de arsénico, con concentraciones de 5, 10, 25, 50, 100, 150 ppm; estas soluciones extraídas fueron puestas en tubos de ensayo (ver figura 20). A continuación, se agregó 5 ml de nanopartículas líquidas de manganeso en los tubos de ensayo; los 18 tubos fueron agitados mediante un agitador orbital digital marca WiseShake SHO-2D durante 24 horas a 150 rpm.



Figura 20. Nanopartículas de Mn aplicadas en las soluciones de As

3.7.5 Medición de la concentración de hierro en las diluciones de arsénico

Los tubos de ensayo con diluciones de arsénico y nanopartículas de hierro después de ser agitados en el agitador orbital durante 24 horas a 150 rpm fueron filtrados mediante el uso de un embudo de vidrio compuesto por filtros de membranas (0.22 μm) para eliminar cualquier rastro de materia suspendida que existiera después de la reacción en estos.

Se determinó las concentraciones de hierro de las 18 muestras de hierro mediante procesos experimentales del espectrómetro de absorción atómica (EAA) Perkin Elmer AAnalyst 800 aplicando método de flama aire-acetileno; para este proceso se ejecutó la metodología 3500- Fe

sección 3111 B Y 3111 C descrita en el Manual de Métodos Estándar para la examinación de agua y aguas residuales (ver figura 21).

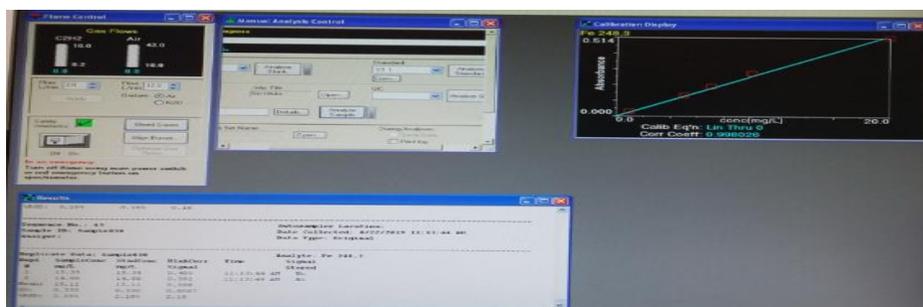


Figura 21. Medición de la concentración de Fe en las diluciones de As

3.7.6 Medición de la concentración de manganeso en las diluciones de arsénico

Las muestras de arsénico con nanopartículas de hierro después de ser agitadas en el agitador orbital durante 24 horas a 150 rpm fueron filtradas mediante el uso de un embudo de vidrio compuesto por filtros de membranas (0.22 μm) para eliminar cualquier rastro de materia suspendida que existiera después de la reacción de estas dos soluciones.

Se determinó las concentraciones de manganeso de las 18 muestras de manganeso mediante procesos experimentales del espectrómetro de absorción atómica (EAA) Perkin Elmer AAnalyst 800 aplicando método de flama aire-acetileno; para este proceso se ejecutó la metodología 3500-Mn sección 3111 B Y 3111 C descrita en el Manual de Métodos Estándar para la examinación de agua y aguas residuales (APHA, 1992) (ver figura 22).

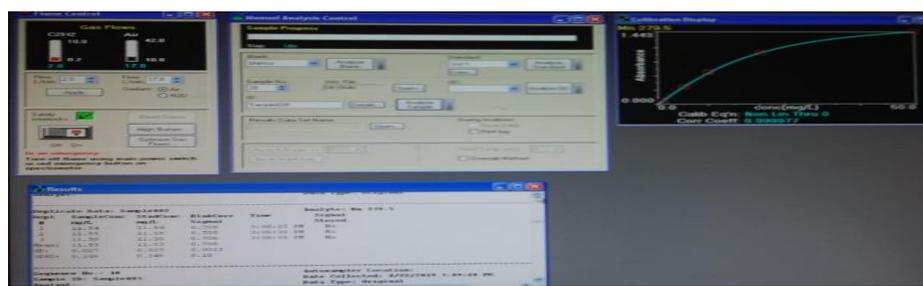


Figura 22. Medición de la concentración de Mn en las diluciones de As

3.7.7 Evaluación de la remoción de arsénico con nanopartículas de hierro

Las diluciones de arsénico aplicadas nanopartículas de hierro fueron colocadas en tubos de ensayo, estos 18 tubos fueron colocados en el agitador orbital durante 24 horas a 150 rpm. Seguidamente, estas muestras fueron filtradas mediante el uso de un embudo de vidrio compuesto por filtros de membranas (0.22 μm) para eliminar cualquier rastro de materia suspendida que existiera en estos.

Las muestras filtradas fueron tratadas para poder establecerse su concentración de arsénico final mediante la metodología 3500 B arsénico sección 3114, se utilizó el espectrómetro de absorción atómica (EAA) Perkin Elmer AAnalyst 800 aplicando un sistema de inyección FIAS como se describe en el Manual de Métodos Estándar para la examinación de agua y aguas residuales (APHA, 1992).

3.7.8 Evaluación de la remoción de arsénico con nanopartículas de manganeso

Las muestras con diferentes concentraciones de arsénico aplicadas nanopartículas de manganeso fueron colocadas en tubos de ensayo, estos 18 tubos fueron colocados en el agitador orbital durante 24 horas a 150 rpm. Seguidamente, estas muestras fueron filtradas mediante el uso de un embudo de vidrio compuesto por filtros de membranas (0.22 μm) para eliminar cualquier rastro de materia suspendida que existiera en estos.

Las muestras filtradas fueron tratadas para poder establecerse su concentración de arsénico final mediante la metodología 3500 B arsénico sección 3114, se utilizó el espectrómetro de absorción atómica (EAA) Perkin Elmer AAnalyst 800 aplicando un sistema de inyección FIAS como se describe en el Manual de Métodos Estándar para la examinación de agua y aguas residuales (APHA, 1992).

3.7.9 Calculo de porcentaje de remoción de arsénico

El porcentaje de remoción de arsénico de las muestras aplicadas nanopartículas metálicas de hierro y manganeso se estableció usando la formula aplicada por Francisca y Carro Pérez (2014) , la ecuación es la siguiente:

$$\text{Remoción (\%)} = \frac{C_{\text{arsénico } i} - C_{\text{arsénico } f}}{C_{\text{arsénico } f}} * 100 \quad \text{Ecuación (17)}$$

Siendo:

$C_{\text{arsénico } i}$ = Concentración inicial de arsénico (ppm)

$C_{\text{arsénico } f}$ = Concentración final de arsénico (ppm)

3.8 Fase Geográfica

3.8.1 Recopilación y generación de una base de datos

Al obtener las concentraciones de Arsénico de las muestras de agua de la Laguna Papallacta procesadas en el laboratorio por medio del espectrofotómetro UV-VIS y los datos de pH, temperaturas conseguidas en campo mediante el equipo multiparamétrico HQ 30 d de las muestras de agua, se procedió a unificar estos valores creando una base de datos en Microsoft Excel.

Esta base de datos georreferenciada muestra una estructura con varios campos como: número de muestra, coordenada UTM Este (m), coordenada UTM Norte (m), concentración de arsénico ($\mu\text{g/l}$), concentración de arsénico (mg/l), pH, temperatura ($^{\circ}\text{C}$); esta base fue subida en formato .csv al programa Arcmap y mediante herramientas propias del mismo se logró transformar estos datos en shapets de puntos de las concentraciones de arsénico, pH y temperatura con sus respectivas coordenadas.

3.8.2 Determinación de la variable principal

La variable principal de este estudio es el arsénico, como se ha venido mencionado anteriormente; la obtención de esta variable exige trabajo de campo y laboratorio lo cual genera costos elevados en personal, equipo y tiempo. Debido a lo cual se planteó en esta investigación la aplicación de herramientas geoestadísticas para generar un modelo de predicción que obtenga los puntos muestrales desconocidos ahorrando las salidas de campos y los gastos que implican las mismas.

Para ejecutar este modelo geoestadístico, se procedió a separar la base de datos geográfica generada dos grupos mediante el comando `data.ids` de la librería `Caret` del software R, esta librería efectuó un sorteo al azar separando las muestras. El primer conjunto (65 puntos) se empleó para efectuar el estudio estadístico, estimar el variograma y crear el modelo; el segundo conjunto (11 puntos) fue ocupado para la verificación, comparación de los datos del modelo de predicción con los datos obtenidos en campo.

3.8.3 Determinación de variables auxiliares

Las variables auxiliares de este estudio fueron pH y temperatura, se seleccionó las mismas debido a que estas guardan una estrecha relación con la variable principal. Respecto al pH, se ha demostrado que influye en la concentración, movilidad, especies arsenicales y toxicidad del arsénico (Alarcón Herrera, Leal, Miranda, Benavides, & Martín Domínguez, 2013).

Por otra parte se escogió a la variable temperatura debido a la correlación positiva que mantiene con el arsénico como se mencionan en algunos estudios. Uno de estos casos fue el del Valle de Zimapán en Hidalgo que demostró que la temperatura está conectada con las

concentraciones de arsénico obteniendo un coeficiente de correlación alto y significativo (Arreguín Cortés, Soto, Chávez Guillén, & Smedley, 2012) .

Para ejecutar los modelos geoestadísticos de pH y temperatura, se procedió a separar la base de datos geográfica generada dos grupos mediante el comando `data.ids` de la librería `Caret` del software R, esta librería efectuó un sorteo al azar separando las muestras. El primer conjunto (54 puntos) se empleó para efectuar el estudio estadístico, estimar el variograma y crear el modelo; el segundo conjunto (11 puntos) fue ocupado para la verificación, comparación de los datos del modelo de predicción con los datos obtenidos en campo.

3.8.4 Tamaño de muestra

En la creación del modelo geoestadístico es primordial contar con una cantidad considerable de datos de la variable a modelar, Oliver y Webster (2015) mencionan que el número ideal de datos para poder generar un buen modelo de predicción de alguna variable en estudio es 100 datos como mínimo; sin embargo, para este estudio se empleó un número menor de muestras al establecido ya que la recolección de datos de las variables a estudiar (arsénico, pH y temperatura) en campo fue difícil por diferentes factores que afectaron su obtención.

3.8.5 Coeficiente de Pearson

La correlación es una herramienta de análisis para conocer la dependencia o independencia que tiene una variable con otra; este grado de relación entre variables cuantitativas puede ser cuantificada mediante coeficientes de correlación. Un coeficiente de correlación muy usado es el de Pearson, este coeficiente mide la covariación entre dos variables conectadas linealmente (Pita Fernández & Pértegas Díaz, 2002).

Este coeficiente posee valores que oscilan entre el rango de -1 a 1; cuando este factor toma valores de positivos significa que posee una relación directa entre las variables aumentando sus

valores en un mismo tiempo. El coeficiente es negativo cuando existe una relación inversa, lo cual representa que una variable aumenta mientras la otra se reduce o viceversa; el coeficiente toma un valor cuando las dos variables no poseen ningún tipo de relación (Pita Fernández & Pértegas Díaz, 2002).

La función empleada para obtener el coeficiente de Pearson de las variables fue `mtcars.cor` de la librería `corrplot` perteneciente al software estadístico R; este comando crea una matriz de correlación que contiene en su interior los coeficientes de Pearson de las variables en estudio (ver figura 23). Además, se ejecutó la función `corrplot` del software R para la visualización de la matriz gráfica de correlación de las variables (ver figura 24).

	pH	Temperatura	As_mg_l
pH	1.0000	0.3652	0.2541
Temperatura	0.3652	1.0000	-0.1711
As_mg_l	0.2541	-0.1711	1.0000

Figura 23. Matriz de correlación

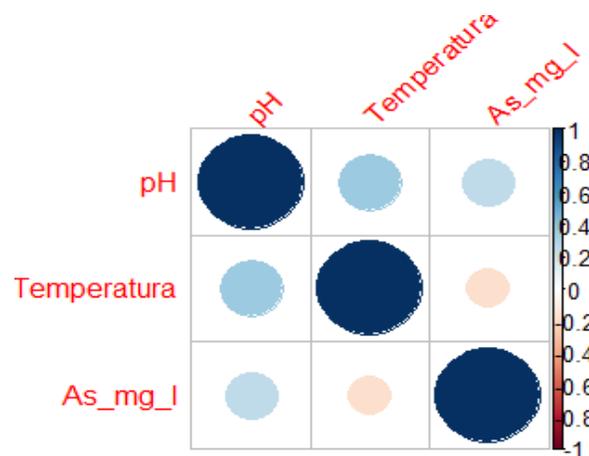


Figura 24. Matriz gráfica de correlación

La Figura 23 muestra la matriz de correlación con los coeficientes de Pearson de las variables en estudio; el coeficiente de Pearson de la variable pH con respecto a la variable temperatura posee un valor de 0.3652 lo cual indica que posee un relación positiva leve. Además se observó que el coeficiente de Pearson entre la variable concentración de arsénico y variable pH presenta

un valor de 0.2541 exponiendo una relación positiva leve. Finalmente, podemos concluir que la relación entre las variables temperatura y pH es una relación inversa debido al valor del coeficiente de Pearson (-0.1711).

La matriz de correlación gráfica (figura 24), expone que la mayor correlación existente entre las variables de estudio es la correlación entre las variables temperatura y pH seguida de las variables concentración de arsénico y pH. Además, la matriz de correlación exhibe que existe una relación inversa entre la concentración de arsénico y temperatura; esto quiere decir que si la concentración de arsénico aumenta el valor de temperatura baja o viceversa.

3.8.6 Modelos Geoestadísticos de predicción de las variables de estudio

3.8.6.1 Análisis Exploratorio de Datos

Esta fase tiene como objetivo primordial la obtención de un resumen de los parámetros estadísticos principales de las variables en estudio además de la localización o identificación de datos atípicos que se encuentran en los datos empleados para los modelamientos geoestadísticos de las variables (Guajala Agila & Zambrano Solís, 2016). En seguida, se muestran en las tablas 1, 2 ,3 el resumen de los estadísticos de la variable principal (concentración de arsénico) y auxiliares (pH, temperatura) respectivamente.

Tabla 1

Resumen estadístico de la variable As

N	65
Media	0.2254
Mediana	0.2200
Desviación Estándar	0.1367
Coefficiente de Variación	0.6063
Simetría	0.7218

CONTINÚA



Curtosis	0.6371
Cuartiles	
0%	0.02
25%	0.1075
50%	0.215
75%	0.3125
100%	0.65

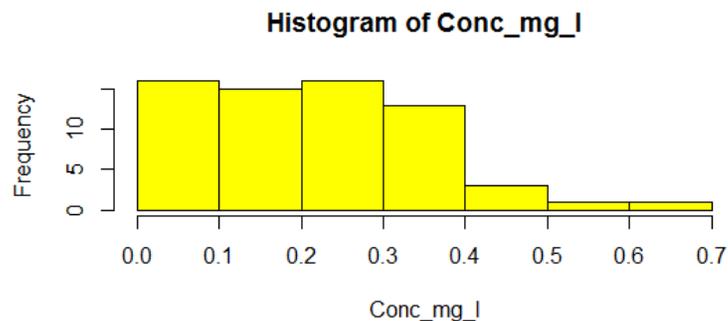
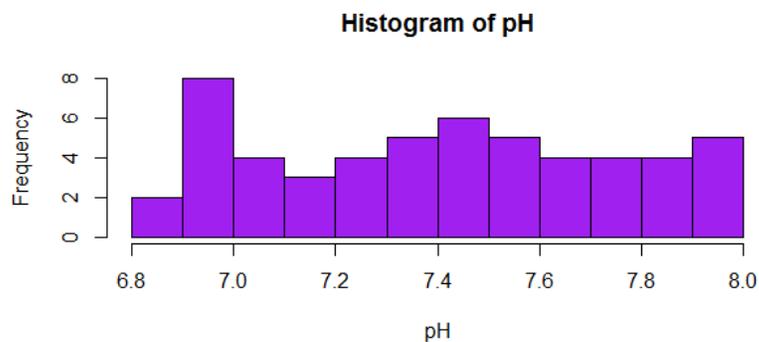


Figura 25. Histograma de Concentración de arsénico.

En la tabla 1 podemos ver que el coeficiente de variación es mayor al 30%, lo cual presume un problema de variación de datos; la curtosis de la variable presenta un valor de 0.6371 mostrando una distribución se llama leptocúrtica indicando una mayor concentración de los datos en torno a la media como se enseña en el histograma (ver figura 25) (Barrios Calmaestra, 2005). Además se observa que la media posee un valor de 0.2254 mayor que la mediana de 0.22, determina que los datos se encuentren localizados en su mayoría hacia la derecha ; el coeficiente de asimetría es positivo , enseña que la distribución esta levemente cargada hacia los valores superiores a la media.

Tabla 2*Resumen estadístico de la variable pH*

N	54
Media	7.4164
Mediana	7.435
Desviación Estándar	0.3392
Coefficiente de Variación	0.0457
Simetría	0.0449
Curtosis	-1.2090
Cuartiles	
0%	6.89
25%	7.08
50%	7.43
75%	7.68
100%	7.99

**Figura 26.** Histograma de pH

En la tabla 2 podemos ver que el coeficiente de variación es 0.4%, lo cual presume una homogeneidad en los datos; la curtosis de la variable muestra un valor de -1.2090 mostrando una distribución llamada platicúrtica con una menor concentración de datos en torno a la media como se indica en el histograma (ver figura 26) (Barrios Calmaestra, 2005). Además se observa

que la media posee un valor de 7.4164 menor que la mediana de 7.435, determina que los datos se encuentren localizados en su mayoría hacia la izquierda ; el coeficiente de asimetría es positivo, enseña que la distribución esta levemente cargada hacia los valores superiores a la media.

Tabla 3

Resumen estadístico de la variable temperatura

N	54
Media	12.822
Mediana	12.80
Desviación Estándar	0.4776
Coefficiente de Variación	0.0372
Simetría	0.3877
Curtosis	-0.6083
Cuartiles	
0%	12
25%	12.5
50%	12.8
75%	13.1
100%	13.9

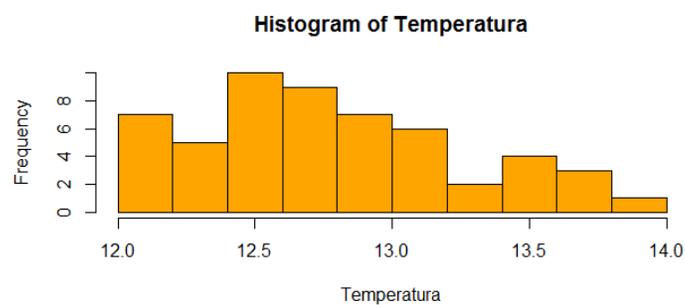


Figura 27. Histograma de Temperatura

En la tabla 3 podemos ver que el coeficiente de variación es 0.3%, lo cual presume una homogeneidad en los datos; la curtosis de la variable posee un valor de -0.6083 mostrando una distribución llamada platicúrtica con una menor concentración de datos en torno a la media como se indica en el histograma (ver figura 27) (Barrios Calmaestra, 2005). Además se observa que la media posee un valor de 12.822 mayor que la mediana de 12.80, determina que los datos se encuentren localizados en su mayoría hacia la derecha ; el coeficiente de asimetría es positivo, enseña que la distribución esta levemente cargada hacia los valores superiores a la media.

3.8.6.1.1 Diagramas de caja de las variables concentración de arsénico, pH y temperatura

Estos gráficos fueron construidos con los puntos muestreados de las variables en estudio utilizando la función boxplot del paquete RGeostats del software estadístico R. Inmediatamente, se muestran las figuras 28, 29 y 30 de los diagramas de caja de las variables (concentración de arsénico, temperatura, pH) respectivamente.

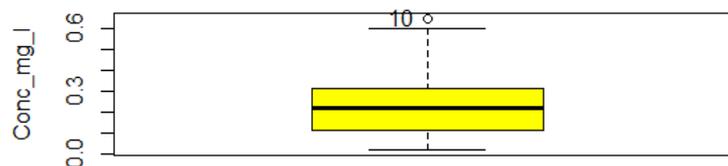


Figura 28. Diagrama de caja de la concentración de arsénico



Figura 29. Diagrama de caja de pH

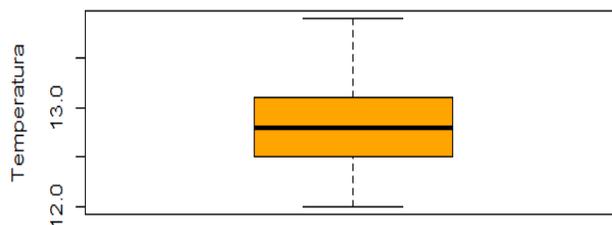


Figura 30. Diagrama de caja de temperatura

Las figuras 29, 30 indicaron que las variables auxiliares no presentan valores extremos o anómalos; en el caso de la variable principal se detectó como indica en la figura 28 la presencia de un valor anómalo, el cual fue revisado cuidadosamente.

3.8.6.1.2 Diagramas de dispersión de las variables

Se empleó los puntos muestreados para la elaboración de los diagramas de dispersión “Oeste vs Variable”, “Sur vs Variable” de las variables concentración de arsénico, pH y temperatura. Para efectuar estos gráficos se usó el comando scatterplot del paquete RGeostats del software R. A continuación, se muestran las figuras 31, 32, 33, 34, 35, 36 pertenecientes a los diagramas de dispersión de concentración de arsénico, pH y temperatura.

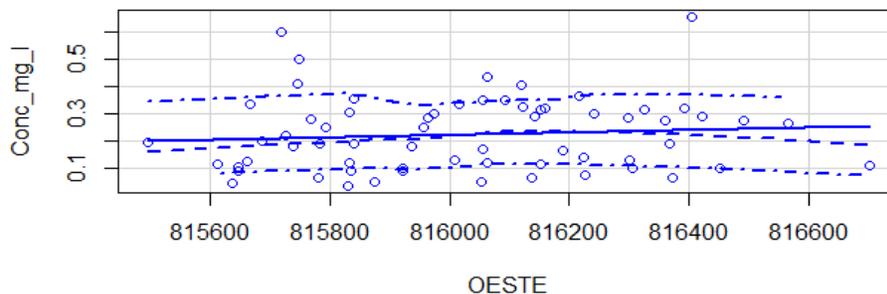


Figura 31. Gráfico de dispersión de Concentración de arsénico vs Oeste

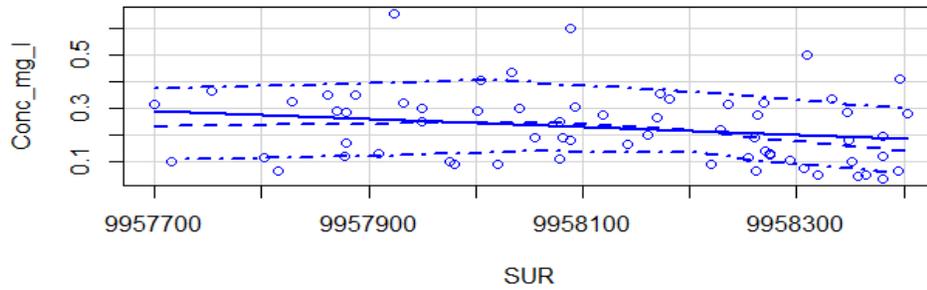


Figura 32. Gráfico de dispersión de Concentración de arsénico vs Sur

Los gráficos de dispersión de la variable arsénico (ver figura 31 y 32) identificó valores extremos a considerar; concluyendo que existe tendencia por lo que se le considera no estacionario, es decir que la distribución conjunta es variante a cualquier valor de h. Es decir que la media no es constante para toda la región.

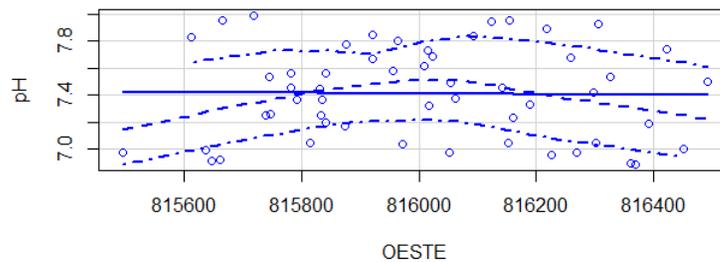


Figura 33. Gráfico de dispersión de pH vs Oeste

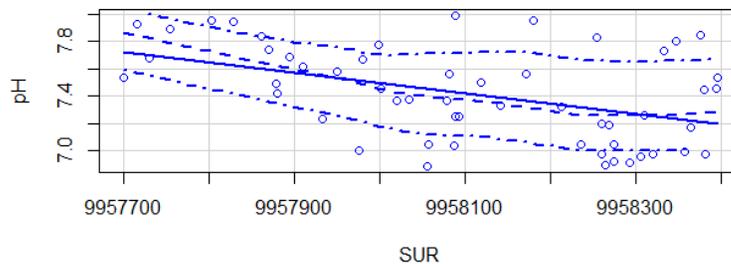


Figura 34. Gráfico de dispersión de pH vs Sur

Los gráficos de dispersión de la variable pH (ver figuras 33 y 34) no identificó valores extremos a considerar; concluyendo que existe tendencia por lo que se le considera no estacionario, es decir que la distribución conjunta es variante a cualquier valor de h. Es decir que la media no es constante para toda la región.

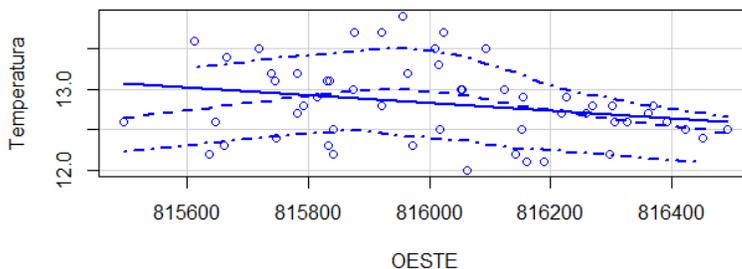


Figura 35. Gráfico de dispersión de temperatura vs Oeste

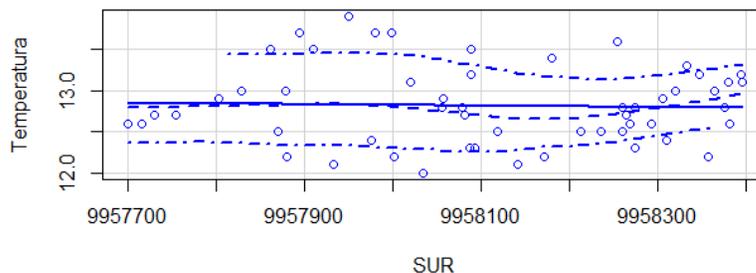


Figura 36. Gráfico de dispersión de temperatura vs Sur

Los gráficos de dispersión de la variable temperatura (ver figuras 35 y 36) no identificó valores extremos a considerar; concluyendo que existe tendencia por lo que se le considera no estacionario, es decir que la distribución conjunta es variante a cualquier valor de h . Es decir que la media no es constante para toda la región.

3.8.6.2 Análisis estructural de datos

3.8.6.2.1 Cálculo del variograma experimental

El variograma experimental omnidireccional fue construido con los puntos muestreados de cada variable empleando la función `vario.calc` del paquete `RGeostats` perteneciente al software estadístico R (Guajala Agila & Zambrano Solís, 2016). Inmediatamente, las figuras 37, 38 y 39 muestran los variogramas omnidireccionales experimentales de la variable principal (concentración de arsénico) y auxiliares (temperatura, pH) respectivamente.

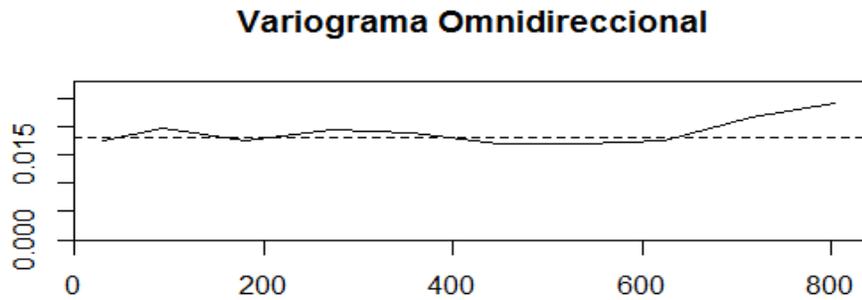


Figura 37. Variograma Omnidireccional - Concentración de arsénico

Al efectuar el análisis del variograma omnidireccional de la variable principal se pudo observar que la gráfica muestran ciertas características como:

- Existe efecto pepita (C_0) cercano a 0.0165 con respecto al origen
- El alcance no se identifica claramente
- La meseta es creciente
- La tendencia del grafico del variograma es creciente

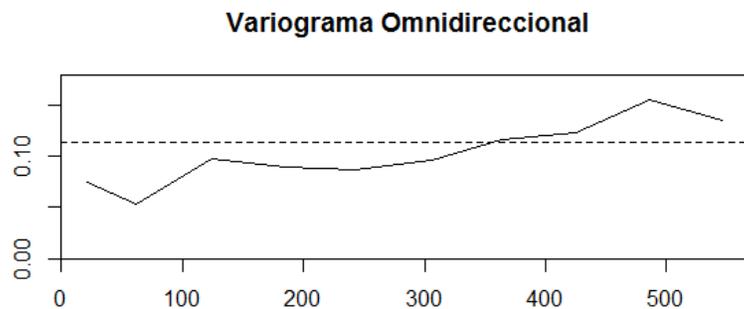


Figura 38. Variograma Omnidireccional – pH

Al realizar el análisis del variograma omnidireccional de la variable auxiliar pH se pudo observar que la gráfica muestran ciertas características como:

- Existe efecto pepita (C_0) cercano a 0.08 con respecto al origen
- Alrededor de un valor de 0.10 para la meseta

- El rango esta aproximadamente en el valor de 200
- La tendencia del grafico del variograma es creciente

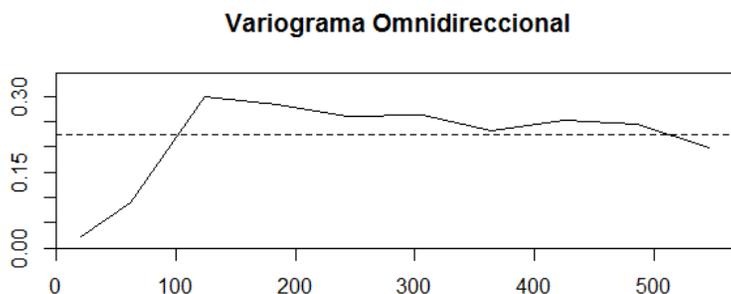


Figura 39. Variograma Omnidireccional – Temperatura

Al efectuar el estudio del variograma omnidireccional de la variable auxiliar temperatura se pudo observar que la gráfica muestra ciertas características como:

- Se presenta un efecto pepita (C_0) cercano a 0.0375 con respecto al origen
- Alrededor de un valor de 0.265 para la meseta
- El rango esta aproximadamente en el valor de 193
- La tendencia del grafico del variograma es decreciente

3.8.6.2.2 Nube variográfica

La nube variográfica es una función que ayuda a ubicar los valores extraños de la variable cuando se calcula el variograma experimental (Alfaro Sironvalle, 2007). Para poder obtener esta herramienta de análisis variográfico se utilizó la herramienta cloud.calc del paquete RGeostats del software R (Guajala Agila & Zambrano Solís, 2016). A continuación, se muestra la nube variográfica de la variable principal y las variables auxiliares en las figuras 40, 41 y 42 respectivamente.

NUBE VARIOGRAFICA AS

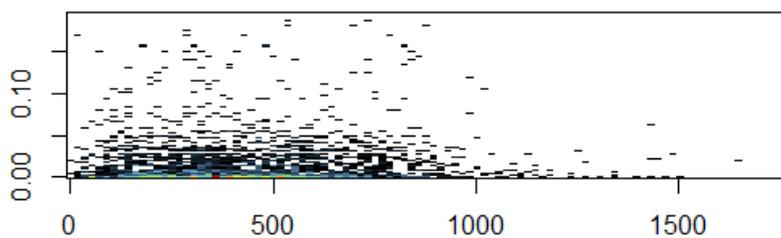


Figura 40. Nube variográfica de arsénico

Al realizar el análisis de la nube variográfica de las concentraciones de arsénico se pudo visualizar que la figura 40 presenta valores anómalos que podrían afectar el ajuste del modelo experimental a un modelo teórico.

NUBE VARIOGRAFICA pH

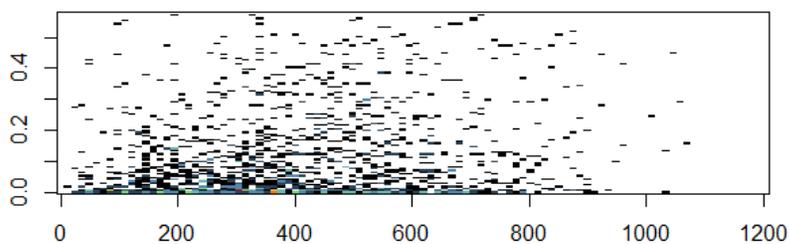


Figura 41. Nube variográfica de pH

Al realizar el análisis de la nube variográfica de pH (ver figura 41) se pudo visualizar la inexistencia de valores anómalos o extraños permitiendo un ajuste apropiado del modelo experimental a un modelo teórico.

NUBE VARIOGRAFICA TEMPERATURA

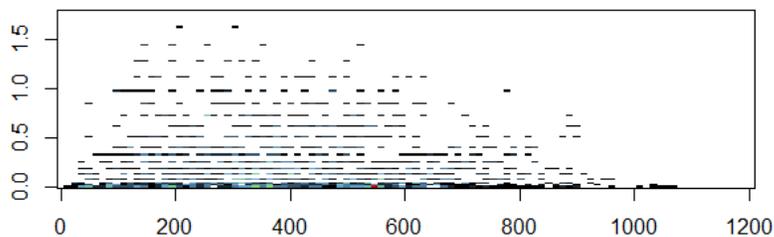


Figura 42. Nube variográfica de Temperatura

Al realizar el análisis de la nube variográfica de temperatura (ver figura 42) se pudo visualizar que no existe presencia de valores anómalos o extraños permitiendo un ajuste apropiado del modelo experimental a un modelo teórico.

3.8.6.2.3 Ajuste del variograma experimental a un modelo teórico

El ajuste del variograma experimental a un modelo de variograma teórico constituye un paso primordial en este estudio geoestadístico, puesto que el modelo que se tome servirá como insumo principal para los cálculos posteriores de esta investigación. Cabe señalar la existencia de dos tipos de variogramas; los variogramas experimentales y los variogramas teóricos (Guajala Agila & Zambrano Solís, 2016). Los variogramas experimentales son modelos obtenidos a través de los datos de una variable en estudio y los variogramas teóricos son modelos representados por medio de una ecuación matemática; los modelos teóricos son generalmente usados para ajustar los variogramas experimentales, debido a que estos poseen propiedades o características y expresiones matemáticas que los modelos experimentales carecen haciéndolos inútiles al momento de su aplicación en predicciones con interpoladores (Sommer C, Fernández L, Rivas S, & Gutiérrez R, 2000).

La función empleada para ejecutar este proceso fue `model.auto` de la librería `RGeostats` perteneciente al software estadístico R, este comando utilizó un algoritmo numérico que busca encajar automáticamente el modelo experimental de la variable en estudio con uno de los varios modelos teóricos almacenados en el paquete `RGeostats` (Guajala Agila & Zambrano Solís, 2016).

Los modelos teóricos automáticamente considerados por el programa estadístico R para el ajuste del modelo experimental de la variable principal (concentraciones de arsénico) fue el

modelo efecto pepita, cardinal sine. Estas estructuras fueron seleccionadas por el programa debido al ajuste que logro el programa del variograma experimental con el variograma teórico. Sin embargo se eligió el modelo pepita por ser el más parecido con el variograma experimental (ver figura 43).

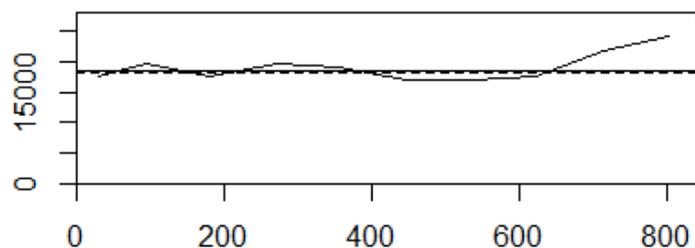


Figura 43. Variograma ajustado-concentración arsénico

Los parámetros del modelo teórico efecto pepita obtenido por el programa R para la variable concentración de arsénico se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4

Parámetros básicos del variograma-Variable As

Estructura	Parámetros	
	Rango o alcance (m)	Sill o meseta (mg/l)
Efecto Pepita	628	17368

Los modelos teóricos automáticamente considerados por el programa estadístico R para el ajuste del modelo experimental de la variable pH fue el modelo efecto pepita, cúbico y j-bessel. Estas estructuras fueron seleccionadas por el programa debido al ajuste que logro el programa del el variograma experimental con el variograma teórico. Se escogió el modelo cúbico por ser el más parecido con el variograma experimental (ver figura 44).

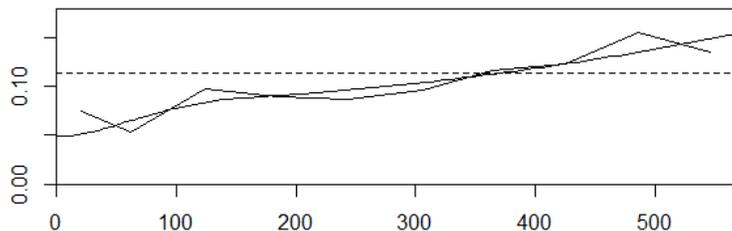


Figura 44. Variograma ajustado-pH

Los parámetros del modelo teórico cúbico obtenido por el programa R para la variable pH se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5

Parámetros básicos del variograma-Variable pH

Estructura	Parámetros	
Cúbico	Rango o alcance (m)	Sill o meseta (°C)
	192	0.0343

El modelo teórico automáticamente considerado por el programa estadístico R para el ajuste del modelo experimental de la variable temperatura fue el modelo cúbico. Esta estructura fue seleccionada por el programa debido a la similitud gráfica que presenta el variograma obtenido por los datos y el variograma teórico (ver figura 45).

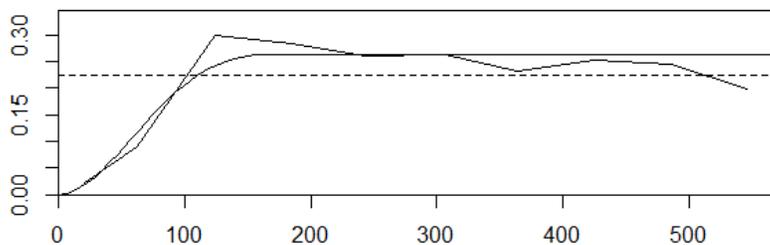


Figura 45. Variograma ajustado – Temperatura

Los parámetros del modelo teórico cúbico por el programa R para la variable temperatura (°C) se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6

Parámetros básicos del variograma-Variable temperatura

Estructura	Parámetros	
Cúbico	Rango o alcance (m)	Sill o meseta (°C)
	193	0.265

3.8.6.2.4 Validación cruzada

Para realizar la verificación del modelo teórico de la variable principal y las variables auxiliares se empleó la validación cruzada, este proceso ejecutó la función `neigh.input` de la librería `RGeostats` del programa estadístico R para definir las cualidades del vecindario móvil de búsqueda de la variable de la investigación (Guajala Agila & Zambrano Solís, 2016). Las características del vecindario móvil con las que se trabajó en este estudio se detallan enseguida:

- Puntos máximos en la vecindad: 16
- Puntos mínimos en la vecindad: 6
- Definición de sectores: Si
- Número de sectores: 8
- Puntos máximos de muestras por sector: 2
- Anisotropía: No
- Radio de búsqueda: En el caso del radio de búsqueda se tomó en cuenta la distancia en donde el variograma experimental y teórico se empiezan ajustar perfectamente observando las figuras 46, 47 y 48 pertenecientes a los variogramas ajustados de las variables en estudio.

Además, cabe mencionar que se utilizó el comando `x.valid` de la librería `RGeostats` para generar el histograma de error de la validación cruzada del modelo generado.

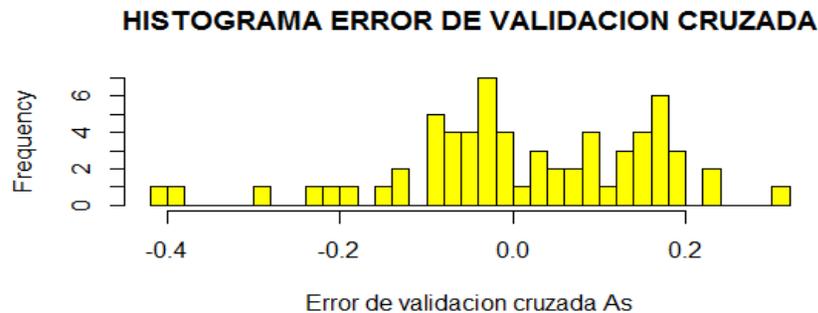


Figura 46. Histograma de error de validación cruzada- Arsénico

La figura 46 muestra que la mayoría de valores del error de validación cruzada se encuentran en el intervalo -0.1 a 0.2 que representa aproximadamente $[-0.4 \text{ mg/l}; 0.4 \text{ mg/l}]$, lo cual demuestra una correspondencia inadecuada de los datos con el modelo ajustado y las propiedades de la vecindad aplicada.

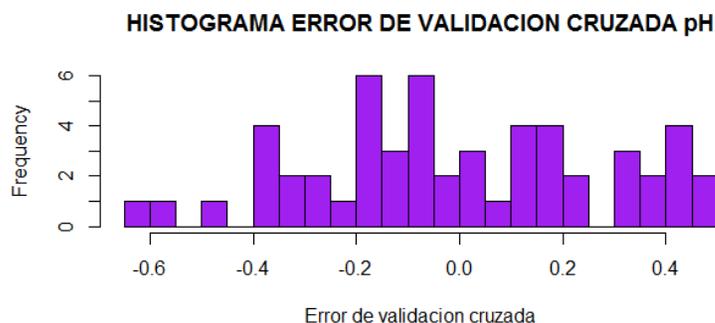


Figura 47. Histograma de error de validación cruzada- pH

La figura 47 muestra que la mayoría de valores del error de validación cruzada se concentran en el intervalo -0.4 a 0.2 que representa aproximadamente $[-0.6; 0.6]$, lo cual demuestra una correspondencia adecuada de los datos con el modelo ajustado y las propiedades de la vecindad aplicada.

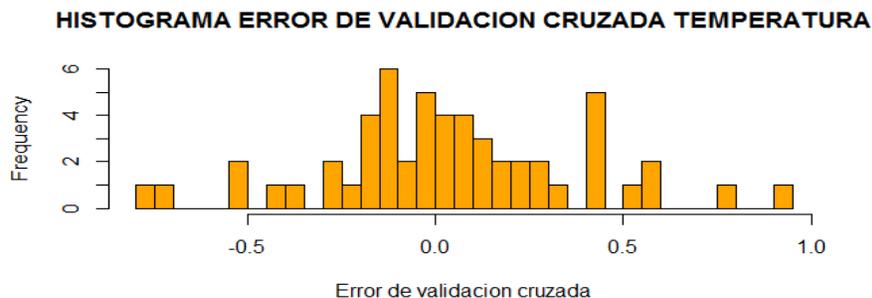


Figura 48. Histograma de error de validación cruzada- Temperatura

La figura 48 muestra que la mayoría de valores del error de validación cruzada concentran en el intervalo -0.4 a 0.4 que representa aproximadamente $[-0.7\text{ }^{\circ}\text{C}; 1^{\circ}\text{C}]$, lo cual demuestra una correspondencia adecuada de los datos con el modelo ajustado y las propiedades de la vecindad aplicada.

3.8.6.3 Predicción

En esta fase se efectúa la elaboración del mapa de predicción de la variable en estudio empleando como interpolador kriging ordinario sobre una grilla regular con una resolución definida para Este y Norte. Este tamaño de resolución adecuada es obtenido mediante la metodología aplicada por Hengl (2006) tomando como base la densidad de muestras tomadas en un área de estudio según la expresión matemática siguiente:

$$\text{Resolución (p)} = 0.0791 * \sqrt{\frac{A}{N}}$$

Siendo A la superficie del área de estudio de la variable expresada en m^2 y N es el número total de puntos muestreados. En esta investigación se utilizó un tamaño de pixel de $5\text{m} \times 5\text{m}$ para todas las variables (Concentración de Arsénico, pH y temperatura).

Además, la predicción espacial se efectuó mediante la función Kriging del paquete RGeostats del programa R, con las características de vecindad móvil mencionadas anteriormente. El resultado final serán mallas regulares con los valores predichos de las variables de estudio en cada nodo y el error de predicción para cada valor respectivamente (Guajala Agila & Zambrano Solís, 2016).

3.8.6.3.1 Elaboración del mapa de predicción para el manejo en un SIG

Para efectuar la creación de los mapas de predicción y errores de predicción de la variable principal y las variables secundarias se utilizó inicialmente el software R, empleando el comando db.write se exportó este archivo en formato ASCII constituido por cuatro campos los cuales fueron: coordenada oeste, coordenada sur, valores de la variable predicha y errores de predicción.

Seguidamente, este archivo fue importado al software ArcMap por medio de herramientas de ArcToolbox propias de este programa; este software fue escogido debido a las características que posee para poder subir y manejar información en varios formatos. Los modelos de las variables predichas y errores de predicción mantuvieron las características de resolución del pixel del ASCII creado por el programa R para evitar problemas de visualización del mapa.

3.8.6.3.2 Verificación del Modelo Geoestadístico

La validación del modelo geoestadístico se efectuó mediante el empleo del segundo grupo de muestras que no se usaron para el estudio geoestadístico. En el caso de la variable principal se extrajo 11 puntos de concentración de arsénico con los cuales se verifico los valores obtenidos en campo con los valores predichos del modelo de concentración de arsénico generado. La

diferencia obtenida entre los datos obtenidos en campo con los datos predichos es conocida como error de verificación del modelo (ver tabla 7).

Para las variables pH y temperatura se efectuó la validación del modelo mediante el empleo del segundo grupo de muestras que no se usaron para el estudio geoestadístico obtenidas al azar por la librería caret. Se extrajeron 11 puntos para pH y temperatura, estos datos fueron comparados con los valores predichos de los modelos de predicción obtenidos. La diferencia obtenida entre los datos obtenidos en campo con los datos predichos es conocida como error de verificación (ver tablas 9 y 11).

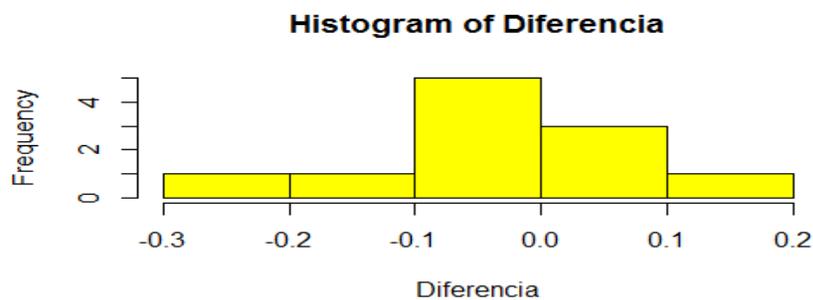
Tabla 7

Error de verificación del modelo de As

Muestra	Oeste	Sur	Z	Conc. observadas (mg/l)	Conc. predichas (mg/l)	Error de verificación
2	815767.0	9958403.0	3358.0	0.28	0.19	0.09
6	816374.0	9958262.0	3366.0	0.06	0.28	-0.22
10	816062.0	9957877.0	3364.0	0.12	0.22	-0.10
32	816241.7	9957950.2	3381.7	0.30	0.30	0.00
34	816160.1	9957932.4	3382.6	0.32	0.28	0.04
45	815834.8	9958020.4	3346.0	0.09	0.18	-0.10
46	815813.2	9958057.3	3344.0	0.31	0.25	0.06
48	815782.3	9958081.9	3368.0	0.19	0.25	-0.06
68	815921.2	9958351.4	3353.0	0.10	0.20	-0.10
70	816015.3	9958332.4	3353.0	0.34	0.15	0.19
74	816301.6	9958275.0	3360.0	0.13	0.19	-0.06

Tabla 8*Resumen estadístico del error de verificación del modelo de As*

N	11
Media	-0.0231
Desviación Estándar	0.1115
Máximo	0.1853
Mínimo	-0.2155
Simetría	0.2541
Curtosis	0.0939
Cuartiles	
0%	-0.2156
25%	-0.0963
50%	-0.0569
75%	0.0486
100%	0.1854

**Figura 49.** Histograma del error de verificación del modelo de As

La figura 49 muestra que la mayoría de valores de error de verificación del modelo se concentran en el intervalo -0.1 a 0.1 que representa aproximadamente [-0.3 mg/l; 0.2 mg/l], lo cual demuestra una normalidad definida.

Tabla 9
Error de verificación del modelo de pH

Muestra	Oeste	Sur	Z	pH observados	pH predichos	Error de verificación
12	816406.0	9957924.0	3262.00	7.53	7.42	0.11
14	816119.0	9958005.0	3317.00	7.04	7.39	-0.35
15	815886.0	9958155.0	3325.00	7.24	7.41	-0.17
26	815724.6	9958228.9	3382.41	7.19	7.37	-0.18
31	816241.7	9957950.2	3381.79	7.38	7.38	0.00
34	815974.6	9958041.0	3381.18	7.55	7.35	0.20
50	815685.5	9958160.5	3346.00	7.55	7.69	-0.14
52	815646.1	9958220.3	3350.00	7.46	7.57	-0.11
54	816054.4	9957887.9	3382.00	7.90	7.60	0.30
58	816190.2	9957780.6	3370.00	7.59	7.81	-0.22
67	815921.2	9958351.4	3353.00	7.57	7.56	0.01

Tabla 10
Resumen estadístico del error de verificación del modelo pH

N	11
Media	-0.0498
Desviación Estándar	0.1954
Máximo	0.3024
Mínimo	-0.3519
Simetría	0.4381
Curtosis	-0.4189
Cuartiles	
0%	-0.3519
25%	-0.1753

CONTINUÍA



50%	-0.119
75%	0.0571
100%	0.3024

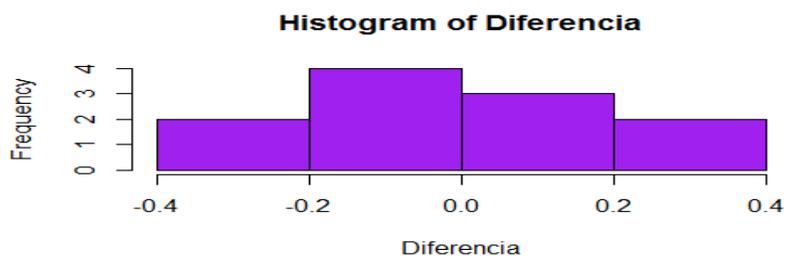


Figura 50. Histograma del error de verificación del modelo pH

La figura 50 se muestra que la mayoría de valores de error de verificación del modelo se concentran en el intervalo -0.2 a 0.2 que representa aproximadamente $[-0.4; 0.4]$, lo cual demuestra una normalidad definida.

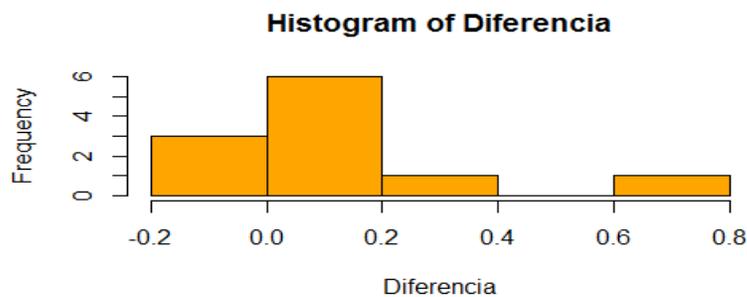
Tabla 11

Error de verificación del modelo de temperatura

Muestra	Oeste	Sur	Z	T(°C) observadas	T(°C) predichas	Error de verificación
12	816406.00	9957924.0	3262.00	12.50	12.44	0.06
14	816119.00	9958005.0	3317.00	12.30	12.14	0.16
15	815886.00	9958155.0	3325.00	12.40	12.15	0.25
26	815724.61	9958228.9	3382.41	12.20	12.31	-0.11
31	816241.77	9957950.2	3381.79	12.20	12.18	0.02
34	815974.66	9958041.0	3381.18	12.40	12.57	-0.17
50	815685.53	9958160.5	3346.00	13.40	13.56	-0.16
52	815646.18	9958220.3	3350.00	13.80	13.14	0.66
54	816054.42	9957887.9	3382.00	13.20	13.11	0.09
58	816190.21	9957780.6	3370.00	12.80	12.75	0.05
67	815921.22	9958351.4	3353.00	13.00	12.92	0.08

Tabla 12*Resumen estadístico del error de verificación del modelo temperatura*

N	11
Media	0.08363
Desviación Estándar	0.23232
Máximo	0.6634
Mínimo	-0.1738
Simetría	1.5533
Curtosis	3.598077
Cuartiles	
0%	-0.17378
25%	-0.04548
50%	0.06414
75%	0.12389
100%	0.66341

**Figura 51.** Histograma del error de verificación del modelo

La figura 51 muestra que la mayoría de valores de error de verificación del modelo de temperatura se concentran en el intervalo -0.2 a 0.2 que representa aproximadamente $[-0.2; 0.8]$ °C, lo cual demuestra una normalidad poco definida.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Fase Ambiental

En esta fase o etapa se mostrarán los resultados de los diferentes parámetros físicos-químicos analizados en campo y laboratorio acerca de las muestras recolectadas de agua de la Laguna Papallacta.

4.1 Análisis Físico-Químico de las muestras de agua de la Laguna Papallacta

4.1.1 Caracterización Química

4.1.1.1 Parámetros “in situ”

- **pH y Temperatura**

En la tabla 13 se muestra el resumen de algunos parámetros analizados “in situ” en las diferentes campañas efectuadas en la Laguna Papallacta.

Tabla 13

Resumen de los parámetros "in situ" de las muestras de agua

Muestra	Oeste (m)	Sur (m)	Z (m)	Profundidad (m)	pH	Temperatura °C
12	816422	9957870	3239	15.0	7.7	12.5
13	816406	9957924	3262	13.0	7.5	12.5
14	816451	9957976	3277	8.0	7.0	12.4

CONTINÚA



15	816119	9958005	3317	10.0	7.0	12.3
16	815886	9958155	3325	15.0	7.2	12.4
17	815647	9958293	3330	4.0	6.9	12.6
18	815494	9958381	3335	3.0	7.0	12.6
19	816151	9958236	3342	15.0	7.1	12.5
20	816369.09	9958055.3	3382.695	4.0	6.9	12.8
21	816188.57	9958141.9	3385.046	2.0	7.3	12.1
22	816016.93	9958213.3	3383.621	2.0	7.3	12.5
23	815839.94	9958260.8	3382.069	2.0	7.2	12.5
24	815746.53	9958310	3383.208	2.0	7.3	12.4
25	815635.24	9958357.8	3384.692	2.0	7.0	12.2
26	815661.49	9958274.9	3384.387	2.0	6.9	12.3
27	815724.61	9958228.9	3382.411	2.0	7.2	12.2
28	815840.68	9958171.6	3382.087	2.0	7.6	12.2
29	815971.44	9958087.2	3384.683	2.0	7.0	12.3
30	816062.46	9958034.2	3382.783	2.0	7.4	12.0
31	816142.18	9958001.7	3384.038	2.0	7.5	12.2
32	816241.77	9957950.3	3381.793	2.0	7.4	12.2
33	816297.37	9957879.3	3382.89	2.0	7.4	12.2
34	816160.12	9957932.4	3382.648	2.0	7.2	12.1
35	815974.66	9958041.1	3381.177	2.0	7.6	12.4
36	815831.91	9958092.8	3381.44	2.0	7.3	12.3
37	815919.91	9958376	3384.342	2.0	7.9	12.2
38	816491.32	9958118.7	3378.399	2.0	7.5	12.2
39	816054.57	9957879	3354	2.0	7.5	13.0
40	816023.63	9957894.4	3355	2.0	7.7	13.7

CONTINÚA



41	816008.16	9957909.7	3425	2.0	7.6	13.5
42	815955.56	9957949.7	3348	2.0	7.6	13.9
43	815921.53	9957980.5	3368	2.0	7.7	12.0
44	815875.11	9957998.9	3344	2.0	7.8	13.7
45	815834.89	9958020.5	3346	2.0	7.4	13.1
46	815813.24	9958057.4	3344	2.0	7.1	12.9
47	815791.58	9958078.9	3316	2.0	7.4	13.8
48	815782.3	9958082	3368	2.0	7.6	12.7
49	815738.97	9958088.1	3357	2.0	7.3	13.2
50	815717.31	9958088.1	3358	2.0	8.0	13.5
51	815955.53	9957860.6	3346	2.0	7.6	13.4
52	815664.73	9958180.4	3342	2.0	8.0	13.4
53	815646.18	9958220.3	3350	2.0	7.5	13.8
54	815612.14	9958254.2	3363	2.0	7.8	13.6
55	816054.42	9957888	3382	2.0	7.9	13.5
56	816093.4	9957861.8	3430	2.0	7.8	13.5
57	816122.48	9957829.1	3394	2.0	8.0	13.0
58	816153.11	9957803.1	3386	2.0	8.0	12.9
59	816190.21	9957780.7	3370	2.0	7.6	12.8
60	816217.59	9957753.4	3358	2.0	7.9	12.7
61	816257.93	9957729.4	3342	2.0	7.7	12.7
62	816304.94	9957716	3330	2.0	7.9	12.6
63	816326.88	9957699.4	3348	2.0	7.5	12.6
64	815745.26	9958395.5	3348	2.0	7.5	12.1
65	815780.85	9958395.1	3350	2.0	7.5	12.3
66	815830.33	9958379.6	3351	2.0	7.5	13.1

CONTINÚA



67	815873.1	9958364.7	3351	2.0	7.2	13.0
68	815921.22	9958351.5	3353	2.0	7.6	13.1
69	815964.57	9958346.8	3354	2.0	7.8	13.2
70	816015.35	9958332.4	3353	2.0	7.7	13.3
71	816052.11	9958320.2	3354	2.0	7.0	13.0
72	816226.46	9958306.2	3361	2.0	7.0	12.9
73	816269	9958260.3	3355	2.0	7.0	12.8
74	816301.66	9958275.1	3360	2.0	7.1	12.8
75	816360.05	9958263.8	3358	2.0	6.9	12.7
76	816391.68	9958269.4	3357	2.0	7.2	12.6
			Media	3.1	7.4	12.8

Para la Laguna Papallacta, el promedio o media de pH de los datos obtenidos fue 7.4 (ver tabla 13), encontrándose dentro de los límites establecidos en la tabla 1 del libro VI del TULSMA Anexo 1 (Ministerio del Ambiente de la República del Ecuador, 2015).

También, los datos de pH del agua de la laguna Papallacta obtenidos en este estudio se encuentran entre el rango de 6.9 a 8; estos valores de pH fueron parecidos a los valores de pH obtenidos en la investigación de Molina Santos, Terneus Jácome, Yáñez Morretta y Cueva Sánchez (2018) donde se obtuvieron valores de pH entre 7 a 9 de la laguna.

Los datos de las muestras de agua de la Laguna Papallacta tuvieron un valor de media o promedio de temperatura de 12.8 °C (ver tabla 13), ubicándose dentro de los límites establecidos en la tabla 12 del libro VI del TULSMA Anexo 1 (Ministerio del Ambiente de la República del Ecuador, 2015).

Además, cabe mencionar que los datos de temperatura (°C) de las muestras de la laguna Papallacta obtenidos en este estudio se encuentran entre el rango de 12 a 13.9 (°C) con una

media de 12.8°C; este valor de temperatura promedio fue similar al obtenido en la investigación de Villacreces (2015) donde se obtuvo un valor promedio de temperatura de 12.7 °C.

4.1.1.1.2 Parámetros de laboratorio

- **Sulfatos, Nitratos y Turbidez**

En la tabla 14 se indica el resumen de los diferentes parámetros analizados en el laboratorio de Medio Ambiente de la Carrera de Ingeniería Geográfica y Medio Ambiente de la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE”.

Tabla 14

Resumen de los parámetros analizados en laboratorio

Muestra	Oeste (m)	Sur (m)	Z (m)	Profundidad (m)	Sulfatos (mg/l)	Nitratos (mg/l)	Turbidez (UTN)
39	816054.57	9957879	3354	2	39	3.1	10.0
40	816023.63	9957894.4	3355	2	39	1.9	-
41	816008.16	9957909.7	3425	2	40	2.2	3.0
42	815955.56	9957949.7	3348	2	40	1.7	-
43	815921.53	9957980.5	3368	2	52	4.2	-
44	815875.11	9957998.9	3344	2	48	1.4	6.0
45	815834.89	9958020.5	3346	2	41	1.5	-
46	815813.24	9958057.4	3344	2	49	5.0	469.0
47	815791.58	9958078.9	3316	2	38	1.2	-
48	815782.3	9958082	3368	2	54	1.9	19.0
49	815738.97	9958088.1	3357	2	10	1.3	-
50	815717.31	9958088.1	3358	2	39	1.4	-
51	815955.53	9957860.6	3346	2	42	2.5	-

CONTINÚA



52	815664.73	9958180.4	3342	2	37	1.2	-
53	815646.18	9958220.3	3350	2	40	1.7	-
54	815612.14	9958254.2	3363	2	38	1.4	18.0
55	816054.42	9957888	3382	2	37	0.8	-
56	816093.4	9957861.8	3430	2	40	1.4	38.0
57	816122.48	9957829.1	3394	2	39	1.9	55.0
58	816153.11	9957803.1	3386	2	39	0.9	-
59	816190.21	9957780.7	3370	2	38	1.3	-
60	816217.59	9957753.4	3358	2	36	1.0	-
61	816257.93	9957729.4	3342	2	37	1.2	-
62	816304.94	9957716	3330	2	34	3.5	200.0
63	816326.88	9957699.4	3348	2	49	2.2	0.0
64	815745.26	9958395.5	3348	2	49	2.2	26.0
65	815780.85	9958395.1	3350	2	53	5.2	30.0
66	815830.33	9958379.6	3351	2	71	5.9	38.0
67	815873.1	9958364.7	3351	2	61	1.6	62.0
68	815921.22	9958351.5	3353	2	56	1.3	86.0
69	815964.57	9958346.8	3354	2	44	4.0	76.0
70	816015.35	9958332.4	3353	2	40	3.5	85.0
71	816052.11	9958320.2	3354	2	44	3.4	81.0
72	816226.46	9958306.2	3361	2	42	0.4	153.0
73	816269	9958260.3	3355	2	41	1.9	99.0
74	816301.66	9958275.1	3360	2	41	2.3	19.0
75	816360.05	9958263.8	3358	2	39	1.4	24.0
76	816391.68	9958269.4	3357	2	39	2.1	27.0
Media					42.5	2.2	70.6

Para la Laguna Papallacta, el promedio o media de concentración de sulfatos de los datos obtenidos fue 42.5 mg/l (ver Tabla 14), encontrándose dentro de los límites establecidos en la tabla 1 del libro VI del TULSMA Anexo 1 (Ministerio del Ambiente de la República del Ecuador, 2015).

Los datos de concentración de nitratos de las muestras de agua de la Laguna Papallacta tuvieron un valor de media o promedio de 2.2 mg/l (ver Tabla 14), ubicándose dentro de los límites establecidos en la tabla 1 del libro VI del TULSMA Anexo 1 (Ministerio del Ambiente de la República del Ecuador, 2015).

Los datos de las muestras de agua de la Laguna Papallacta tuvieron un valor de media o promedio de turbidez de 70.6 UTN (ver Tabla 14), ubicándose dentro de los límites establecidos en la tabla 1 del libro VI del TULSMA Anexo 1 (Ministerio del Ambiente de la República del Ecuador, 2015).

- **Concentración de Arsénico**

En la tabla 15 se muestra el resumen de los datos obtenidos de la variable principal de estudio (Concentración de arsénico) analizados en el laboratorio del Centro de Nano ciencia y Nanotecnología de la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE”.

Tabla 15

Resumen de los datos de concentración de As-Laguna Papallacta

Muestra	Oeste	Sur	Z	Profundidad	Concentración	Concentración
	(m)	(m)	(m)	(m)	(mg/l)	(µg/l)
1	815113	9958528	3306	8.0	0.3	299.0
2	815767	9958403	3358	10.0	0.3	281.0
3	815833	9958380	3363	12.0	0.1	120.6

CONTINÚA



4	815937	9958349	3364	9.0	0.2	179.0
5	816225	9958270	3364	5.0	0.1	140.0
6	816374	9958262	3366	2.0	0.1	64.2
7	816563	9958162	3368	5.0	0.1	73.8
8	816566	9958170	3371	7.0	0.3	262.2
9	816702	9958078	3368	13.0	0.1	108.6
10	816062	9957877	3364	7.0	0.1	117.6
11	816137	9957815	3366	12.0	0.1	63.0
12	816422	9957870	3239	15.0	0.3	289.0
13	816406	9957924	3262	13.0	0.7	652.0
14	816451	9957976	3277	8.0	0.1	101.0
15	816119	9958005	3317	10.0	0.4	403.0
16	815886	9958155	3325	15.0	0.3	305.0
17	815647	9958293	3330	4.0	0.1	103.0
18	815494	9958381	3335	3.0	0.2	194.0
19	816151	9958236	3342	15.0	0.3	315.0
20	816369.1	9958055.3	3382.7	4.0	0.2	189.0
21	816188.6	9958141.9	3385.05	2.0	0.2	166.0
22	816016.9	9958213.3	3383.62	2.0	0.1	88.0
23	815839.9	9958260.8	3382.07	2.0	0.2	190.0
24	815746.5	9958310	3383.21	2.0	0.5	500.0
25	815635.2	9958357.8	3384.69	2.0	0.0	45.2
26	815661.5	9958274.9	3384.39	2.0	0.1	127.0
27	815724.6	9958228.9	3382.41	2.0	0.2	219.0
28	815840.7	9958171.6	3382.09	2.0	0.4	354.0
29	815971.4	9958087.2	3384.68	2.0	0.3	291.0

CONTINÚA



30	816062.5	9958034.2	3382.78	2.0	0.4	433.0
31	816142.2	9958001.7	3384.04	2.0	0.3	287.0
32	816241.8	9957950.3	3381.79	2.0	0.3	301.0
33	816297.4	9957879.3	3382.89	2.0	0.3	286.0
34	816160.1	9957932.4	3382.65	2.0	0.3	321.0
35	815974.7	9958041.1	3381.18	2.0	0.3	299.0
36	815831.9	9958092.8	3381.44	2.0	0.3	303.0
37	815919.9	9958376	3384.34	2.0	0.3	282.0
38	816491.3	9958118.7	3378.4	2.0	0.3	272.0
39	816054.6	9957879	3354	2.0	0.2	169.0
40	816023.6	9957894.4	3355	2.0	0.2	214.0
41	816008.2	9957909.7	3425	2.0	0.1	131.0
42	815955.6	9957949.7	3348	2.0	0.2	248.0
43	815921.5	9957980.5	3368	2.0	0.1	91.2
44	815875.1	9957998.9	3344	2.0	0.0	39.9
45	815834.9	9958020.5	3346	2.0	0.1	88.2
46	815813.2	9958057.4	3344	2.0	0.3	308.0
47	815791.6	9958078.9	3316	2.0	0.3	251.0
48	815782.3	9958082	3368	2.0	0.2	191.0
49	815739	9958088.1	3357	2.0	0.0	18.0
50	815717.3	9958088.1	3358	2.0	0.6	597.0
51	815955.5	9957860.6	3346	2.0	0.2	200.0
52	815664.7	9958180.4	3342	2.0	0.3	336.0
53	815646.2	9958220.3	3350	2.0	0.1	89.4
54	815612.1	9958254.2	3363	2.0	0.1	114.0
55	816054.4	9957888	3382	2.0	0.3	347.0

CONTINÚA



56	816093.4	9957861.8	3430	2.0	0.3	348.0
57	816122.5	9957829.1	3394	2.0	0.3	323.0
58	816153.1	9957803.1	3386	2.0	0.1	116.0
59	816190.2	9957780.7	3370	2.0	0.3	329.0
60	816217.6	9957753.4	3358	2.0	0.4	362.0
61	816257.9	9957729.4	3342	2.0	0.3	331.0
62	816304.9	9957716	3330	2.0	0.1	99.9
63	816326.9	9957699.4	3348	2.0	0.3	313.0
64	815745.3	9958395.5	3348	2.0	0.4	411.0
65	815780.9	9958395.1	3350	2.0	0.1	66.0
66	815830.3	9958379.6	3351	2.0	0.0	37.0
67	815873.1	9958364.7	3351	2.0	0.0	49.9
68	815921.2	9958351.5	3353	2.0	0.1	101.0
69	815964.6	9958346.8	3354	2.0	0.3	284.0
70	816015.4	9958332.4	3353	2.0	0.3	336.0
71	816052.1	9958320.2	3354	2.0	0.1	50.0
72	816226.5	9958306.2	3361	2.0	0.1	74.9
73	816269	9958260.3	3355	2.0	0.2	167.0
74	816301.7	9958275.1	3360	2.0	0.1	130.0
75	816360.1	9958263.8	3358	2.0	0.3	273.0
76	816391.7	9958269.4	3357	2.0	0.3	318.0
			Media	3.8	0.2	223.4

Para la Laguna Papallacta, el promedio o media de concentración de arsénico de los datos obtenidos fue 0.22 mg/l (ver Tabla 15), encontrándose fuera de los límites establecidos en la tabla 1 del libro VI del TULSMA Anexo 1 (Ministerio del Ambiente de la República del Ecuador, 2015).

Los datos de concentraciones de arsénico de la laguna Papallacta obtenidos en este estudio se encuentran entre el rango de 18 a 652 $\mu\text{g/l}$; estas concentraciones evidentemente son inferiores a las concentraciones obtenidas en la investigación de Zuñiga (2009) donde se obtuvieron concentraciones de arsénico entre 677 a 1203 $\mu\text{g/l}$ de la laguna. Esta disminución de concentraciones de arsénico de la laguna es atribuida a la dilución efectuada por la época de invierno en este cuerpo de agua; pues los muestreos efectuados para la obtención de muestras de agua se realizaron en septiembre 2018, mes correspondiente al período de invierno (ver Anexo 1 y 2) (Galarza Álvarez, 2014). La laguna en época de invierno aumenta su volumen de 8000000 m^3 a un volumen aproximado de 13500000 m^3 (Zuñiga Salazar, 2009).

Además cabe recordar que este efecto de dilución también sucedió para las muestras obtenidas en enero 2019, mes que aunque no corresponde al período de invierno fue época de lluvias (ver Anexo 3). En enero en la parte oriental del país ocurrieron lluvias de intensidad variable, con mayor incidencia en la zona centro-sur y estribaciones de la cordillera oriental, en la ciudad de Puyo se registró 53.4 mm de lluvia entre el día de 18 y 19 de enero del 2019, según el mapa del INAMHI (ver Anexo 4) se presentaron lluvias en las últimas horas en las provincias de Guayas, Napo y Pastaza. (Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias, 2019). Estas lluvias lograron reducir la concentración de arsénico en la laguna, pues esta llega a tener un volumen aproximado 13500000 m^3 en épocas lluviosas.

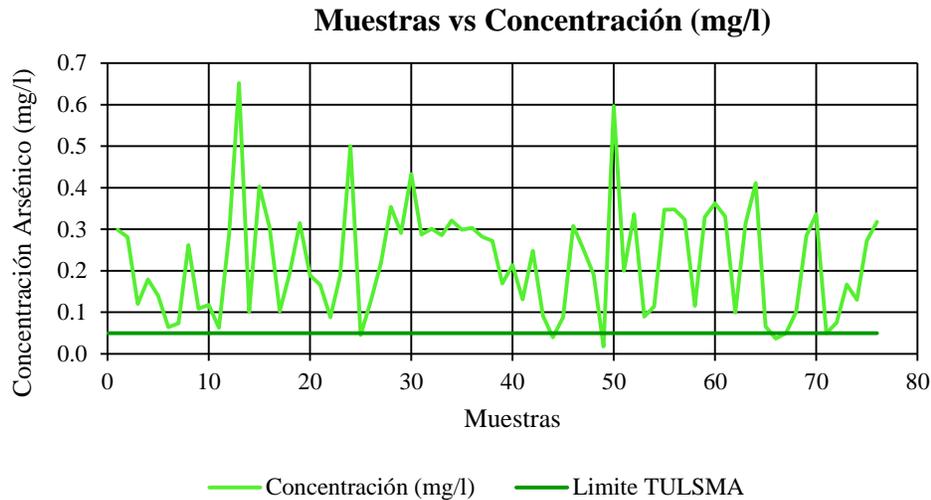


Figura 52. Muestras vs Concentración (mg/l)

Para la Laguna Papallacta, visualizamos que la figura 52 indica que 6 muestras de las 76 muestras de agua se encuentran dentro de los límites establecidos en la tabla 1, 2, 3, 6, 8, 12 y 13 del libro VI del TULSMA Anexo 1 (Ministerio del Ambiente de la República del Ecuador, 2015).

4.2 Diseño Experimental

En la tabla 16 se indica el resumen de los datos de las concentraciones de arsénico inicial de las 18 unidades experimentales analizadas en el laboratorio del Centro de Nano ciencia y Nanotecnología de la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE”.

Tabla 16

Datos de concentración de As inicial de las unidades experimentales

Concentración teórica(ppm)	Concentración experimental (mg/l)
150	153
150	156

CONTINUÍA



150	167
100	128
100	117
100	108
50	47.3
50	45.6
50	52.4
25	24.1
25	22.9
25	26.8
10	10.4
10	9.81
10	10.6
5	8.34
5	6.76
5	5.46

Los datos de las concentraciones de arsénico inicial de las 18 unidades experimentales (ver tabla 16) analizadas en el laboratorio del Centro de Nano ciencia y Nanotecnología muestran que las diluciones creadas poseen errores experimentales; estos son el resultado de errores de apreciación o instrumentales, errores aleatorios o errores sistemáticos. Estos errores se definen como la diferencia entre el valor obtenido y el valor esperado (Universidad de Sevilla, 2019).

En la tabla 17 se indica la concentración inicial de hierro y manganeso de las nanopartículas elaboradas y analizadas en el laboratorio del Centro de Nano ciencia y Nanotecnología de la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE”.

Tabla 17*Concentraciones iniciales de Fe y Mn de las nanopartículas*

Concentraciones Iniciales de Nanopartículas de Fe y Mn		
Concentraciones	Concentración	Concentración
Iniciales	experimental (µg/l)	experimental (mg/l)
Hierro	3501	3.501
Manganeso	3012	3.012

En la tabla 18 se indica el resumen de los datos de las concentraciones de arsénico finales de las 18 unidades experimentales aplicadas nanopartículas de manganeso, analizados en el laboratorio del Centro de Nano ciencia y Nanotecnología de la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE”.

Tabla 18*Concentraciones finales de As aplicadas nanopartículas de Mn*

Unidades experimentales aplicadas Np de Mn		
Muestras	Concentración experimental	Concentración
	inicial	experimental final (mg/l)
	(mg/l)	
1	153	20.4
2	156	20.4
3	167	20.9
4	128	16.1
5	117	14.3
6	108	13.4
7	47.3	12.7
8	45.6	12.3
9	52.4	14.4
10	24.1	11.7

CONTINÚA 

11	22.9	10.9
12	26.8	12.6
13	10.4	4.91
14	9.81	4.67
15	10.6	4.93
16	8.34	3.83
17	6.76	3.36
18	5.46	2.53

Los datos de las concentraciones de arsénico final de las 18 unidades experimentales (ver tabla 18) muestran una reducción considerable con respecto a las concentraciones de arsénico inicial de las mismas. Esta reducción se debe a que los óxidos de manganeso transforman al arseniato en un período corto de tiempo; estos cationes se adsorben con el dióxido de manganeso proporcionándole una carga positiva que produce una óptima eliminación de arseniato inicial, reduciendo la concentración de arsénico (Caniyilmaz , 2005).

Un ejemplo, es el estudio desarrollado en Grecia en donde se elaboró un nanoadsorbente de Feroxihito de manganeso tetravalente monofásico altamente eficiente para adsorber tanto As (III) como As (V). El proceso de síntesis implicó la coprecipitación de FeSO_4 y KMnO_4 en un proceso continuo a escala de kilogramo, en ácido y ambientes fuertemente oxidantes. El material producido se identificó como un oxihidróxido de Fe (III) - Mn (IV) binario en donde el manganeso (IV) se distribuyó homogéneamente en la unidad de cristal, mientras que un hueco de segundo orden eficiente en la oxidación de As (V) debido a la presencia de Mn (IV) que captura debido a la alta densidad de carga superficial positiva y estructuración; el oxihidróxido mantiene la alta capacidad de adsorción para As (V) de un solo oxihidróxido de Hierro. Estas

nanopartículas mostraron una morfología esférica hueca de aproximadamente 200 nm aglomeradas unas a lado de otras parecida a las nanopartículas del caso de los oxihidróxidos de Fe individuales (ver Anexo 5) (Tresintsi , y otros, 2013).

Otro estudio de remoción de arsénico en agua de mar contaminada retenida en moluscos con nanopartículas de ferrita de espinela de manganeso fue realizado en laboratorio en Portugal. Este trabajo obtuvo nanopartículas de $MnFe_2O_4$ preparados por la hidrólisis oxidativa química de una mezcla de $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ y $MnSO_4 \cdot H_2O$ en condiciones alcalinas a pH 8, estas partículas de tamaño nanométrico se emplearon para eliminar el agua contenida durante de 24 horas por los bivalvos recogidos en campo .Estas partículas manométricas poseen una con una estructura esferoidal con un tamaño de 75 ± 15 nm con propiedades magnéticas que ayudan a las propiedades superficiales aumentando el área de contacto para atrapar de manera rápida el contaminante (ver Anexo 6) (Coppola, y otros, 2019).

En esta investigación se elaboraron nanopartículas de Manganeso de 220 nanómetros utilizando síntesis verde empleando extracto de borjón, cloruro de manganeso (II) monohidratado e hidróxido de Sodio. El comportamiento de estas nanopartículas fue óptima debido a su estructura y alta densidad de carga superficial positiva alcanzando una eliminación promedio de 67.6 % lo cual indica que se alcanzó una remoción recomendable de arsénico (V) para Mn / As 1:1 a un pH entre el intervalo de 9 a 10. Es necesario recalcar que los estudios anteriormente mencionados presentan algunas similitudes importantes con las nanopartículas obtenidas en este trabajo, estas similitudes son las propiedades estructurales y superficiales que poseen las nanopartículas de Manganeso que benefician a una recomendable remoción de arsénico (V) que permite alcanzar altos porcentajes de remoción.

En la tabla 19 se indica el resumen de los datos de las concentraciones de arsénico finales de las 18 unidades experimentales aplicadas nanopartículas de hierro, analizados en el laboratorio del Centro de Nano ciencia y Nanotecnología de la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE”.

Tabla 19
Concentraciones finales de As aplicadas nanopartículas de Fe
Unidades experimentales aplicadas Np de Fe

Muestras	Concentración experimental	Concentración experimental final
	inicial(mg/l)	(mg/l)
1	153	47.2
2	156	45.3
3	167	46.8
4	128	39.8
5	117	37.4
6	108	32.1
7	47.3	14.6
8	45.6	14.3
9	52.4	16.1
10	24.1	7.03
11	22.9	6.95
12	26.8	8.34
13	10.4	5.12
14	9.81	4.73
15	10.6	5.24
16	8.34	3.86
17	6.76	3.31
18	5.46	2.67

Los datos de las concentraciones de arsénico final de las 18 unidades experimentales (ver tabla 19) muestran una reducción considerable con respecto a las concentraciones de arsénico inicial de las mismas. Este resultado es causado por la alta capacidad que tienen las nanopartículas de hierro para remover arsénico como se muestran en algunos estudios.

Un ejemplo, es el estudio de remoción de arsénico (V) en un medio acuoso empleando nanopartículas magnéticas efectuado en la República Checa; esta investigación empleó la síntesis de método químico húmedo y utilizó cloruro de Hierro (III) y Tetrahidrato de cloruro de hierro (II). El comportamiento de estas nanopartículas fue superparamagnético y de fuerte respuesta magnética; pues las mismas demostraron que la capacidad de adsorción de las nanopartículas sorbentes depende no solo de su área de superficie sino también de una forma en que están organizadas debido a las fuertes interacciones magnéticas entre partículas. Esta investigación estableció un tipo de estructura esférica, mesoporosa hueca con un tamaño entre 2 - 8 nm (ver Anexo 8) que ayuda significativamente la cantidad de iones de arseniato que pueden adsorberse. Se alcanzó una eliminación del 100% de arseniato para Fe / As 20: 1 y un pH en el rango de 5 a 7.6 (Kilianová, y otros, 2013).

Otro estudio de remoción de arsénico en agua por nanopartículas magnéticas fue realizado en México, en este trabajo se sintetizó nanopartículas metálicas mediante la técnica ACCVD (Aerosol Assisted Chemical Vapour Deposition) logrando obtener nanopartículas magnéticas de tamaño entre 195 - 272 nm sólidas y esféricas; cabe señalar la fase magnética y el tamaño de las partículas es muy importante para eliminar arsénico. Se utilizó como concentración inicial (20 ppbs) de arsénico que luego de la aplicación de nanopartículas de hematita se redujo completamente alcanzando una remoción del 100 % (Barrientos, Matutes, & Miki, 2013) .

Existe un trabajo de elaboración de nanopartículas de Hierro efectuado en Chihuahua aplicadas a agua de consumo humano, en este estudio se lograron obtener nanopartículas con un tamaño promedio de 150 nm de forma esférica, gran porosidad con materiales huecos y cristales pequeños que tienden a aglomerarse mostrando una morfología típica de la partículas a nivel nanométrico de óxido de Hierro (Ver Anexo 7). Estas cualidades morfológicas anteriormente mencionadas hacen a estas partículas manométricas poseer propiedades magnéticas únicas que ayudaron extender el área de contacto entre estos dos elementos; dando como consecuencia un alto porcentaje de remoción (90- 100 %) de arsénico (Monárrez Cordero, 2011).

En esta investigación se elaboraron nanopartículas de Hierro de 220 nanómetros utilizando síntesis verde empleando extracto de borjón, cloruro de hierro (III) hexahidratado e hidróxido de Sodio. El comportamiento de estas nanopartículas fue magnético ya que el mismo al realizar la síntesis se pudo visualizar pequeñas estructuras que podían separarse de la solución mediante un simple imán de mano; también, estas nanopartículas lograron una eliminación promedio de 63.6 % de arsénico (V) para Fe/ As 1:1 a un pH entre el intervalo de 9 a 10. Es necesario recalcar que los estudios anteriormente mencionados presentan algunas similitudes importantes con las nanopartículas obtenidas en este trabajo, estas similitudes son las propiedades magnéticas que poseen las nanopartículas de Hierro que ayudan a expandir la superficie de estas partículas beneficiando a una óptima remoción de arsénico (V) que permite alcanzar altos porcentajes de remoción. Por otro lado cabe señalar que las nanopartículas creadas en este estudio fueron a elaboradas a un pH básico lo cual no sucedió en el primer estudio puesto que este aplico un pH de 5 a 7.5 para la formación de las nanopartículas de óxido de hierro (III) que lograron una

eliminación de casi el 100%; el primer estudio señala que un pH bajo debe ser utilizado para remover Arsénico (V) con una mayor eficiencia de adsorción (Kilianová, y otros, 2013) .

4.3 Porcentaje de Remoción

4.3.1 Porcentaje de Remoción de As

Los resultados de la tabla 20 condensan el porcentaje de remoción de arsénico de las muestras experimentales aplicadas nanopartículas de manganeso usando la ecuación (17) de remoción anteriormente indicada.

Tabla 20

Porcentaje de remoción de As aplicadas nanopartículas de Mn

Porcentaje de remoción de Arsénico

Muestras	% Remoción
1	86.7
2	86.9
3	87.5
4	87.4
5	87.8
6	87.6
7	73.2
8	73.0
9	72.5
10	51.5
11	52.4
12	53.0
13	52.8
14	52.4
15	53.5

CONTINÚA



16	54.1
17	50.3
18	53.7
Media	67.6

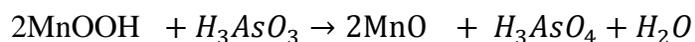
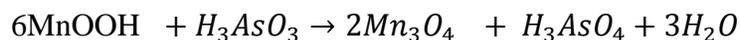
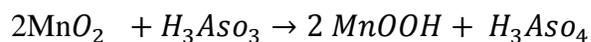
Los datos de porcentaje de remoción de arsénico de las 18 unidades experimentales aplicadas nanopartículas de manganeso muestran un valor de media o promedio de 67.6 % (ver tabla 20) lo cual indica que se alcanzó una remoción óptima. Este resultado es causado por mecanismos de remoción de arsénico con nanopartículas de Manganeso como se evidencia en algunos estudios.

Se efectuó un estudio en Chicago, Illinois acerca la Adsorción y eliminación de arsénico (V) usando cristalino óxido de manganeso (II, III): cinética, equilibrio, efecto del pH y la fuerza iónica. En este estudio se explica la especiación de As (V) dependiendo del pH y la estabilidad correspondiente de los valores de pH de las especies para As (V). Para un pH de 0-2 se consigue la especie H_3AsO_4 , pH de 3-6 se obtiene la especie $H_2AsO_4^-$, pH de 7-11 se alcanza la especie $HAsO_4^{2-}$ y AsO_4^{3-} para un pH de 12-14. Para determinar el pH óptimo para adsorción de As (V) en Mn_3O_4 , el sorbente Mn_3O_4 adsorbió más efectivamente arseniato en el intervalo de pH 2.0–8.0 con casi 92-97% de eliminación de arsénico. Se obtuvo una adsorción de arsénico más fuerte sobre el Mn_3O_4 a valores de pH más bajos. Adsorción de OH o HC en el sitio neutral de Metal-OH da como resultado carga superficial neta de Mn_3O_4 en la interfaz de solución sólida.

La menor adsorción de As (V) puede deberse a la disminución atracción electrostática entre las especies aniónicas As (V) y la superficie menos positiva de Mn_3O_4 . La menor adsorción de As (V) a $pH > 7.32$ puede atribuirse a un aumento en repulsión entre las especies negativamente

cargadas As (V) y los sitios de superficie cargados negativamente de Mn_3O_4 . Además, la disminución en la absorción de As (V) en Mn_3O_4 a pH más alto podría deberse a un aumento en la competencia iones hidroxilo (OH) para sitios de adsorción con aumento pH, que puede causar una reducción en la adsorción. Se obtuvieron resultados quienes investigaron la adsorción de As (V) en compuestos de óxido de grafeno reducido en magnetita y nanocompuestos de óxido de grafito reducido en magnetita $F_3O_4-MnO_2$ (Babaeiveli, Khodadoust, & Bogdan, 2014).

Otro ejemplo fue la investigación realizada en China, en esta investigación se estudió la adsorción y eliminación de arsénico por óxido binario ferromanganeso estabilizado con almidón en agua. Este trabajo averiguo el mecanismo de adsorción de as por almidón-FMBO en agua. Se realizó la adsorción de As en igual proporción de FeOOH, los adsorbentes disminuyeron demostrando que FeOOH era un componente activo en el proceso de adsorción. Las áreas de MnOOH en FMBO y almidón FMBO se hizo más grande durante el proceso de adsorción, lo que indica que la proporción de MnOOH aumentada. Se explica por el hecho de que MnO_2 se convirtió en MnOOH y luego se redujo a los óxidos de manganeso. El primero reacciona más rápido que este último, en otras palabras, el contenido de MnOOH acumulado durante la adsorción de As. Las ecuaciones de reacción relevantes son:



En esta investigación se evidenció que la abundancia del grupo hidroxilo logro que las partículas de Fe-Mn formaran enlaces de hidrógenos intermoleculares estables y fuertes, lo que benefició la estabilidad de las partículas. EL FMBO estabilizado, se atribuyó a las vibraciones

de estiramiento de C-H, C-O e iones de manganeso de hierro, respectivamente. El pico de enlace de estiramiento O – H después de la combinación de FMBO, que indicó que el almidón se había unido al complejo FMBO. En este caso, se visualizó la rotura de Fe – OH que produce una cantidad significativa de –OH y Fe, que están involucrados en el proceso de adsorción de arsénico. Además, los cambios en el entorno superficial de los iones de hierro y el estado de valencia de los iones de manganeso condujeron al cambio y debilitamiento.

En el proceso de síntesis el Hidróxido de Sodio es agregado a gotas en el cloruro de Manganeso (II) hasta un pH próximo a 10; el resultado de la interacción entre estas soluciones da como resultados los compuesto de Hidróxido de Manganeso (II) e Hidróxido de Sodio. El Hidróxido de Manganeso (II) se precipita debido a lo cual es filtrado a través de filtros de 0.45 y 0.22 μm obteniéndose nanopartículas de Manganeso de 220 nm. Estas nanopartículas de Manganeso al interactuar con las muestras experimentales As (V) producen soluciones de Hidróxido de Manganeso (II), HAsO_4^{2-} que se alcanzan a un pH de 7-11 como se menciona en el estudio realizado en Illinois en donde se explica la especiación de As (V) dependiendo del pH y la estabilidad correspondiente de los valores de pH genera diferentes especies arsenales. Además, en el estudio efectuado en China sobre Adsorción y eliminación de arsénico por un nuevo óxido binario ferromanganeso estabilizado con almidón en agua a la Adsorción se afirmó la presencia de OH o HC dando lugar a hidróxidos (Metal-OH) como se generó en este estudio $\text{Mn}(\text{OH})_2$ y Na (OH).

Los resultados de la tabla 21 condensan el porcentaje de remoción de arsénico de las muestras experimentales aplicadas nanopartículas de Hierro usando la ecuación de remoción (Ecuación 17) anteriormente indicada.

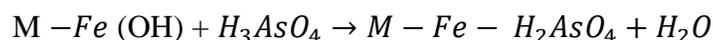
Tabla 21
Porcentaje de remoción de As aplicadas nanopartículas de Fe
Porcentaje de remoción de Arsénico

Muestras	% Remoción
1	69.2
2	71.0
3	72.0
4	68.9
5	68.0
6	70.3
7	69.1
8	68.6
9	69.3
10	70.8
11	69.7
12	68.9
13	50.8
14	51.8
15	50.6
16	53.7
17	51.0
18	51.1
Media	63.6

Los datos de porcentaje de remoción de arsénico de las 18 unidades experimentales aplicadas nanopartículas de hierro muestran un valor de media o promedio de 63.6 % (ver tabla 21) lo cual indica que se alcanzó una remoción óptima como se muestran en algunos estudios.

En esta investigación se elaboraron nanopartículas de Hierro de 220 nanómetros utilizando síntesis verde empleando extracto de borjón, cloruro de hierro (III) hexahidratado e hidróxido de Sodio. En el proceso de síntesis el Hidróxido de Sodio es agregado a gotas en el cloruro de Hierro (III) hasta un pH próximo a 10; el resultado de la interacción entre estas soluciones da como resultados los compuesto de Hidróxido de Hierro (III) e Hidróxido de Sodio. El Hidróxido de Hierro (III) se precipita debido a lo cual es filtrado a través de filtros de 0.45 y 0.22 μm obteniéndose nanopartículas de Hierro de 220 nm. Estas nanopartículas de Hierro al interactuar con las muestras experimentales As (V) producen soluciones de Hidróxido de Hierro (III) y $\text{H}_3\text{AsO}_4^{-2}$.

Un ejemplo de mecanismo de remoción arsénico parecido al ocurrido en la investigación efectuada fue el estudio de eliminación de arsénico con perlas de alginato cargadas con óxido de hierro; en esta investigación menciona que la cinética de eliminación de arsénico es la difusión de líquido en la porosidad del lecho. Sin embargo, el mecanismo principal responsable de la eliminación de arsénico es la reacción química entre hierro y arsénico. El arsénico (V) forma compuestos estables de coordinación con óxidos de hierro, empleando la adsorción a través de la siguiente reacción:

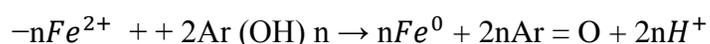


El producto de esta reacción es el arseniato férrico; esta reacción da como resultado debido a la extensión de la formación compleja entre arseniatos y hierro depende de la proporción de concentración de arseniatos a la concentración de OH. El grupo OH posee una afinidad mayor por el Fe (III) y por el arseniato, ambos aniones compiten con Fe (III) por los mismos sitios de adsorción. Cabe mencionar que el paso de preoxidación es esencial para alcanzar la máxima eliminación general de arsénico. Este paso de oxidación puede ser efectuado por la aplicación

de reactivos químicos, tales como ozono, peróxido de hidrógeno, cloro (Zouboulis & Katsoyiannis, 2002).

Otro estudio en donde se explica el mecanismo de remoción de arsénico con las nanopartículas de Hierro es el trabajo de Preparación de partículas de hierro a nanoescala (óxido, oxihidróxidos y valencia cero) derivadas de los arándanos: reactividad, caracterización y mecanismo de eliminación del arseniato. En esta investigación se utiliza un método alternativo de síntesis para obtener un producto ecológico. Estas nanopartículas formadas por extracto de blueberries, Cloruro de Hierro (III) y Ácido Clorhídrico; estas nanopartículas al poseer extracto acuoso de frutas generó nanopartículas con menos aglomeración. El objetivo principal del extracto es su capacidad por medio de los polifenoles para formar complejos con Fe y otros iones metálicos debido a la presencia de grupos funcionales que aumentan la capacidad de reducir el ion metálico. El poder reductor del extracto se basará en el disolvente utilizado su tipo y su concentración de compuestos presentes, especialmente polifenoles, que permite la reducción del Fe^{3+} a través de un mecanismo de transferencia de electrones.

La estructura de los polifenoles mejora la estabilidad de las nanopartículas que se forman al tapar, lo que provoca un aumento de la repulsión electrostática y / o estérica entre las partículas y una disminución de las interacciones de van der Waals y la fuerza magnética, lo que conduce a una reducción aglomeración y oxidación de las nanopartículas (Manquián-Cerda, Cruces, Rubio, Reyes, & Arancibia-Miranda, 2017) . El mecanismo de síntesis propuesto a partir de polifenoles en esta investigación se plasmó en la ecuación:



Donde Ar es el grupo fenilo y n es el número de grupos hidroxilo oxidado por Fe^{2+} . La posición de los grupos hidroxilo en el fenólico. Además, las nanopartículas de hierro son altamente eficientes para la eliminación de arsénico, y estas características se basan, en general, en la mayor afinidad de este oxianión para sitios activos del tipo $\equiv Fe-OH$ y $\equiv Fe-O-OH$, que predominan en la superficie de estos sustratos. Sin embargo, debido a la estructura de tipo núcleo-cubierta de estas nanopartículas tienen múltiples procesos de eliminación; como adsorción, absorción, precipitación, coprecipitación, oxidación y reducción, que predominarán dependiendo de la naturaleza redox del contaminante y las condiciones del medio (pH, fuerza iónica y potencial redox) (Manquián-Cerda, Cruces, Rubio, Reyes, & Arancibia-Miranda, 2017).

Tabla 22*Concentración de Mn final de las unidades experimentales***Presencia de Manganese en las NPs de Manganese al final del tratamiento**

Muestras	Concentración experimental (mg/l)	Concentración experimental (mg/l)
1	3.012	1.267
2	3.012	1.366
3	3.012	1.286
4	3.012	1.357
5	3.012	1.361
6	3.012	1.475
7	3.012	1.338
8	3.012	1.491
9	3.012	1.342
10	3.012	1.251
11	3.012	1.244

CONTINÚA



12	3.012	1.418
13	3.012	1.28
14	3.012	1.375
15	3.012	1.237
16	3.012	1.461
17	3.012	1.297
18	3.012	1.292

Los resultados de la tabla 22 condensan que los datos de concentraciones finales de manganeso muestran una reducción significativa, pues los valores de concentraciones finales son mayores o iguales a la mitad de sus concentraciones iniciales de manganeso. Esto se debe a la reacción de oxidación con el cloro que produce dióxidos de manganeso; los cuales se transforman en flócs de manganeso. Los flócs de manganeso son removidos mediante filtros logrando una reducción en las concentraciones de manganeso (Sánchez & Burbano, 2011).

En la tabla 23 se indica el resumen de los datos de las concentraciones de hierro finales de las 18 unidades experimentales aplicadas nanopartículas de hierro, analizadas en el laboratorio del Centro de Nano ciencia y Nanotecnología de la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE”.

Tabla 23

Concentración de Fe final de las unidades experimentales

Presencia de Hierro en las NPs de Hierro al final del tratamiento

Muestras	Concentración experimental inicial (mg/l)	Concentración experimental final (mg/l)
1	3.501	1.472
2	3.501	1.335

CONTINÚA



3	3.501	1.411
4	3.501	1.397
5	3.501	1.453
6	3.501	1.424
7	3.501	1.585
8	3.501	1.385
9	3.501	1.544
10	3.501	1.352
11	3.501	1.75
12	3.501	1.351
13	3.501	1.544
14	3.501	1.584
15	3.501	1.471
16	3.501	1.612
17	3.501	1.476
18	3.501	1.429

Los datos de las concentraciones de arsénico finales de las 18 unidades experimentales (ver tabla 23) muestran una reducción considerable con respecto a las concentraciones de hierro iniciales de las mismas. Esto se debe a la acción de subdivisión de las moléculas del Cloruro Férrico, transformándose en hidróxido Férrico. La oxidación del cloro con los compuestos de hierro logran crear flócs de hierro, los cuales son removidos mediante filtros logrando una reducción en las concentraciones de hierro (Sánchez & Burbano, 2011).

4.3.2 Porcentaje de presencia de Manganeso en las NPs al final del tratamiento

Los resultados de la tabla 24 condensan el porcentaje de presencia de manganeso de las muestras experimentales aplicadas nanopartículas de manganeso usando la ecuación (17) anteriormente indicada.

Tabla 24

Porcentaje de presencia de Mn en las NPs al final del tratamiento

Porcentaje de presencia de Manganeso en las NPs al final del tratamiento

Muestras	% de presencia de Mn
1	57.9
2	54.6
3	57.3
4	54.9
5	54.8
6	51.0
7	55.6
8	50.5
9	55.4
10	58.5
11	58.7
12	52.9
13	57.5
14	54.3
15	58.9
16	51.5
17	56.9
18	57.1
Media	55.5

Los datos de porcentaje de presencia de Mn en las NPs al final del tratamiento de las 18 unidades experimentales aplicadas nanopartículas muestran un valor de media o promedio de 55.5 % (ver tabla 24), esto indica que al mezclarse las Np de manganeso con el contaminante arsénico disminuyó la concentración inicial de manganeso de las Np de manganeso existiendo un 55,5% de Manganeso que no ha sido utilizado para remover el contaminante; esto se debe a la formación de hidróxidos de manganeso y su precipitación instantánea que logra disminuir la cantidad de Manganeso por medio de coagulación (Castro de Esparza, 2006).

Los resultados de la tabla 25 condensan el porcentaje de presencia de hierro de las muestras experimentales aplicadas nanopartículas de hierro usando la ecuación (17) anteriormente indicada.

Tabla 25

Porcentaje de presencia de Fe en las NPs al final del tratamiento

Porcentaje de presencia de Hierro en las NPs

al final del tratamiento

Muestras	% de presencia de Fe
1	58.0
2	61.9
3	59.7
4	60.1
5	58.5
6	59.3
7	54.7
8	60.4
9	55.9
10	61.4

CONTINÚA



11	50.0
12	61.4
13	55.9
14	54.8
15	58.0
16	54.0
17	57.8
18	59.2
Media	57.8

Los datos de porcentaje de presencia de Hierro en las NPs al final del tratamiento de las 18 unidades experimentales aplicadas nanopartículas muestran un valor de media o promedio de 57.8 % (ver tabla 25) esto indica que al mezclarse las Np de hierro con el contaminante arsénico disminuyó la concentración inicial de hierro existiendo un 57,8% de hierro que no ha sido utilizado para remover el contaminante. Esto se debe a la gran afinidad que existen entre los óxidos de hierro y las especies arsenicales que al interrelacionarse producen compuestos suspendidos. Estos compuestos suspendidos (flócs) son filtrados obteniendo así una concentración menor de Hierro (Rivera Huerta, Cortés Muñoz, Piña Soberanis, & Martín Domínguez, 2000) .

Fase Geográfica

4.4 Modelos Geoestadísticos

Para efectuar la creación del mapa de predicción de la variable principal se empleó el software ArcMap por medio de herramientas propias de este programa (Geostatistical Wizard); los mapas de predicción y errores de predicción de variables secundarias se utilizó inicialmente

el software R, se exportó este archivo en formato ASCII y luego importado al software ArcMap para su visualización. A continuación, se muestra el mapa de predicción de la variable principal y los mapas de predicción de las variables secundarias con sus respectivos mapas de errores en las figuras 53, 54, 55, 56, 57 y 58.

La figura 53 muestra el modelo de predicción de concentración de arsénico con una resolución de 5 m y un rango de valores entre 19.536 a 651.74 $\mu\text{g/l}$. Se puede visualizar, que la mayoría de valores de concentración de arsénico aumentan en dirección norte a sur y de oeste a este en la Laguna Papallacta, encontrándose la mayoría de datos en parte este-sur de la laguna. Existen zonas discontinuas dentro del modelo, que no cumplen con lo anteriormente mencionado.

La figura 54 muestra el modelo de predicción de concentración de arsénico empleado el método IDW, este posee un rango de valores entre 0.021 a 0.650 mg/l . Se puede visualizar, que la mayoría de valores de concentración de arsénico aumentan en dirección norte a sur, encontrándose gran parte de datos bajos de concentración de arsénico en la periferia de la laguna. Existen zonas discontinuas dentro del modelo, que no cumplen con lo anteriormente mencionado.

La figura 55 muestra el modelo de predicción de la variable pH con una resolución de 5 m y un rango de valores entre 6.98 y 7.83. Se puede visualizar, que la mayoría de valores de pH aumentan de norte a sur en la laguna Papallacta, encontrándose la mayoría de datos máximos en la periferia sur de la laguna. Existen zonas discontinuas dentro del modelo; que no cumple con lo anteriormente dicho.

La figura 56 muestra el modelo de error de predicción de la variable pH con una resolución de 5 m y un rango de valores entre 0.24 y 0.44. Se puede visualizar, que los valores de error más

bajos de pH se localizan en la periferia de la laguna; existen algunas zonas discontinuas dentro del modelo con valores máximos de errores de pH.

La figura 57 muestra el modelo de predicción de la variable temperatura con una resolución de 5 m y un rango de valores entre 11.90 y 13.78 °C. Se puede visualizar, que los valores de temperatura van aumentando desde el centro hacia los bordes de la laguna; localizándose en la parte de la periferia los máximos valores de temperatura y los valores bajos de temperatura en el centro de la laguna. Cabe mencionar que existen zonas discontinuas en el modelo pues muestran ciertos lugares que no cumplen con lo anteriormente mencionado.

La figura 58 muestra el modelo de error predicción de la variable temperatura con una resolución de 5 m y un rango de valores entre 0.0026 y 0.63 °C. Se puede visualizar, que los valores bajos de error de temperatura se ubican en la parte de la periferia de la laguna en su mayoría y los valores de errores altos de temperatura se localizan en el centro de la laguna. Cabe mencionar que existen zonas discontinuas en el modelo pues muestran ciertos lugares que no cumplen con lo anteriormente mencionado.

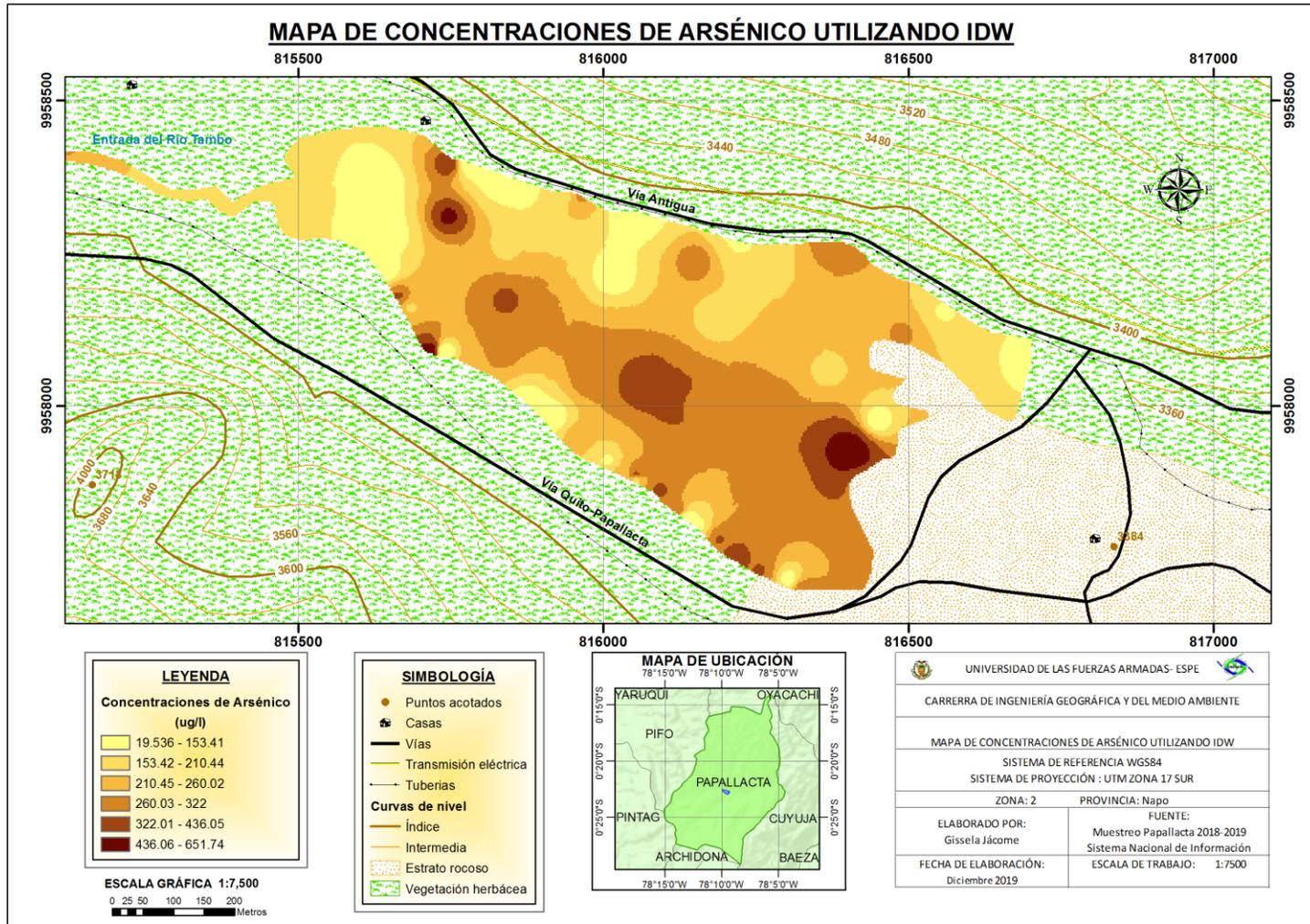


Figura 53. Modelo de predicción de Arsénico ($\mu\text{g/l}$) utilizando IDW

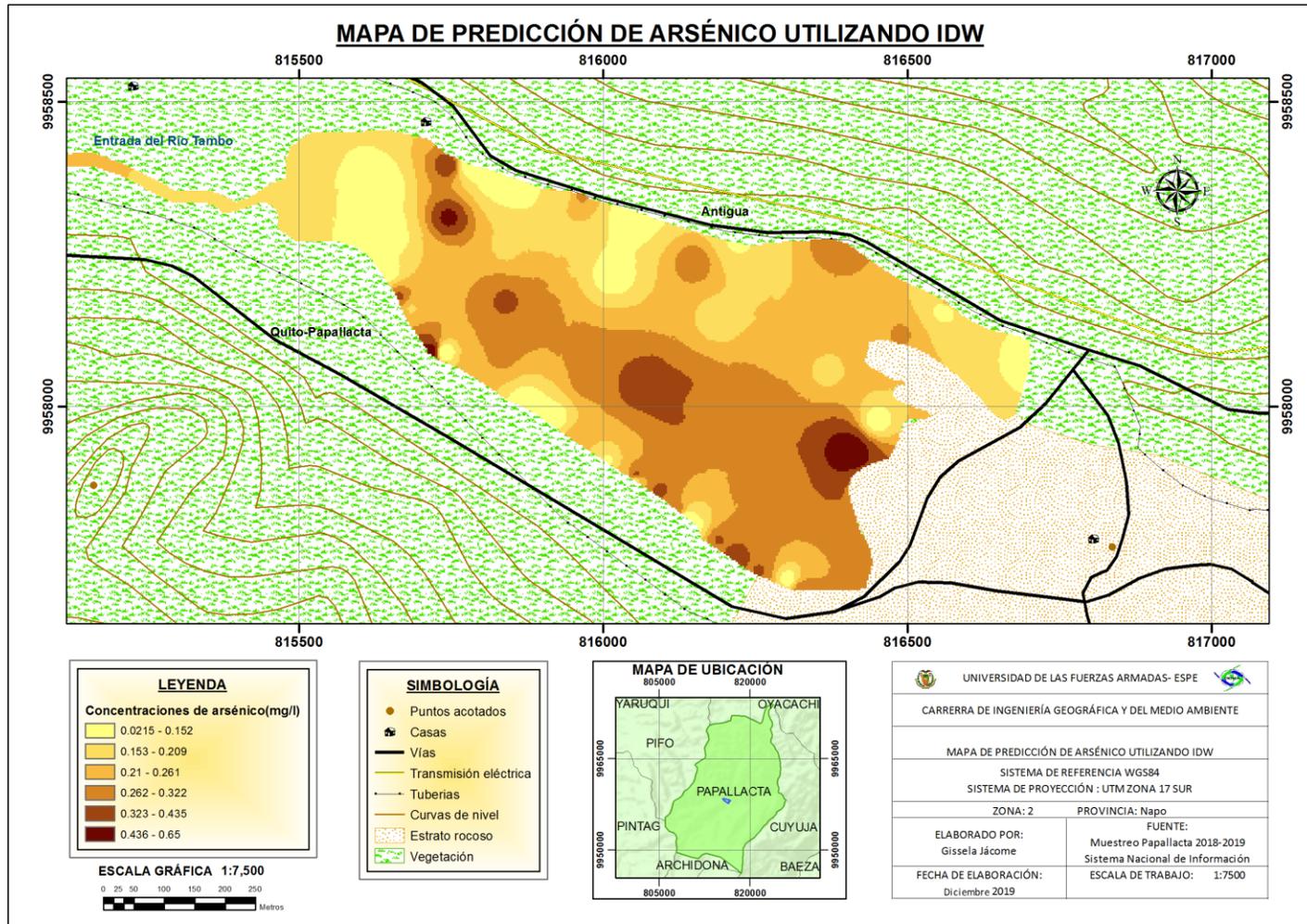


Figura 54. Modelo de predicción de Arsénico (mg/l) utilizando IDW

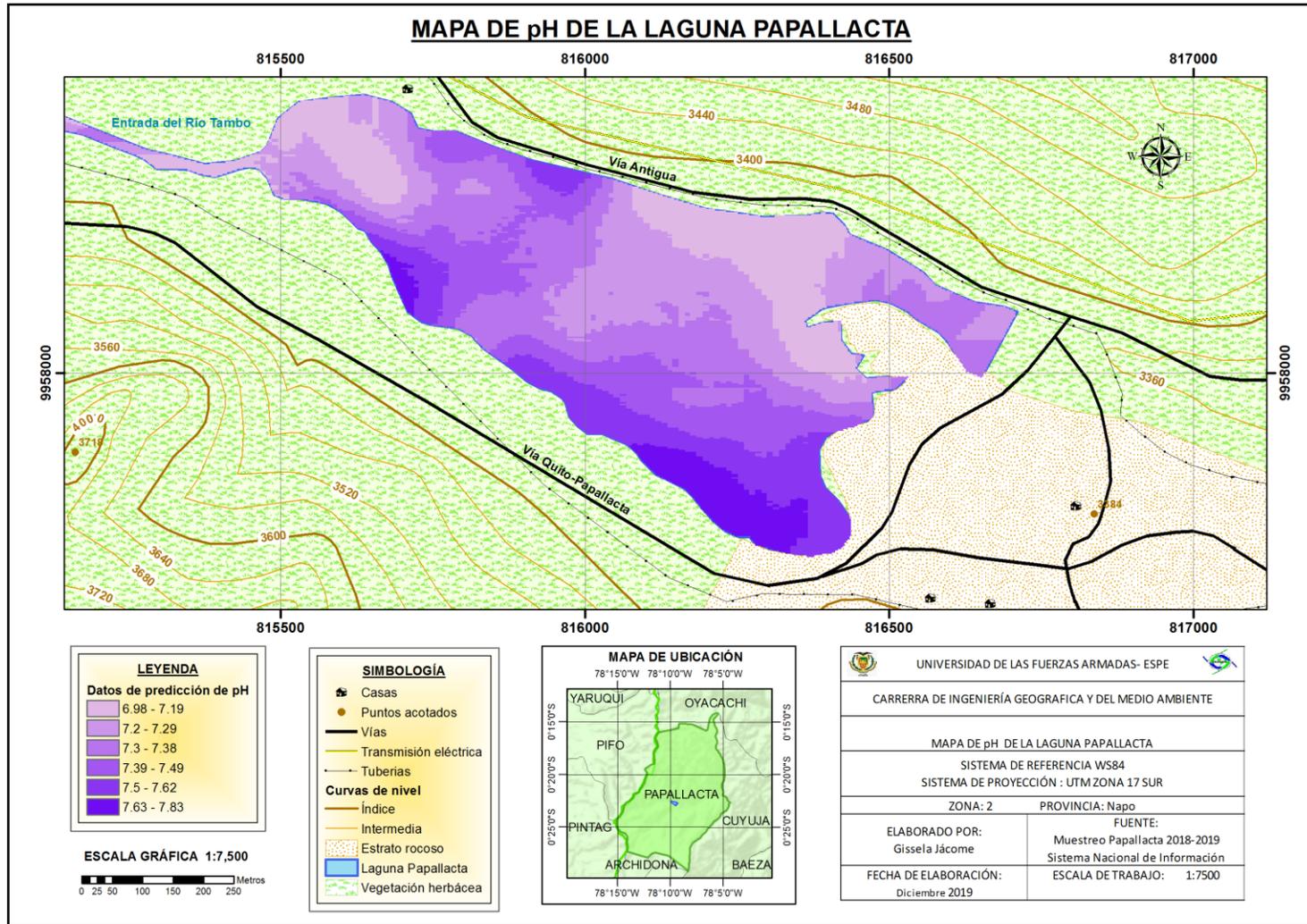


Figura 55. Modelo geostatístico para la variable pH

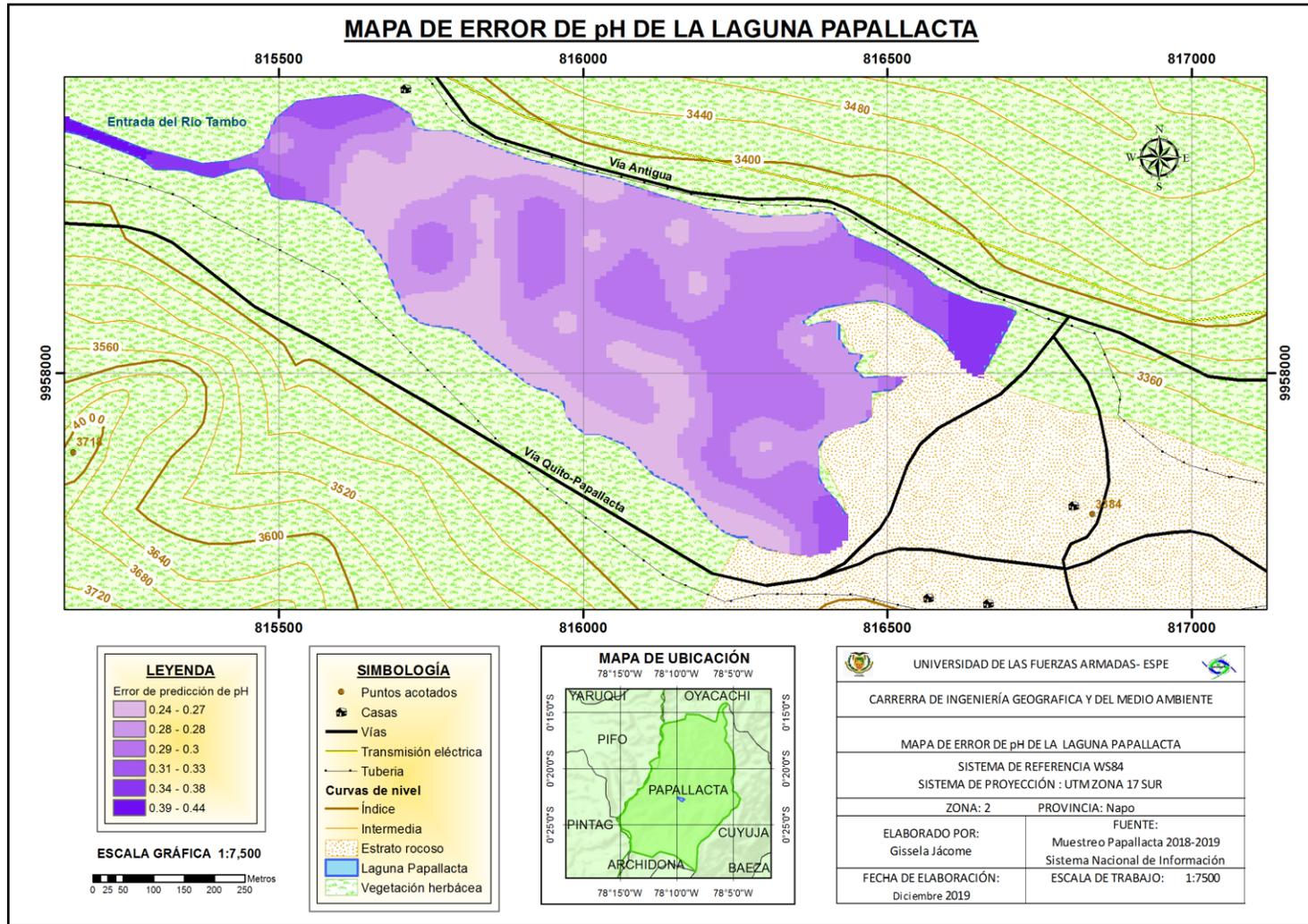


Figura 56. Modelo de error de predicción para la variable pH

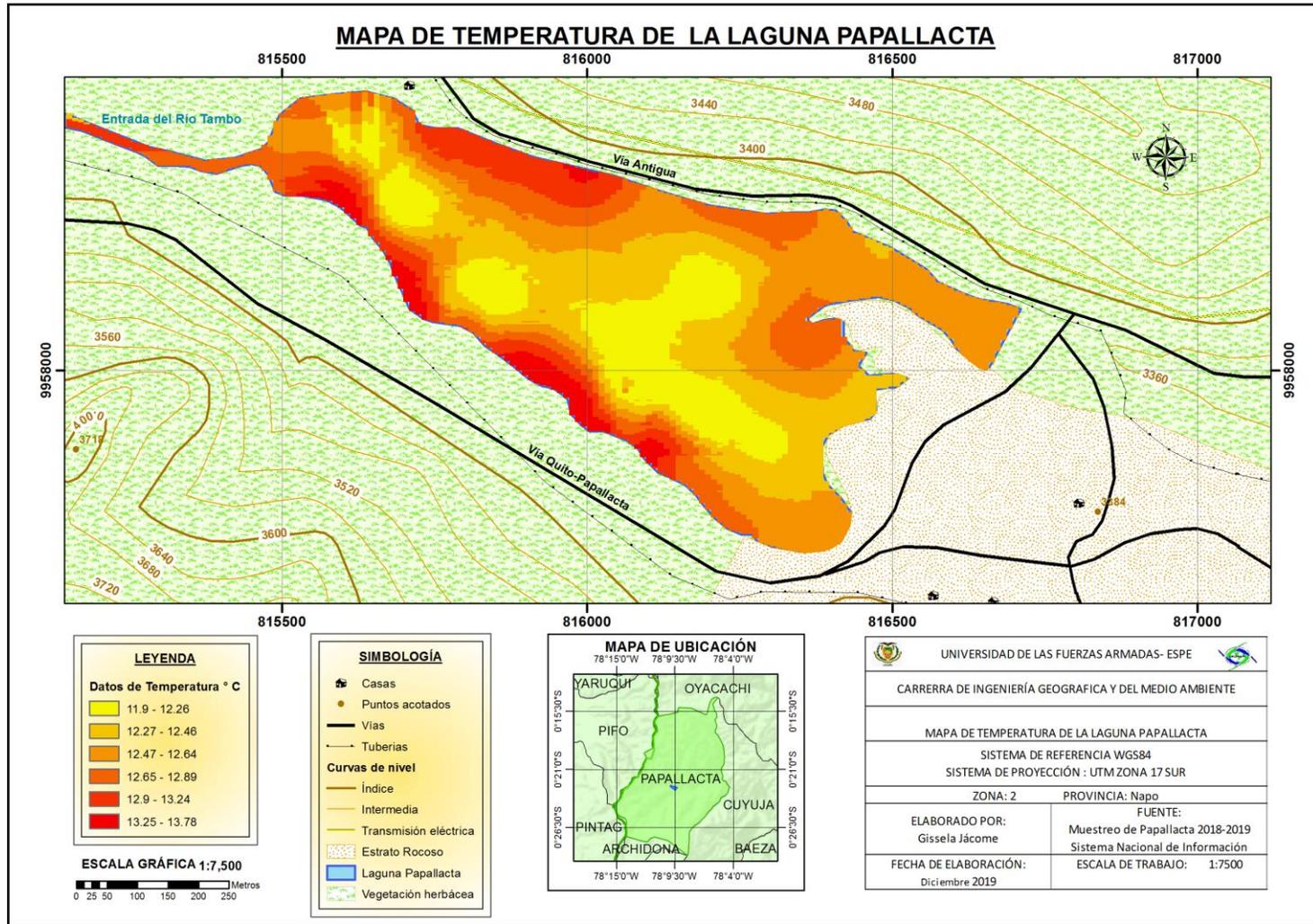


Figura 57. Modelo geostatístico para la variable Temperatura

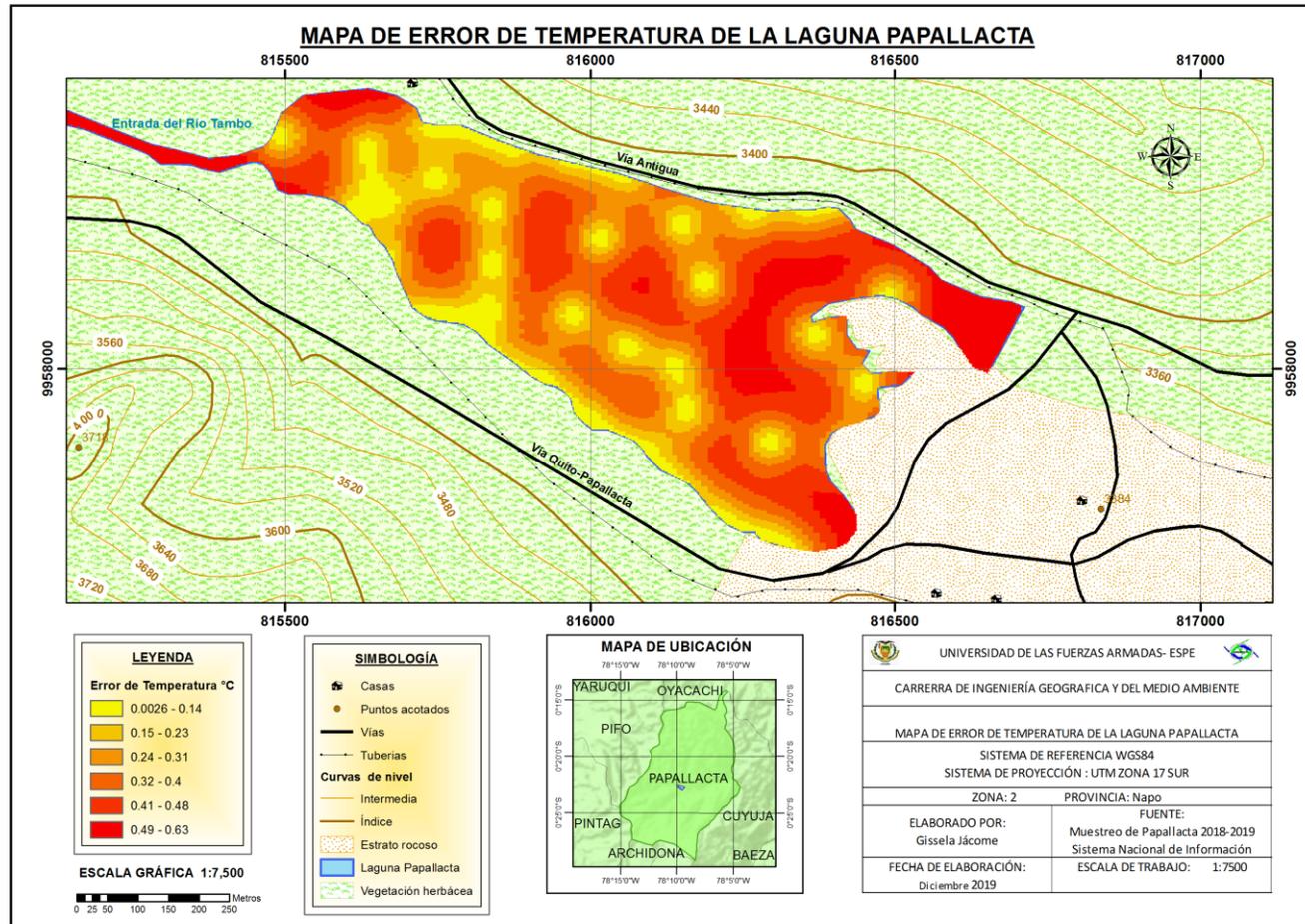


Figura 58. Modelo de error de predicción para la variable Temperatura

4.4.1 Modelo Geoestadístico de Arsénico

Para establecer si el modelo de predicción de arsénico obtenido, dio buenos resultados se utilizaron ciertos parámetros estadísticos entre los principales se puede mencionar: error de verificación, ME, MSE, RMS. Cuando el ME posee valores pequeños significa que el modelo presenta errores poco significativos. Debido a que esta medida no es del todo concluyente por no reflejar el tamaño de los errores es necesario utilizar la medida estadística MSE; este parámetro es la sumatoria de los errores de verificación al cuadrado repartido para el número de muestras, el valor pequeño de esta medida expresa una predicción más exacta muestra por muestra (Guajala Agila & Zambrano Solís, 2016).

Otra medida estadística para evaluar si un modelo da buenos resultados es el RMS (Root mean square), este parámetros mide la variación de los valores observados con los predichos de un modelo siendo comparable con el significado de desviación estándar (Esteller, Díaz Delgado, & Quentin, 2005). Para determinar los valores de error medio (ME), error cuadrático medio (MSE) y RMS se emplearon las fórmulas descritas a continuación:

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \{z(x_i) - \hat{z}(x_i)\} \quad \text{Ecuación 18}$$

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \{(z(x_i) - \hat{z}(x_i))^2\} \quad \text{Ecuación 19}$$

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \{ (z(x_i) - \hat{z}(x_i))^2 \}} \quad \text{Ecuación 20}$$

Siendo $z(x_i)$ es el valor observado u obtenido en campo, $\hat{z}(x_i)$ es el valor predicho por el modelo y N es el número total de datos (Oliver & Webster, 2015). A continuación, en la tabla 26 se muestra un resumen de los parámetros estadísticos obtenidos del modelo de predicción de la variable concentración de arsénico.

Tabla 26
Parámetros estadísticos del error de verificación de As

Variable	Error	Error	Error	Error cuadrático	Raíz del error
	mínimo	Máximo	medio(ME)	medio (MSE)	medio(RMS)
	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)²	(mg/l)
Arsénico	-0.215	0.185	-0.023	0.011	0.108

La tabla 26 muestra valores pequeños mg/l de error medio, error cuadrático (mg/l)² y la raíz del error medio (mg/l); estos valores evidencian que el modelo presenta una predicción más exacta muestra por muestra. Además, los errores máximos y mínimos del modelo aseveran un buen ajuste del modelo de predicción de concentración de arsénico.

4.4.2 Modelo Geoestadístico de pH

Para establecer si el modelo de predicción de pH generado en R, dio buenos resultados se empleó los parámetros estadísticos error medio (ME), error cuadrático medio (MSE) y RMS. Para establecer estas medidas estadísticas se utilizó el mismo proceso manejado para el modelo geoestadístico de concentración de arsénico. A continuación, en la tabla 27 se muestra el resumen de los parámetros estadísticos obtenidos del modelo de predicción de la variable pH.

Tabla 27*Parámetros estadísticos del error de verificación de pH*

Variable	Error mínimo	Error máximo	Error medio (ME)	Error cuadrático medio (MSE)	Raíz del error medio(RMS)
pH	-0.351	0.302	-0.049	0.037	0.192

La tabla 27 muestra valores pequeños de error medio, error cuadrático y la raíz del error medio; estos valores evidencian que el modelo presenta una predicción más exacta muestra por muestra. Además, los errores máximos y mínimos del modelo aseveran un modelo confiable de predicción de pH.

4.4.3 Modelo Geoestadístico de temperatura

Para establecer si el modelo de predicción de temperatura generado en R, dio buenos resultados se empleó los parámetros estadísticos error medio (ME), error cuadrático medio (MSE) y RMS. Para establecer estas medidas estadísticas se utilizó el mismo proceso manejado para el modelo geoestadístico de concentración de arsénico. A continuación, en la tabla 28 se muestra el resumen de los parámetros estadísticos obtenidos del modelo de predicción de la variable temperatura.

Tabla 28*Parámetros estadísticos del error de verificación de temperatura*

Variable	Error mínimo (°C)	Error Máximo (°C)	Error Medio (ME) (°C)	Error cuadrático medio(MSE) (°C) ²	Raíz del error medio (RMS) (°C)
Temperatura	-0.173	0.663	0.083	0.056	0.236

La tabla 28 muestra valores pequeños de °C de error medio, error cuadrático (°C²) y la raíz del error medio (°C); estos valores evidencian que el modelo presenta una predicción más exacta

muestra por muestra. Además, los errores máximos y mínimos del modelo aseveran un modelo confiable de predicción de temperatura.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- Las concentraciones de arsénico de agua de la Laguna Papallacta se encuentran en el intervalo entre 18-652 $\mu\text{g/l}$ con un valor promedio 223.4 $\mu\text{g/l}$ (0.22 mg/l); valores fuera de los límites establecidos en la tabla 1 del libro VI del TULSMA.
- Los parámetros pH, sulfatos, nitratos y turbidez de las muestras de agua de la laguna Papallacta se encuentran dentro de los límites establecidos en la tabla 1 del libro VI del TULSMA Anexo I.
- El parámetro temperatura se encuentran dentro de los límites establecidos en la tabla 12 del libro VI del TULSMA Anexo I.
- Los parámetros físicos-químicos del agua de la laguna Papallacta analizados muestran que el agua no es apta para consumo humano o uso doméstico, siendo adecuadas para uso pecuario como abrevadero de animales.
- El porcentaje de remoción de arsénico de las unidades experimentales de diferentes concentraciones de arsénico aplicadas 5 ml de nanopartículas de manganeso mostraron un valor promedio de 67.6 % alcanzando una remoción óptima.
- El porcentaje de remoción de arsénico de las unidades experimentales con diferentes concentraciones de arsénico aplicadas 5 ml nanopartículas de hierro mostraron un valor de media o promedio de 63.6 % logrando una remoción óptima.

- El histograma de validación cruzada, errores de predicción y el error de verificación del modelo de predicción generado en R de la variable concentración de arsénico muestra que el modelo de predicción de arsénico no posee una precisión recomendable para su utilización en otros estudios.
- Los errores de predicción, el error de verificación, ME (error medio), MSE (error cuadrático medio) y RMS (raíz del error medio) del modelo de predicción generado por el método determinístico IDW de la variable concentración de arsénico muestra que el modelo de predicción de arsénico posee una buena de precisión para su uso práctico en otros campos de conocimiento.
- Los histograma de validación cruzada, errores de predicción, errores de verificación, ME (errores medio), MSE (errores cuadráticos medio) y RMS (raíces del error medio) de los modelos de predicciones obtenidos en R de las variables auxiliares (pH y temperatura) indican que los modelos muestran una precisión aceptable para su uso práctico en diferentes áreas de investigación.

5.2 Recomendaciones

- Se sugiere realizar estudios sobre de parámetros físicos-químicos de agua de los diferentes ríos o cuerpos de agua que se encuentran conectados con la Laguna Papallacta. También, se recomienda efectuar una investigación de suelos de la zona de estudio para verificar si existen concentraciones altas de arsénico.
- Una de las limitaciones más importantes al momento de trabajar con la variable principal (Concentración de arsénico) fue la pequeña cantidad de datos, se recomienda para próximos

estudios aumentar el número de observaciones de esta variable teniendo como insumo base mínimo 100 datos sobre esta.

- Se recomienda para futuras investigaciones emplear modelos determinísticos o caóticos para variables ambientales que posean gran variabilidad en sus valores y no presenten un patrón.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. (Agosto de 2007). *Resúmenes de salud pública-Arsénico*. Recuperado el 24 de Septiembre de 2019, de Resúmenes de salud pública-Arsénico: https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs2.pdf
- Ager Ingenieros. (2003). Los sistemas de Información Geográfica. Obtenido de Los sistemas de Información Geográfica: <https://www.ager.es/productos/gis/sig.pdf>
- Alarcón Herrera, M. T., Leal, L., Miranda, S., Benavides, A., & Martín Domínguez, I. (2013). *Arsénico en agua*. Chihuahua, Chihuahua, México: Centro de Investigación en Materiales Avanzados. Recuperado el 23 de Noviembre de 2019, de <https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/1056/1/Libro%202013-Arsenico%20en%20el%20Agua%20con%20ISBN.pdf>
- Alfaro Sironvalle, M. A. (2007). *Estimación de Recursos Mineros*. Santiago de Chile, Santiago, Chile. Recuperado el 6 de Octubre de 2019, de http://cg.ensmp.fr/bibliotheque/public/ALFARO_Cours_00606.pdf
- Alonso Gutiérrez, B. J., López Meléndez, A., Rodríguez Liñan, C. Y., & Lázaro López, D. A. (2015). La nanotecnología a 40 años de su aparición : Logros y tendencias. (U. A. León, Ed.) *Ingenierías*, 18(66). Obtenido de http://eprints.uanl.mx/10563/1/66_la_nanotecnologia.pdf
- Álvarez Osorio, D. S., Cárdenas Contreras, A., & Matiz León, J. C. (21 de Septiembre de 2011). Modelos digitales batimétricos generados por métodos de interpolación IDW, KRIGING, SHEPARD y B-SPLINE en el Archipiélago de Islas del Rosario. *UD y la Geomática*(5), 3-14. doi:2011-4990
- ambientum. (12 de Febrero de 2019). *Determinación de sulfatos*. Obtenido de Determinación de sulfatos: https://www.ambientum.com/enciclopedia_medioambiental/aguas/determinacion_de_sulfatos.asp
- APHA. (1992). *Standard Methods for the examination of water and wastewater*. Washington D.C: American Public Health Association. Recuperado el 6 de Noviembre de 2019
- Aragón Sanz, N., Palacios Diez, M., Avello de Miguel, A., Gómez Rodríguez, P., Martínez Cortés, M., & Rodríguez Bernabeu, M. (Septiembre de 2001). Nivel de Arsénico en abastecimientos de agua de consumo de origen subterráneo en la comunidad de Madrid. *Revista Española de Salud Pública*, 75(5), 421-432. doi:1135-5727
- Arias García, A. J., & González Barbosa, R. (2016). Análisis espacio temporal de la piezometría en el acuífero de Irapuato valle de Santiago. *Jóvenes en la ciencia*, 2(1), 7-8. Recuperado el 5 de Octubre de 2019, de <http://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/987/626>

- Arreguín Cortés, F., Soto, P., Chávez Guillén, R., & Smedley, P. (27 de Julio de 2012). *Una visión general de la presencia de arsénico en las aguas subterráneas de México: Actas del 4º Congreso Internacional sobre Arsénico en el Medio Ambiente, 22-27 de julio de 2012, Cairns, Australia*. (ResearchGate, Ed.) doi:10.1201/b12522-36
- Ávalos, A., Haza, A. I., & Morales, P. (18 de Noviembre de 2013). Nanopartículas de Plata: aplicaciones y riesgos tóxicos para la salud humana y el medio ambiente. *Revista Complutense de Ciencias Veterinarias*, 7(2), 3-7. doi:http://dx.doi.org/10.5209/rev_RCCV.2013.v7.n2.43408
- Barrientos, E., Matutes, J., & Miki, M. (Junio de 2013). Remoción de arsénico de agua usando nanopartículas magnéticas obtenidas por ACCVD. *Revista de Física*(46), 28-37. doi:10.15446/mo
- Barrios Calmaestra, L. (2005). *Medidas de asimetría*. (G. d. España, Editor, & c. y. Ministerio de educación, Productor) Recuperado el 23 de Noviembre de 2019, de http://recursostic.educacion.es/descartes/web/materiales_didacticos/unidimensional_barrios/asimetria_est.htm
- Bermúdez, M. (01 de Enero de 2010). *Contaminación y turismo sostenible*. Recuperado el 15 de Mayo de 2019, de Contaminación y turismo sostenible: <http://galeon.com/mauriciobermudez/contaminacion.pdf>
- Blanes, P. S., Garro, O., Giménez, M. C., & Hunzicker, G. A. (2006). Aplicación de un diseño central compuesto para la determinación de especies orgánicas e inorgánicas de arsénico en agua por HPLC-HG-AAS. *Revista Comunicaciones Científicas y Tecnológicas*, 1. Recuperado el 13 de Octubre de 2019, de https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/38144621/2006-E-051.pdf?response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DResumen_E-051.pdf&X-Amz-Algorithm=AWS4-HMAC-SHA256&X-Amz-Credential=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A%2F20191009%2Fus-east-1%2Fs3%2Faws4_request
- Bundschuh, J., Pérez Carrera, A., & Litter, M. (2008). Distribución del arsénico en las regiones Ibérica e Iberoamericana. (C. y. Desarrollo(CYTED), Ed.) *IBEROARSEN*. doi:8496023613, 9788496023611
- Burgess, T., & Webster, R. (Septiembre de 1980). Interpolación óptima y mapeo isarítico de las propiedades del suelo III cambio de la desviación y kriging universal. *European Journal of Soil Science*, 31(2), 505-524. doi:https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1980.tb02100.x
- Cabrera, M. A., Pinos, D., & Pulla, M. F. (Junio de 2013). Arsénico en el agua. *Revista Galileo*(23), 130-131. Recuperado el 17 de octubre de 2019, de <http://dspace.uca.es/bitstream/123456789/30009/1/173-635-1-PB.pdf>

- Calvo Gómez, J. (Abril de 2006). Utilización de nanopátículas en tribología, generación de energía y catálisis. *Técnica Industrial*(262), 40-44. Recuperado el 25 de Septiembre de 2019, de <http://www.tecnicaindustrial.es/tiadmin/numeros/22/37/a37.pdf>
- Caniyilmaz , S. (2005). Arsenic removal from grounwater by Fe-Mn oxidation and microfiltration. Pittsburgh, Pensilvania, Estados Unidos: Universidad de Pittsburgh. Recuperado el 23 de Noviembre de 2019
- Cardona Ríos, J. A. (Febrero de 2015). Generación de superficies climáticas usando datos funcionales de temperatura y precipitación por medio de métodos geoestadísticos para el Valle del Río Cauca, Colombia. Quito, Pichincha, Ecuador. Recuperado el 5 de Octubre de 2019, de Universidad San Francisco de Quito: <http://192.188.53.14/bitstream/23000/4096/1/113816.pdf>
- Castelo Granizo, M. A. (2015). *Determinación de Arsénico y Mercurio en agua de consumo del cantón Rumiñahui por Espectrofotometría de Absorción Atómica*. Quito, Pichincha, Ecuador. Recuperado el 15 de Octubre de 2019, de <http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/8658/Determinaci%c3%b3n%20de%20Ars%c3%a9nico%20y%20Mercurio%20en%20agua%20de%20consumo%20de%20Cant%c3%b3n%20Rumi%c3%b1ahui.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Castillo Rodríguez, F. (2012). *Introducción a los Nanomateriales*. (U. N. México, Ed.) Recuperado el 26 de Septiembre de 2019, de *Introducción a los Nanomateriales*: http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m6/Introduccion%20a%20los%20nanomateriales.pdf
- Castro de Esparza, M. L. (24 de Junio de 2006). Presencia de arsénico en el agua de bebida en América Latina y su efecto en la salud pública. *International Congress: Natural Arsenic in Groundwaters of Latin America*, 3-5. Recuperado el 14 de octubre de 2019, de <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsacd/cd51/arsenico-agua.pdf>
- Castro de Esparza, M. L. (24 de Junio de 2006). Remoción del arsénico en el agua para bebida y biorremediación de suelos. *International Congress :Natural Arsenic in Groundwaters of Latin America*, 5-7. Recuperado el 24 de Noviembre de 2019, de <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd51/remocion-agua.pdf>
- Cebrián Abellán, F., & García González, J. A. (19-23 de Enero de 2006). *La interpolación como método de representación cartográfica para la distribución de la población : aplicación a la provincia de Albacete*. (ResearchGate, Ed.) Recuperado el 26 de Septiembre de 2019, de *La interpolación como método de representación cartográfica para la distribución de la población : aplicación a la provincia de Albacete*: https://www.researchgate.net/publication/297410160_La_interpolacion_como_metodo_de_representacion_cartografica_para_la_distribucion_de_la_poblacion_Aplicacion_a_la_provincia_de_Albacete

- Cely Pulido, J. W., Siabato Vaca, W. L., Sánchez Ipiá, A. H., & Rangel Sotter, A. P. (2002). Geostatística aplicada a estudios de contaminación ambiental. *Ingeniería*, 7(2), 31-38. doi:0121-750X
- Chasco Yrigoyen, C. (1 de Enero de 2003). *Métodos gráficos del análisis exploratorio de datos espaciales*. (A. E. Aplicada, Editor) Recuperado el 7 de Octubre de 2019, de ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/256174755_Metodos_graficos_del_analisis_exploratorio_de_datos_espaciales
- Chica Olmo, M. (2003). *Geoestadística y modelos matemáticos en hidrogeología* (Vol. 1). (U. J. Publicacions, Ed.) Castellón de la Plana, Castellón, España. Recuperado el 4 de Octubre de 2019, de <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=8X3F4yZ-9DwC&oi=fnd&pg=PA1&dq=Samper,+Carrera+1990.+Geoestad%C3%ADstica.+Aplicaciones+a+la+Hidrogeolog%C3%ADa+Subterr%C3%A1nea.+Centro+Internacional+de+M%C3%A9todos+Num%C3%A9ricos+en+Ingenier%C3%ADa.+Universitat+>
- Comisión Europea. (3 de Octubre de 2012). *Segunda revisión de la normativa sobre los nanomateriales*. Obtenido de Segunda revisión de la normativa sobre los nanomateriales : <http://ec.europa.eu/transparency/regdoc/rep/1/2012/ES/1-2012-572-ES-F1-1.Pdf>
- Constitución del Ecuador. (2008). *TITULO VI Régimen de desarrollo*. Obtenido de TITULO VI Régimen de desarrollo: <https://www.acnur.org/fileadmin/Documentos/BDL/2008/6716.pdf>
- CORTOLIMA. (2007). *Factores Físico Químicos y Bacteriológicos de los Ecosistemas*. (U. d. Tolima, Ed.) Recuperado el 19 de Septiembre de 2019, de Factores Físico Químicos y Bacteriológicos de los Ecosistemas: https://www.cortolima.gov.co/sites/default/files/images/stories/centro_documentos/pom_totare/diagnostico/l_211calidad_de_aguas.pdf
- CORTOLIMA. (2008). Parametros fisicoquímicos y bacteriológicos del agua. 25-28. Tolima, Colombia. Obtenido de Parametros fisicoquímicos y bacteriológicos del agua: https://www.cortolima.gov.co/sites/default/files/images/stories/centro_documentos/estudios/e01.pdf
- Cumbal, Delgado & Delgado. (Junio de 2011). Eliminación/Reducción de Bifenilos Policlorados desde aguas y líquidos residuales usando nanopartículas de hierro elemental. (E. Carrera, Ed.) *VI Congreso de Ciencia y Tecnología*. ISSN: 1390-4663, 6, 295-300. Obtenido de Eliminación/Reducción de Bifenilos Policlorados desde aguas y líquidos residuales usando nanopartículas de hierro elemental: <http://ciencia.espe.edu.ec/wp-content/uploads/2013/01/Memoria-del-congreso-CyT-ESPE-2011.pdf>
- Cumbal, L., Bundschuh, J., Aguirre, V., Murgueitio, E., Tipan, I., & Chávez, C. (2009). The origin of arsenic in waters and sediments from Papallacta Lake area in Ecuador. *Natural Arsenic in Groundwaters of Latin America*, 81-90. Obtenido de The origin of arsenic in

waters and sediments from Papallacta Lake area in Ecuador:
<https://eprints.usq.edu.au/26263/>

- Delgado, O., & Martínez, J. (29 de Agosto de 2015). Elaboración del mapa de ruido del área urbana de la Ciudad de Cuenca – Ecuador, empleando la técnica de interpolación geoestadística Kriging ordinario. *Revista Ciencias Espaciales*, 8(1), 411- 440. doi:<https://doi.org/10.5377/ce.v8i1.2059>
- Díaz Viera, M. A. (2002). *Geoestadística aplicada*. México, México: UNAM. Obtenido de Instituto de Geofísica, UNAM: <http://mmc2.geofisica.unam.mx/cursos/geoest/GeoEstadistica.pdf>
- Dominguez, G. (23 de Junio de 2015). *La Revolución Verde en la Nanotecnología*. (Wordpress.com, Ed.) Obtenido de La Revolución Verde en la Nanotecnología: <http://nano-sostenible.com/2015/06/23/la-revolucion-verde-en-la-nanotecnologia/>
- EcoFondo Ecuador. (2015). *Plan de desarrollo turístico de la parroquia Papallacta*. Obtenido de www.ecofondoecuador.com/index.php?..../Plan%20D%20Turístico%20Papallacta
- Emery, X. (2013). Geoestadística. En X. Emery, *Geoestadística* (págs. 47-52). Santiago, Chile, Chile: Universidad de Chile. Recuperado el 6 de octubre de 2019, de https://www.u-cursos.cl/usuario/f697544fb48474f4153ef2aafbe4c963/mi_blog/r/Geoestadistica.pdf
- ESRI. (2019). *Kriging*. Obtenido de Kriging: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/kriging.htm>
- ESRI. (26 de Septiembre de 2019). *Métodos determinísticos para la interpolación espacial*. Obtenido de Métodos determinísticos para la interpolación espacial: <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.4/extensions/geostatistical-analyst/deterministic-methods-for-spatial-interpolation.htm>
- ESRI. (2019). *Vista general del conjunto de herramientas Interpolación*. Obtenido de Vista general del conjunto de herramientas Interpolación: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/an-overview-of-the-interpolation-tools.htm>
- Esteller, M. V., Díaz Delgado, C., & Quentin, E. (15 de Junio de 2005). Uso de sistema de información geográfica (SIG) para la determinación de parámetros utilizados en la construcción de mapas de vulnerabilidad de acuíferos. *Revista Latino Americana de Hidrogeología*, 2(1), 24-29. Recuperado el 30 de Noviembre de 2019, de <https://revistas.ufpr.br/hidrogeologia/article/viewFile/2631/2172>
- Fiestas Eca, M. S., & Millones Ñiquen, A. L. (2019). *Influencia de la concentración y el tiempo de contacto del carbón activado de cáscara de coco en al remoción de arsénico de aguas subterráneas de Mórrope*. Lambayeque, Lambayeque, Perú. Recuperado el 12 de Octubre de 2019, de <http://190.108.84.117/bitstream/handle/UNPRG/4028/BC-TESTMP-2821.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- FLUENCE. (11 de Octubre de 2018). *La exposición prolongada al metaloide, ya sea de fuentes naturales o industriales, puede ser causa de una variedad de problemas de salud*. Obtenido de La exposición prolongada al metaloide, ya sea de fuentes naturales o industriales, puede ser causa de una variedad de problemas de salud: <https://www.fluencecorp.com/es/contaminacion-de-arsenico-en-america-latina/>
- Francisca, F. M., & Carro Pérez, M. E. (Mayo de 2014). Remoción de arsénico en agua mediante procesos de coagulación - floculación. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 30(2), 182-183. Recuperado el 23 de octubre de 2019, de <http://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v30n2/v30n2a5.pdf>
- Galarza Álvarez, N. M. (2014). *Ecoturismo en la parroquia de Papallacta, canón Quijos, provincia del Napo, estrategias de sostenibilidad para su consolidación*. Quito, Pichinca, Ecuador: Universidad Católica del Ecuador. Recuperado el 28 de Octubre de 2019, de <http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/7219/6.19.000663.pdf?sequence=4&isAllowed=y>
- Galetovic Carabantes, A., & de Fernicola. (2003). Arsénico en el agua de bebida: un problema de salud pública. *Revista Brasileira de Ciencias Farmaceuticas*, 39(4). Obtenido de Arsénico en el agua de bebida: un problema de salud pública: http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1516-93322003000400003&script=sci_arttext
- Giménez, M. C., Benítez, M. E., Osicka, R. M., & Castro, M. P. (1 de Enero de 2000). Determinación de arsénico total en aguas naturales subterráneas del departamento comandante Fernández(Chaco, Argentina). *Revista Información Tecnológica*, 11(2), 20-22. Recuperado el 14 de Octubre de 2019, de https://www.researchgate.net/publication/265591813_DETERMINACION_DE_ARSE_NICO_TOTAL_EN_AGUAS_NATURALES_SUBTERRANEAS_DEL_DEPARTAMENTO_COMANDANTE_FERNANDEZ_CHACO_ARGENTINA/link/5412e7a80cf2bb7347db124a/download
- Ginzo Villamayor, M. J. (2011). *Análisis Geoestadístico de datos funcionales*. Galicia, Coruña, España: Universidad Santiago de Compostela. Recuperado el 5 de Octubre de 2019, de http://eio.usc.es/pub/mte/descargas/ProyectosFinMaster/Proyecto_388.pdf
- Giraldo Henao, R. (2007). *Introducción a la Geoestadística. Teoría y Aplicación*. (U. N. Colombia, Ed.) Bogotá, Colombia. Recuperado el 1 de Octubre de 2019, de https://geoinnova.org/blog-territorio/wp-content/uploads/2015/05/LIBRO_-DE-_GEOESTADISTICA-R-Giraldo.pdf
- González Narváez, E. S. (2018). Determinación del estado actual de contaminación de Papallacta por sondeo eléctrico vertical. En Udla. Quito, Ecuador. Obtenido de Determinación del estado actual de contaminación de Papallacta por sondeo eléctrico vertical: <http://dspace.udla.edu.ec/bitstream/33000/10207/1/UDLA-EC-TIAM-2018-42.pdf>

- Guajala Agila, H. G., & Zambrano Solís, M. J. (2016). *Determinación de modelos de predicción espacial para la transformación de coordenadas entre los sistemas PSAD56 e ITRF94, época 1995.4 , utilizando técnicas geoestadísticas*. Sangolquí, Pichincha, Ecuador: Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE". Recuperado el 6 de Octubre de 2019, de <http://repositorio.espe.edu.ec/jspui/bitstream/21000/11734/1/T-ESPE-053093.pdf>
- Guardiola, C., Pardo, E., & Giménez, E. (Enero de 2017). *Métodos geoestadísticos para la elaboración de mapas de probabilidad de riesgo hidrogeotóxico (HGT) por altas concentraciones de As en las aguas subterráneas. Aplicación a la distribución de HGT en la provincia de Ávila (España)*. doi:10.4995/ia.2017.6798
- Guatibonza, M., Álvarez Herrera, J. G., & Sanabria, J. E. (2 de Julio de 2009). Distribución espacial de la conductividad hidráulica en un lote de la granja Tinguavita (Paipa, Colombia). *Agronomía Colombiana*, 27(2), 266-267. Recuperado el 5 de Octubre de 2019, de <https://www.redalyc.org/pdf/1803/180316234015.pdf>
- Guerra, F., Gómez, H., González, J., & Zambrano, Z. (Abril de 2006). Uso actual de métodos y técnicas para el estudio de la precipitación incluyendo plataformas SIG. (U. d. Andes, Ed.) *Geoenseñanza*, 11(1), 97-106. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/360/36012424009.pdf>
- Hengl, T. (1 de noviembre de 2006). Finding of the right pixel size. (P. Press, Ed.) *Journal of Computers & Geosciences*, 32(9), 1285-1290. doi:10.1016 / j.cageo.2005.11.008
- Hernández Palma, J., & Corvalán Vera, P. (2000). Uso del variogramas para la determinación del tamaño medio de las copas de pino silvestre en imágenes aéreas digitales. *Ciencias Forestales*, 14(1-2), 4-5. Recuperado el 4 de Octubre de 2019, de http://revistacienciasforestales.uchile.cl/1999-2000_vol14-15/n1-2a1.pdf
- Hernando Grande, A. (2007). Nanotecnología y nanopartículas magnéticas: La física actual en lucha contra la enfermedad. *Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 101(2), 321-322. Recuperado el 14 de Octubre de 2019, de <http://www.rac.es/ficheros/doc/00547.pdf>
- INEN. (Enero de 2014). *NTE INEN-ISO 5667-1*. Recuperado el 21 de Octubre de 2019, de NTE INEN-ISO 5667-1: https://181.112.149.204/buzon/normas/NTE_INEN_ISO_5667_3.pdf
- Instituto Nacional del Cáncer. (20 de Marzo de 2015). *Arsénico*. Obtenido de Arsénico: <https://www.cancer.gov/espanol/cancer/causas-prevencion/riesgo/sustancias/arsenico>
- Jiménez Espinosa, R. (Mayo de 2003). Tratamiento numérico de la información hidrogeológica : : fases de estudio y ejemplos de aplicación. *Boletín Geológico y Minero*, 114(3), 315-316. Recuperado el 4 de Octubre de 2019, de http://www.igme.es/Boletin/2003/114_3_2003/ARTICULO%205.pdf
- Jiménez, G. (30 de Agosto de 2016). *Investigadores del TEC desarrollan método para eliminar el arsénico del agua potable*. (T. d. Rica, Editor) Obtenido de Investigadores del TEC

desarrollan método para eliminar el arsénico del agua potable:
<https://www.tec.ac.cr/hoyeneltec/2016/08/30/investigadores-tec-desarrollan-metodo-eliminar-arsenico-agua-potable>

Johnston, K., Ver Hoef, J. M., Krivoruchko, K., & Lucas, N. (2003). *Using ArcGis Geostatistical Analyst*. (ESRI, Ed.) Redlands, California, Estados Unidos. Recuperado el 5 de Octubre de 2019, de http://dusk.geo.orst.edu/gis/geostat_analyst.pdf

Korbut, S. (17 de Agosto de 2015). *Contaminación en agua*. (BuenasTareas.com, Ed.) Recuperado el 19 de Septiembre de 2019, de Contaminación en agua: <https://www.buenastareas.com/ensayos/Agua2/77121043.html>

Lange Balboa, W. (2012). *Modelamiento y co-simulación de leyes de cobre total y soluble*. Santiago, Santiago, Chile: Universidad de Chile. Recuperado el 8 de Octubre de 2019, de http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/104364/cf-lange_wb.pdf?sequence=3&isAllowed=y

Leiva, C. (Octubre de 2014). *Determinación de modelos de predicción espacial de la variable ondulación geoidal, para la zona urbana del cantón Quito y la zona rural del cantón Guayaquil, utilizando técnicas Geoestadísticas*. Obtenido de Determinación de modelos de predicción espacial de la variable ondulación geoidal, para la zona urbana del cantón Quito y la zona rural del cantón Guayaquil, utilizando técnicas Geoestadística: <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/8703/3/CD-5841.pdf>

Lenntech. (12 de Febrero de 2019). *Nitratos*. Obtenido de Nitratos: <https://www.lenntech.es/nitratos.htm>

Lenntech. (12 de Febrero de 2019). *pH y alcalinidad*. Obtenido de pH y alcalinidad: <https://www.lenntech.es/ph-y-alcinidad.htm>

Lillo, J. (2008). *Peligros geoquímicos: arsénico de origen natural en las aguas*. Obtenido de Peligros geoquímicos: arsénico de origen natural en las aguas: http://www.aulados.net/GEMM/Documentos/Peligros_geoquimicos_As/Peligros_As_2.pdf

Martínez, L. D., & Gasquez, J. A. (2005). *Determinación de arsénico*. (G. Galindo, J. L. Fernández Turiel, M. Á. Parada, & D. G. Torrente, Edits.) San Luis, San Luis, Argentina. Recuperado el 12 de Octubre de 2019, de http://digital.csic.es/bitstream/10261/4019/1/Galindo_et_al-Arsenico-2005.pdf

Martínez, R. (20 de Agosto de 2013). *Creación de un Modelo Digital de Elevación (Procesos de Interpolación) con ARCGIS 10*. Obtenido de Creación de un Modelo Digital de Elevación (Procesos de Interpolación) con ARCGIS 10: <http://georem.blogspot.com/2013/08/creacion-de-un-modelo-digital-de.html>

Medina Pizzali, M., Robles, P., Mendoza, M., & Torres, C. (Marzo de 2018). Ingesta de arsénico: el impacto en la alimentación y la salud humana. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Publica*, 35(1), 93-102. doi: 10.17843/rpmpes.2018.351.3604

- Mejias Sánchez, Y., Cabrera Cruz, N., Toledo Fernández, A. M., & Duany Machado, O. J. (26 de septiembre de 2009). La nanotecnología y sus posibilidades de aplicación en el campo científico-tecnológico. *Revista Cubana de Salud Pública*. 2009, 3(35), 9. Obtenido de https://www.scielo.org/scielo.php?pid=S0864-34662009000300006&script=sci_arttext&tlng=es
- Mendoza Uribe, G., & Rodríguez López, J. (Septiembre de 2006). La nanociencia y la nanotecnología: una revolución en curso. *Perfiles Latinoamericanos*, 14(29). Obtenido de La nanociencia y la nanotecnología: una revolución en curso: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-76532007000100006
- Mendoza, O., Sánchez, R., Cuevas, H., Barrón, J., Escalante, P., & Solano, R. (Febrero de 2017). Riesgos Potenciales de salud por consumo de agua con arsénico en Colima, México. *Salud pública de México*, 59(1), 34-40. Obtenido de https://www.scielosp.org/article/ssm/content/raw/?resource_ssm_path=/media/assets/spm/v59n1/0036-3634-spm-59-01-00034.pdf
- Ministerio del Ambiente de la República del Ecuador. (2015). Texto Unificado de la Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente. Quito, Pichincha, Ecuador. Recuperado el 10 de Noviembre de 2019, de <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/ecu112180.pdf>
- Molina Santos, M. G. (2013). *Efectos del derrame de petróleo sobre la comunidad fitoplactónica de la laguna de Papallacta y sus principales afluentes*. Quito, Pichincha, Ecuador: Universidad Internacional del Ecuador. Recuperado el 28 de Octubre de 2019, de <https://repositorio.uide.edu.ec/bitstream/37000/301/1/T-UIDE-0280.pdf>
- Monárrez Cordero, B. E. (2011). Síntesis y caracterización de nanopartículas con propiedades magnéticas sintetizadas por AACVD y su aplicación en la remoción de arsénico en el agua para consumo humano. Chihuahua, Chihuahua, México: Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV). Recuperado el 23 de Noviembre de 2019, de <https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/556/1/Tesis%20Balnc%20Elizabeth%20Mon%20C3%20alrrez%20Cordero.pdf>
- Monge, M. (9 de Marzo de 2009). Nanopartículas de plata : métodos de síntesis en disolución y propiedades bactericidas. *Revista Anales de la Real Sociedad Española de Química*, 105(1), 33-34. Recuperado el 14 de Octubre de 2019, de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2931286>
- Montesdeoca Rivera, S. P., & Zamora Loo, R. L. (2017). *Concentración de arsénico en agua y sedimento en el Río Carrizal del cantón Bolívar, provincia de Manabí*. Calceta, Manabí, Ecuador. Recuperado el 13 de Octubre de 2019, de <http://repositorio.espam.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/42000/672/TMA151.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Moral García, F. J. (Enero de 2004). Aplicación de la geoestadística en las ciencias ambientales. *Revista Ecosistemas*, 13(1), 78-86. Recuperado el 5 de Octubre de 2019, de <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/582/550>
- Morales, C. (5 de diciembre de 2018). *Logra biotecnóloga mexicana remover arsénico del agua a partir de nanopartículas magnéticas*. (I. y. (ID), Editor) Obtenido de Logra biotecnóloga mexicana remover arsénico del agua a partir de nanopartículas magnéticas: <https://invdes.com.mx/agencia-id/logra-biotecnologa-mexicana-remover-arsenico-del-agua-partir-nanoparticulas-magneticas/>
- Murgueitio Herrera, E. S. (2018). *Síntesis, caracterización y aplicación de nanopartículas de hierro, en la remoción de HTPs en suelos y aguas de la provincia de Francisco de Orellana-Ecuador*. Lima, Perú: Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Recuperado el 22 de Octubre de 2019, de <http://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/cybertesis/9021>
- Murgueitio, E., Cumbal, L., Debut, A., & Landivar, J. (5 de Abril de 2016). Synthesis of Iron Nanoparticles using Extracts of Native Fruits of Ecuador, as Capuli (Prunus serotina) and Mortiño (Vaccinium floribundum). *Biology and Medicine*, 8(282). doi:10.4172/0974-8369.1000282
- Niño, L. (2008). Uso de la función semivariograma y estimación kriging en el análisis espacial de un indicador entomológico de Aedes aegypti (Diptera: Culicidae). *Biomédica*, 28(4), 578-586. doi:<https://doi.org/10.7705/biomedica.v28i4.64>
- NTE INEN 2169:2013. (2013). *Norma Técnica Ecuatoriana*. Recuperado el 21 de Octubre de 2019, de Norma Técnica Ecuatoriana: <http://www.trabajo.gob.ec/wp-content/uploads/2012/10/NTE-INEN-2169-AGUA.-CALIDAD-DEL-AGUA.-MUESTREO.-MANEJO-Y-CONSERVACION-DE-MUESTRAS.pdf>
- Oilwatch Latino América. (28 de Agosto de 2006). *Ecuador- Principal fuente de agua para Quito contaminada por derrame de Crudo*. Obtenido de Ecuador- Principal fuente de agua para Quito contaminada por derrame de Crudo: <http://www.oilwatchesudamerica.org/petroleo-en-sudamerica/ecuador/990-ecuador-principal-fuente-de-agua-para-quito-contaminada-por-derrame-de-crudo.html>
- Oliver, M., & Webster, R. (2015). *Basic steps in Geostatistics: The Variogram and Kriging* (Vol. 3). Berlin, Berlin, Alemania: Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-319-15865-5_1
- Orta Arrazcaeta, L. (Septiembre de 2002). Contaminación de las aguas por plaguicidas químicos. (Fitosanidad, Ed.) *Instituto de Investigaciones de Sanidad Vegetal*, 6(3), 55-62. doi:1562-3009
- Pacheco Niveló, J. (2014). *Análisis de métodos de interpolación geoestadísticos para la estimación espacio-temporal de la precipitación en la cuenca del Río Paute*. Cuenca,

Ecuador: Universidad del Azuay. Recuperado el 5 de Octubre de 2019, de <http://201.159.222.99/bitstream/datos/3705/1/10374.pdf>

Palomares, A. (2013). *Contaminación del agua por nitratos y técnicas para su tratamiento*. (M. d. Competitividad, Ed.) Obtenido de Contaminación del agua por nitratos y técnicas para su tratamiento: <https://www.esferadelagua.es/agua-y-tecnologia/contaminacion-del-agua-por-nitratos-y-tecnicas-para-su-tratamiento>

Pazmiño Cuenca, A. (2010). *Variabilidad temporal y espacial de las precipitaciones en zonas de montaña: caso del volcán Antisana*. Quito, Pichincha, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional. Recuperado el 5 de Octubre de 2019, de <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/2492/1/CD-3195.pdf>

Peliza Ancallay, J. M. (2010). *Dotación real de agua potable para complejos recreacionales en el sector del valle de los Chillos*. Quito, Pichincha, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional. Recuperado el 21 de Octubre de 2019, de <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/1898/1/CD-2804.pdf>

Pérez Moreno, F., Prieto García, F., Barrado Esteban, E., Rojas Hernández, A., & Méndez Marzo, M. A. (18 de Febrero de 2002). Optimización del método de determinación de arsénico en aguas potables por espectrofotometría UV-Vis con dietil ditiocarbamato de plata. *Revista de la Sociedad Química de México*, 46(2), 175-179. Recuperado el 13 de Octubre de 2019, de <http://scielo.org.mx/pdf/rsqm/v46n2/v46n2a16.pdf>

Pita Fernández, S., & Pértegas Díaz, S. (18 de Noviembre de 2002). *Determinación del tamaño muestral para calcular la significación del coeficiente de correlación lineal*. (Fisterra) Recuperado el 25 de Noviembre de 2019, de <http://www.fisterra.com/material/investiga/pearson/pearson.pdf>

Ramírez González, S., Jiménez Prieto, Y., Esperanza Pérez, G., Ribalta Quesada, J., & Rodríguez Rivero, R. A. (Abril de 2017). Determinación de arsénico por el método del azul de Molibdeno en muestras de aguas provenientes de una planta de procesamiento de minerales auríferos. *Revista Cubana de Química*, 29(1). Recuperado el 12 de Octubre de 2019, de <http://scielo.sld.cu/pdf/ind/v29n1/ind01117.pdf>

Rangel Montoya, E. A., Montañez Hernández, L. E., Luévanos Escareño, M. P., & Balagurusamy, N. (abril de 2015). Impacto del arsénico en el ambiente y su transformación por microorganismos. *Revista Terra Latinoamericana*, 33(2), 105-107. Recuperado el 17 de octubre de 2019, de <http://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v33n2/2395-8030-tl-33-02-00103.pdf>

Rivera Huerta, M., Cortés Muñoz, J. E., Piña Soberanis, M., & Martín Domínguez, A. (8 de Diciembre de 2000). *Remoción de hierro y arsénico de agua para consumo humano mediante precipitación y adsorción en Zimapán, Hidalgo, México*. Recuperado el 24 de Noviembre de 2019, de Remoción de hierro y arsénico de agua para consumo humano mediante precipitación y adsorción en Zimapán, Hidalgo, México: <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/tratagua/ii-066.pdf>

- Samboni Ruiz, N. E., Carvajal Escobar, Y., & Escobar, J. C. (Diciembre de 2007). Revisión de parámetros fisicoquímicos como indicadores de calidad y contaminación del agua. *Ingeniería e Investigación*, 27(3), 172-181. Recuperado el 20 de Septiembre de 2019, de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-56092007000300019
- Sánchez, L. D., & Burbano, L. (2011). *Remoción de Hierro y Manganeso por oxidación-filtración para agua potable*. (Universidad del Valle) Recuperado el 24 de Noviembre de 2019, de Remoción de Hierro y Manganeso por oxidación-filtración para agua potable: <http://bvspace.paho.org/texcom/cd050704/burbano.pdf>
- Sandoval Pinto, M. E. (2011). *Arsénico, propiedades y efectos*. Guadalajara, Jalisco, México. Recuperado el 15 de Octubre de 2019, de http://repositorio.cucba.udg.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/5097/Sandoval_Pinto_Maria_Elena.pdf?sequence=1
- Sandoval Rivas, J. V., & Andrade Hurtado, G. X. (2012). *Plan de desarrollo turístico comunitario para la parroquia de Papallacta, cantón Quijos, provincia de Napo*. Quito, Pichincha, Ecuador: Universidad Central del Ecuador. Recuperado el 28 de Octubre de 2019, de <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/186/1/T-UCE-0005-18.pdf>
- Sarmiento, P., Peralta, J., & Rosa, M. (2015). *Evaluación del método del Azul de Molibdeno. Análisis en campo de Arsénico en aguas*. Recuperado el 12 de Octubre de 2019, de Universidad Tecnológica Nacional: <http://ria.utn.edu.ar/bitstream/handle/123456789/2207/Evaluaci%c3%b3n%20del%20m%c3%a9todo%20del%20Azul%20de%20Molibdeno.%20An%c3%a1lisis%20en%20campo%20de%20Ars%c3%a9nico%20en%20aguas.%20COPIME%202015.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Secretaria de Salud México. (29 de Junio de 1995). *NORMA Oficial Mexicana NOM-117-SSA1-1994, Bienes y servicios. Método de prueba para la determinación de cadmio, arsénico, plomo, estaño, cobre, fierro, zinc y mercurio en alimentos, agua potable y agua purificada por espectrometría de absorción atómica*. Recuperado el 13 de Octubre de 2019, de Diario Oficial de la Federación: <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69541.pdf>
- Semmartin, M. (30 de Abril de 2013). *Contaminación Atmosférica*. doi:1054936
- Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias. (16 de Enero de 2019). *Informe de situación-Época lluviosa*. (Gobierno de la república del Ecuador) Recuperado el 26 de Noviembre de 2019, de https://www.gestionderiesgos.gob.ec/wp-content/uploads/2019/01/SITREP_No_23_19012019_%C3%89poca-Lluviosa.pdf
- Sifontes, Á. (Diciembre de 2014). Biosíntesis de nanomateriales: hacia el avance de la nanotecnología verde. *Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, 7(13). Recuperado el 25 de Septiembre de 2019, de <http://www.mundonano.unam.mx/ojs/index.php/nano/article/view/46603/41845>

- Silva Arroyave, S. M., & Correa Restrepo, F. J. (15 de Mayo de 2009). Análisis de la contaminación del suelo: Revisión de la normativa y posibilidades de regulación económica. (U. d. Medellín, Ed.) *Red de revistas científicas de América Latina*, 12(23), 34. doi:0120-6346
- Smichowski, P., & Valiente, L. (2007). Speciation Analysis of Arsenic, Chromium and Selenium in Aquatic Media. *Reunión final de coordinación de investigación* (págs. 28-39). Vienna: Organismo Internacional de energía atómica (OEIA). Recuperado el 13 de Octubre de 2019, de https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1542_web.pdf
- Sommer C, I., Fernández L, P., Rivas S, H., & Gutiérrez R, M. (2000). La Geoestadística como herramienta en estudios de contaminación de suelos, análisis de caso: afectación por arsénico, plomo y cadmio contenidos en jales mineros. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 46(4), 207-208. Recuperado el 7 de Octubre de 2019, de <https://www.redalyc.org/pdf/370/37016406.pdf>
- Universidad de Sevilla. (Noviembre de 2019). *Unidades de Concentración*. Obtenido de Unidades de Concentración: https://rodas5.us.es/file/fca28f6b-8381-785a-fed9-a8a0c9b4543c/2/unidades_concentracion_SCORM.zip/pagina_06.htm
- Warnes, J. (Octubre de 1986). Un análisis de sensibilidad para kriging universal. *Mathematical Geosciences*, 18(7), 653–676. doi:<https://doi.org/10.1007/BF00897095>
- Weemaels, N. (8 de Abril de 2003). *Derrame en Papallacta afecta agua en Quito*. (A. Ecológica, Editor) Obtenido de Derrame en Papallacta afecta agua en Quito: <http://www.accionecologica.org/petroleo/crudos-pesados/ocp/48-derrame-en-papallacta-afecta-agua-en-quito>
- Záyago Lau, E., & Foladori, G. (2010). La nanotecnología en México: un desarrollo incierto. *Sociedad y Territorio, vol. Economía, Sociedad y Territorio*, 10(32), 143-147. doi:1405-8421
- Zhang, W.-x. (Agosto de 2003). Nanoscale Iron Particles for Environmental Remediation: An Overview. *Journal of Nanoparticle Research*, 5(3-4), 323-332. doi:<https://doi.org/10.1023/A:1025520116015>
- Zuñiga Salazar, M. M. (Abril de 2009). Síntesis de sorbentes híbridos para la remoción selectiva de arsénico , con aplicación en la descontaminación de aguas superficiales. Sangolquí, Pichincha, Ecuador: Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE". Recuperado el 26 de Noviembre de 2019, de Síntesis de sorbentes híbridos para la remoción selectiva de arsénico, con aplicación en la descontaminación de aguas superficiales: <http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/handle/21000/881>

ANEXOS