



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

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

**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**TEMA:**

**ANÁLISIS DE ESPECIES ORGÁNICAS E INORGÁNICAS DEL  
SISTEMA HIDROGRÁFICO DEL RÍO AMBI, A TRAVÉS DE  
MODELOS UNIDIMENSIONALES Y GEOESTADÍSTICOS**

**AUTORES: ANDRADE ROSERO, VALERIA ALEXANDRA  
PIEDRA LEÓN, PABLO ANDRÉS**

**DIRECTOR: ING. CARRERA VILLACRÉS, DAVID VINICIO,  
PhD.**

**SANGOLQUÍ**

**2017**



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN**  
**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**CERTIFICACIÓN**

Certifico que el trabajo de titulación, “ANÁLISIS DE ESPECIES ORGÁNICAS E INORGÁNICAS DEL SISTEMA HIDROGRÁFICO DEL RÍO AMBI, A TRAVÉS DE MODELOS UNIDIMENSIONALES Y GEOESTADÍSTICOS”, realizado por la srta. **VALERIA ALEXANDRA ANDRADE ROSERO** y el sr. **PABLO ANDRÉS PIEDRA LEÓN**, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software antiplagio, el mismo que cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditar y autorizar a la srta. **VALERIA ALEXANDRA ANDRADE ROSERO** y al sr. **PABLO ANDRÉS PIEDRA LEÓN**, para que lo sustenten públicamente.

Sangolquí, 27 de enero de 2017

**Ing. David Vinicio Carrera Villacrés, PhD.**

**DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN**  
**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**

Nosotros, **VALERIA ALEXANDRA ANDRADE ROSERO** con cédula de identidad 172139999-4 y **PABLO ANDRÉS PIEDRA LEÓN** con cedula de identidad 010383354-7, declaramos que el trabajo de titulación “**ANÁLISIS DE ESPECIES ORGÁNICAS E INORGÁNICAS DEL SISTEMA HIDROGRÁFICO DEL RÍO AMBI, A TRAVÉS DE MODELOS UNIDIMENSIONALES Y GEOESTADÍSTICOS**”, ha sido desarrollada considerando los métodos de investigación existentes, así como también respetando los derechos de autor debidamente indicados en citas bibliográficas, sin constituir en ningún caso copia o plagio de algún trabajo existente, razón por la cual declaramos que es un trabajo de nuestra exclusiva autoría.

Sangolquí, 27 de enero de 2017

**LOS AUTORES**

**VALERIA ANDRADE R.**

**C.I. 172139999-4**

**PABLO PIEDRA L.**

**C.I. 010383354-7**



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN**  
**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**AUTORIZACIÓN**

Nosotros, **VALERIA ALEXANDRA ANDRADE ROSERO** y **PABLO ANDRÉS PIEDRA LEÓN**, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca virtual de la institución el presente trabajo de titulación “**ANÁLISIS DE ESPECIES ORGÁNICAS E INORGÁNICAS DEL SISTEMA HIDROGRÁFICO DEL RÍO AMBI, A TRAVÉS DE MODELOS UNIDIMENSIONALES Y GEOESTADÍSTICOS**”, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 27 de enero de 2017

**LOS AUTORES**



---

**VALERIA ANDRADE R.**

**C.I. 172139999-4**



---

**PABLO PIEDRA L.**

**C.I. 010383354-7**

## DEDICATORIA

En primer lugar a Dios y a la Virgen, que me han guiado y bendecido en todo momento de mi vida para cumplir con todos mis objetivos y superar cualquier dificultad.

A mis padres, Pablo y Teresita, que con sus consejos, su amor y su incondicional apoyo me han ayudado a salir adelante y me han dado todo lo que soy como persona.

A mis hermanas, Ana María y Daniela, que con su ejemplo han sido mi fuente de motivación, inspiración y felicidad, y han estado presentes apoyándome en todo momento.

A mi compañera, mi amiga, mi complemento, Vale, quien ha sido un pilar fundamental en mi vida y en todo el proceso de mi formación, gracias a sus consejos, paciencia y apoyo que me han dado la fuerza para junto a ella culminar esta etapa de mi vida con éxito.

**Pablo Andrés Piedra León**

Dedico este proyecto primeramente a Dios y a la virgen María que me han mantenido bajo su protección y que con sus bendiciones hoy puedo alcanzar esta meta.

A mi ángel de la guarda mi “Mamita Shia” de quien siempre he sentido su presencia su cuidado y protección y quien sé que este momento está muy orgullosa desde el cielo celebrando conmigo este triunfo.

A mis padres German y Sandra mis hermanos Paulina y Alejandro , mis sobrinos Martin e Isabella y toda mi familia que sin ellos no sería nada, que son mi mayor bendición y apoyo y que con su guía y ejemplo sigo creciendo personal y profesionalmente.

A mi novio quien ha sido parte fundamental en este trayecto y quien me ha brindado su apoyo su cariño su paciencia y ha sido mi fortaleza y felicidad durante todo este tiempo.

**Valeria Alexandra Andrade Rosero**

## AGRADECIMIENTO

Al Dr. David Carrera, Dr. Washington Sandoval y la Ing. Paulina Guevara, quienes me dieron su apoyo incondicional y desinteresado para poder culminar con éxito la carrera, brindándome todo su conocimiento y experiencia para aplicarla en mi vida profesional.

A todos los profesores de la carrera que a lo largo de mi etapa de la carrera me han dado su apoyo y han aportado un granito de arena en mi formación como profesional.

A todos mis amigos y compañeros con los que he compartido todos estos años de formación, gracias por su amistad y su apoyo.

**Pablo Andrés Piedra León**

Agradezco primeramente a Dios por todas las bendiciones derramadas sobre mí, porque gracias a Él puedo hoy culminar este camino y alcanzar una gran meta en mi vida.

A mis padres mis hermanos y toda mi familia por su apoyo incondicional por ser mi fortaleza mi guía y mi mayor ejemplo.

A mis profesores quienes supieron guiarme y brindarme sus conocimientos, especialmente al Dr. David Carrera tutor de este proyecto que siempre estuvo dispuesto a ayudarnos y con mucha paciencia guiarnos, al Dr. Washington Sandoval, Ing. Paulina Guevara y al Ing. Pablo Piedra, su ayuda y conocimientos fueron fundamentales en el desarrollo de esta investigación.

A Pablo, mi compañero de tesis, mi mejor amigo y mi novio, gracias por tu paciencia tu apoyo por confiar en mi para realizar este proyecto de titulación, porque juntos pudimos alcanzar esta meta tan importante.

A mis amigos que siempre me brindaron su apoyo y fueron ese toque de alegría en este camino.

**Valeria Alexandra Andrade Rosero**

## INDICE GENERAL

<b>CAPÍTULO 1.....</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1    Antecedentes.....	1
1.2    Definición del problema.....	3
1.3    Justificación.....	5
1.4    Objetivos.....	5
1.4.1    General.....	5
1.4.2    Específicos.....	6
1.5    Hipótesis.....	6
<b>CAPÍTULO 2.....</b>	<b>7</b>
<b>MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>7</b>
2.1. Modelación unidimensional .....	7
2.2. Modelo hidráulico unidimensional con HEC- RAS.....	7
2.3. Requerimientos de entrada para el modelo HEC-RAS .....	9
2.4. Modelo de calidad de aguas unidimensional con HEC-RAS.....	10
2.5. Calidad del agua .....	10
2.6. Calidad de aguas para riego.....	11
2.6.1. Relación de adsorción de sodio RAS.....	11
2.6.2. Salinidad potencial.....	13
2.6.3. Salinidad efectiva.....	14
2.7. Modelación hidrológica.....	15
2.8. Modelación hidrológica con HEC-HMS .....	15
2.9. Análisis multitemporal .....	17
2.10. Modelo Geoestadístico .....	17
2.10.1. Análisis estructural .....	18
2.10.2. Método de Kriging.....	21
2.11. Análisis de Componentes Principales .....	23
<b>CAPÍTULO 3.....</b>	<b>24</b>
<b>METODOLOGÍA .....</b>	<b>24</b>
3.1. Descripción del área de estudio.....	24

3.2. Muestreo y análisis de agua.....	25
3.2.1 Muestreo .....	25
3.2.2. Método de Análisis .....	28
3.3. Datos meteorológicos .....	29
3.4. Modelos unidimensionales .....	30
3.4.1. Modelación hidráulica y de calidad .....	30
3.4.1.1. Secciones transversales del río.....	31
3.4.1.2. Coeficiente de rugosidad de Manning.....	32
3.4.1.3. Determinación de caudales .....	34
3.4.1.4. Determinación de caudales sanitarios .....	36
3.4.1.5. Concentraciones de parámetros de calidad .....	38
3.4.2. Modelación Hidrológica .....	40
3.4.2.1. Información morfométrica .....	41
3.4.2.2. Información acerca de la precipitación histórica o de diseño .....	42
3.4.2.3. Condiciones de humedad del suelo .....	44
3.4.2.4. Información hidrológica del proceso de transformación de lluvia en escorrentía.....	46
3.4.2.5. Hidráulica de los métodos de tránsito .....	47
3.4.3. Comparación de los caudales máximos calculados. ....	47
3.5. Análisis multitemporal .....	48
3.6. Análisis de Componentes Principales .....	49
3.7. Análisis geoestadístico .....	49
<b>CAPITULO 4.....</b>	<b>51</b>
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>51</b>
4.1. Relleno y Validación de Datos meteorológicos .....	51
4.2. Concentraciones en el río Ambi .....	52
4.2.1. Concentraciones inorgánicas.....	52
4.2.2. Concentraciones orgánicas.....	57
4.3. Comprobación de la exactitud de los resultados .....	61
4.4. Modelación hidráulica y de calidad.....	68
4.4.1. Coeficiente de rugosidad.....	68
4.4.2. Determinación de caudales hidráulicos.....	69

4.4.3.	Caudales sanitarios.....	74
4.4.4.	Concentraciones de parámetros de calidad .....	80
4.4.5.	Resultados de la calidad actual del río Ambi.....	81
4.4.5.1.	Temperatura.....	82
4.4.5.2.	Oxígeno disuelto.....	85
4.4.5.3.	Demanda Bioquímica de Oxígeno a los cinco días (DBO <sub>5</sub> ).....	89
4.4.5.4.	Demanda Química de Oxígeno (DQO) .....	94
4.4.5.5.	Coliformes fecales .....	97
4.4.5.6.	Nitratos.....	100
4.4.5.7.	Fosfatos.....	103
4.5.	Modelación Hidrológica con HEC-HMS .....	108
4.5.1.	Morfometría de las subcuencas.....	108
4.5.1.1.	Modelo físico .....	108
4.5.1.2.	Tiempo de concentración.....	109
4.5.2.	Información acerca de la precipitación histórica o de diseño .....	110
4.5.2.1.	Curvas IDF.....	110
4.5.2.2.	Hietogramas .....	114
4.5.3.	Condiciones de humedad del suelo.....	118
4.5.3.1.	Taxonomía y tipos de suelo .....	118
4.5.3.2.	Número de curva.....	119
4.5.4.	Información hidrológica del proceso de transformación de lluvia en escorrentía (Tiempo de retardo).....	120
4.5.5.	Hidráulica de los métodos de tránsito .....	121
4.5.5.1.	Tiempo de retardo.....	121
4.5.6.	Obtención de caudales del modelo HEC-HMS.....	122
4.5.7.	Comparación de caudales.....	125
4.6.	Análisis multitemporal .....	126
4.6.1.	Análisis de Componentes Principales .....	126
4.6.2.	Variables de estudio .....	130
4.6.2.1.	Conductividad eléctrica .....	130
4.6.2.2.	RAS.....	133
4.6.2.3.	Salinidad efectiva.....	137

4.6.2.4.	Salinidad Potencial .....	139
4.7.	Análisis Geoestadístico .....	141
4.7.1.	Análisis exploratorio de datos (AED).....	142
4.7.1.1.	Método gráfico (histograma) .....	143
4.7.1.2.	Gráfico Q-Q Plot.....	144
4.7.1.3.	Diagrama de caja .....	145
4.7.1.4.	Análisis de tendencia .....	146
4.7.2.	Análisis estructural.....	148
4.7.2.1.	Semivariograma teórico.....	148
4.7.3.	Predicción del método Kriging .....	152
4.7.3.1.	Errores de predicción .....	153
4.7.3.2.	Mapa de predicción.....	154
4.8.	Análisis determinístico .....	156
4.8.1.	Validación cruzada.....	157
4.9.	Plan de manejo de la subcuenca del río Ambi.....	161
4.9.1.	Reutilización de aguas residuales.....	162
4.9.2.	Niveles de tratamiento de aguas residuales.....	163
4.9.3.	Calidad futura del río Ambi .....	164
<b>CAPÍTULO 5.....</b>		<b>171</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>		<b>171</b>
<b>CAPITULO 6.....</b>		<b>175</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>		<b>175</b>

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Principales problemas en la subcuenca del río Ambi .....	4
Tabla 2. Valores para el cálculo de pHc .....	12
Tabla 3. Cuadro de clasificación de aguas según el índice de Salinidad potencial .....	14
Tabla 4. Clasificación de las aguas según el índice de salinidad efectiva .....	15
Tabla 5. Coordenadas de los Puntos de muestreo de agua del Sistema Hidrográfico del río Ambi .....	26
Tabla 6. Métodos Estándares para Análisis de Agua .....	28
Tabla 7. Coeficiente de rugosidad de Manning .....	32
Tabla 8. Tasas de crecimiento poblacional por subcuencas.....	38
Tabla 9. Cargas aportantes por la población .....	39
Tabla 10. Grupo de información, método escogido e información requerida. ....	40
Tabla 11. Elementos hidrológicos usados en el modelo HEC-HMS .....	41
Tabla 12. Ecuaciones para el cálculo del Tiempo de concentración.....	42
Tabla 13. Tipos de suelo y características.....	44
Tabla 14. Reclasificación usos del suelo.....	45
Tabla 15. Valores del número de curva CN.....	46
Tabla 16. Valores del coeficiente (a) método Sandoval Aguilera (2014).....	48
Tabla 17. Composición iónica de las aguas del río Ambi en época lluviosa (Mayo 2016) .....	53
Tabla 18. Composición iónica de las aguas del río Ambi en época Seca (Agosto 2016) .....	54
Tabla 19. Concentraciones orgánicas (DBO <sub>5</sub> y DQO) del río Ambi .....	58
Tabla 20. Coliformes fecales muestras río Ambi.....	60
Tabla 21. Porcentaje de error aceptable de la relación Cation-Anión.....	61
Tabla 22. Factores de Conductividad para los iones comunes en las aguas .....	66
Tabla 23. Comprobación de exactitud de resultados mayo 2016 agosto 2016 .....	67
Tabla 24. Coeficiente de rugosidad formula de Cowan.....	68
Tabla 25. Coeficiente de rugosidad Escogidos para el río Ambi.....	69
Tabla 26. Precipitación media Cuenca del río Ambi, método Isoyetas .....	71
Tabla 27. Precipitaciones medias de las subcuenca del río Ambi.....	71
Tabla 28. Caudales medios mensuales estación H023.....	72
Tabla 29. Coeficientes de escorrentía en el punto de medición de caudal.....	72
Tabla 30. Caudales calculados para el río Ambi.....	74
Tabla 31. Población total 2010 por subcuencas de la cuenca del río Ambi.....	75
Tabla 32. Poblaciones proyectadas por subcuencas de la cuenca del río Ambi. ....	76
Tabla 33. Dotaciones consideradas por subcuencas .....	77
Tabla 34. Caudales sanitarios proyectados por subcuencas.....	78
Tabla 35. Caudales sanitarios desviados en la SC del río Ambi por proyectos de riego a partir de los caudales hidráulicos.....	79

Tabla 36. Caudales sanitarios restados en el modelo de HEC-RAS .....	80
Tabla 37. Concentraciones de los parámetros de calidad .....	80
Tabla 38. Predicción de las concentraciones futuras del río Ambi .....	107
Tabla 39. Tiempo de concentración (Tc) subcuencas río Ambi .....	110
Tabla 40. Intensidad máxima en 24 horas , estación M105 y M107 .....	111
Tabla 41. Intensidades –Tiempo de duración Estación M105-M107 .....	112
Tabla 42. Intensidades –Tiempo de duración Estación M001-M009-M315 .....	113
Tabla 43. Hietogramas de precipitación de las estaciones meteorológicas de la cuenca del Río Ambi. ....	115
Tabla 44. Porcentajes de aporte de las estaciones meteorológicas .....	117
Tabla 45. Valores de CN, S, Ia para la cuenca del río Ambi .....	120
Tabla 46. Tiempos de retardo de las subcuenca del río Ambi. ....	121
Tabla 47. Tiempo de retardo de los cauces modelados en la cuenca del río Ambi .....	122
Tabla 48. Caudales máximos obtenidos del modelo HEC-HMS .....	124
Tabla 49. Comparación de caudales método Sandoval -Aguilera y HEC HMS.....	125
Tabla 50. Componentes Principales – Mayo 2016.....	126
Tabla 51. Componentes Principales – Agosto 2016 .....	128
Tabla 52. Clasificación de las aguas del rio Ambi según las normas Riverside en todas las épocas de muestreo .....	136
Tabla 53. Tabla de validación cruzada método Kriging Ordinario RAS ° octubre 2014 .....	151
Tabla 54. Errores de predicción modelo Kriging ordinario RAS° octubre 2014.....	153
Tabla 55. Tabla de validación cruzada método IDW RAS° octubre 2014 .....	158

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Elementos del semivariograma teórico.....	19
Figura 2. Modelos teóricos de semivariogramas.....	20
Figura 3. Mapa de ubicación de la subcuenca del río Ambi .....	25
Figura 4. Mapa de ubicación puntos de muestreo.....	27
Figura 5. Vista en planta sección 5+500.00 m río Ambi .....	31
Figura 6. Valores de coeficiente de Manning .....	33
Figura 7. Esquema del modelo de caudales para HEC-RAS. ....	35
Figura 8. Mapa de subcuencas del sistema hidrográfico del río Ambi .....	36
Figura 9. Diagrama de Piper muestreo mayo 2016.....	55
Figura 10. Diagrama de Piper muestreo agosto 2016 .....	56
Figura 11. Muestreo mayo 2016 a) Relación funcional entre la CE y la concentración de cationes b) Relación funcional entre la CE y la concentración de aniones.....	62
Figura 12. Muestreo agosto 2016 a) Relación funcional entre la CE y la concentración de cationes b) Relación funcional entre la CE y la concentración de aniones.....	63
Figura 13. Relación entre la CE y la concentración de solidos disueltos totales muestreo mayo 2016.....	64
Figura 14. Relación entre la CE y la concentración de solidos disueltos totales muestreo agosto 2016. ....	65
Figura 15. Mapa de isoyetas Cuenca del río Ambi .....	70
Figura 16. Mapa de aprovechamiento para riego e hidroeléctricas de la SC del río Ambi .....	73
Figura 17. Gráfico de temperatura HEC-RAS para caudal mínimo .....	83
Figura 18. Gráfico de temperatura HEC-RAS para caudal medio.....	83
Figura 19. Gráfico de temperatura HEC-RAS para caudal máximo.....	84
Figura 20. Gráfico de Oxígeno Disuelto HEC-RAS para caudal mínimo.....	87
Figura 21. Gráfico de Oxígeno Disuelto HEC-RAS para caudal medio.....	87
Figura 22. Gráfico de Oxígeno Disuelto HEC-RAS para caudal máximo .....	88
Figura 23. Gráfico de DBO <sub>5</sub> HEC-RAS para caudal mínimo.....	90
Figura 24. Gráfico de DBO <sub>5</sub> HEC-RAS para caudal medio.....	91
Figura 25. Gráfico de DBO <sub>5</sub> HEC-RAS para caudal máximo.....	91
Figura 26. Gráfico de DQO HEC-RAS para caudal mínimo.....	95
Figura 27. Gráfico de DQO HEC-RAS para caudal medio .....	95
Figura 28. Gráfico de DQO HEC-RAS para caudal máximo .....	96
Figura 29. Gráfico de Coliformes Fecales HEC-RAS para caudal mínimo .....	98
Figura 30. Gráfico de Coliformes Fecales HEC-RAS para caudal medio.....	98
Figura 31. Gráfico de Coliformes Fecales HEC-RAS para caudal máximo.....	99
Figura 32. Gráfico de NO <sub>3</sub> HEC-RAS para caudal mínimo .....	101
Figura 33. Gráfico de NO <sub>3</sub> HEC-RAS para caudal medio.....	102

Figura 34. Gráfico de NO <sub>3</sub> HEC-RAS para caudal máximo.....	102
Figura 35. Gráfico de PO <sub>4</sub> HEC-RAS para caudal mínimo.....	104
Figura 36. Gráfico de PO <sub>4</sub> HEC-RAS para caudal medio .....	105
Figura 37. Gráfico de PO <sub>4</sub> HEC-RAS para caudal máximo .....	105
Figura 38. Modelo físico de la cuenca del río Ambi en HEC-HMS .....	109
Figura 39. Curvas IDF a) Est. M 105 b) Est. M107.....	112
Figura 40. Curva IDF a) Est. M001 b) Est. M 009 c) Est. M 315.....	114
Figura 41. Hietogramas de las estaciones meteorológicas de la Cuenca del río Ambi..	116
Figura 42. Polígonos de thiesen para la cuenca del rio Ambi.....	117
Figura 43. Taxonomía de la Cuenca del Río Ambi.....	118
Figura 44. Número de curva (CN) cuenca del río Ambi.....	119
Figura 45. Hidrograma de la subcuenca del río Tahuando obtenido del HEC-HMS ....	123
Figura 46. Resumen de los caudales pico para un periodo de retorno de 10 años.....	124
Figura 47. Comparacion de caudales maximos entre los metodos Sandoval-Aguilera y HEC- HMS .....	125
Figura 48. Análisis de componentes principales mayo 2016.....	127
Figura 49. Análisis componentes principales agosto 2016 .....	128
Figura 50. Relación CE vs Época de muestreo .....	131
Figura 51. Relación CE precipitaciones.....	131
Figura 52. Relación RAS corregido vs época de muestreo.....	134
Figura 53. Relación RAS corregido vs precipitación.....	135
Figura 54. Relacion Salinidad efectiva vs época de muestreo .....	137
Figura 55. Relación salinidad efectiva vs precipitación media mensual .....	138
Figura 56. Relación Salinidad Potencial vs época de muestreo.....	140
Figura 57. Relación Salinidad Potencial vs precipitación media mensual.....	140
Figura 58. Histograma RAS° muestreo octubre 2014.....	143
Figura 59. Diagrama de cuantiles, RAS° muestreo octubre 2014.....	144
Figura 60. Diagrama de caja RAS muestreo octubre 2014.....	145
Figura 61. Gráfico de tendencias RAS° octubre 2014.....	146
Figura 62. Semivariograma RAS° muestreo octubre 2014.....	149
Figura 63. Validación cruzada método Kriging RAS ° muestreo octubre 2014.....	151
Figura 64. Mapa de predicción Kriging ordinario RAS° octubre 2014.....	154
Figura 65. Mapa de errores de predicción método Kriging ordinario RAS° octubre 2014. ....	155
Figura 66. Validación cruzada método IDW RAS° octubre 2014.....	157
Figura 67. Mapa de prediccion metodo IDW RAS° octubre 2014 .....	160
Figura 68. Comparación de la concentración de DBO <sub>5</sub> actual y futura río Ambi .....	165
Figura 69. Comparación de la concentración de DQO actual y futura en el río Ambi..	166
Figura 70. Comparación de la concentración de Coliformes Fecales actual y futura en el río Ambi.....	167

## RESUMEN

La subcuenca del río Ambi está ubicada en la provincia de Imbabura, su extensión es de 1129.8 km<sup>2</sup>. La importancia de esta subcuenca radica en que es una zona agrícola y actualmente está influenciada por la ciudad del conocimiento Yachay, cuya inversión es de aproximadamente 439 millones de dólares, su sistema hídrico es utilizado principalmente en proyectos de riego. Por esta razón, en este estudio se elaboró modelos unidimensionales y geoestadísticos para el análisis de la calidad del agua del sistema hidrográfico del río Ambi con diferentes programas computacionales. Con el modelo hidráulico y de calidad se comprobó que los desvíos de caudal en los proyectos de riego existentes están utilizando el agua con una calidad no permitida por la norma ambiental vigente ya que sus concentraciones para caudal medio no cumplen con lo establecido en la norma TULSMA, especialmente en parámetros orgánicos. El modelo hidrológico, demostró que la aplicación de algunos métodos para calcular caudales hidrológicos en esta cuenca, incluidos el del SCS, dan resultados coherentes y bastante parecidos. El análisis multitemporal demostró que existen problemas con la salinidad del agua en períodos de sequía para algunos cultivos no tolerantes a las sales. El plan de manejo ambiental mostró que es necesario un proceso de tratamiento y reutilización del recurso agua del río Ambi para su futuro uso en las actividades de la zona.

### **Palabras Clave:**

- **RÍO AMBI**
- **CALIDAD DEL AGUA**
- **SEMIVARIOGRAMA**
- **SALINIDAD DEL AGUA**
- **ANÁLISIS MULTITEMPORAL**

## ABSTRACT

The sub-basin of the Ambi river is located in the province of Imbabura, its extension is 1129.8 km<sup>2</sup>. The importance of this sub-basin is that is an agricultural area and is currently influenced by the city of knowledge Yachay, whose investment is approximately 439 million dollars, its water system is mainly used in irrigation projects. For this reason, in this study, one-dimensional and geostatistical models were developed with different computational programs to analyze the water quality of the Ambi river hydrographic system. With the hydraulic and quality model were verified that the diversions of flow for existing irrigation projects are using the water with a quality not allowed by the current environmental norm due to their concentrations for medium flow do not comply with what was established in TULSMA especially in organic parameters. The hydrological model showed that the application of some methods to calculate hydrological flows in this sub-basin, included SCS method, give coherent and fairly similar results. The multitemporal analysis showed that there are problems with the salinity of the water in periods of drought for some crops that are not tolerant to the salts. The environmental management plan showed that it is necessary a process of treatment and reuse of the water resource of the Ambi river for its future use in the activities of the zone.

### **Key words:**

- **AMBI RIVER**
- **WATER QUALITY**
- **SEMIVARGRAM**
- **WATER SALINITY**
- **MULTITEMPORAL ANALYSIS**

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes

La calidad del agua es un tema que preocupa cada vez más en países de todo el mundo por motivos como la salud de la población, el desarrollo económico nacional y la calidad ambiental de los ecosistemas. Cabe recordar que hay 2.400 millones de personas que no tienen garantizado el acceso al saneamiento y unos 760 millones de personas no tienen acceso a agua potable, pese a que tanto el agua como el saneamiento son derechos humanos reconocidos por las Naciones Unidas.

De acuerdo al panorama de la calidad del agua del mundo elaborada por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, la contaminación de los ríos en Asia, África y América Latina ha aumentado desde 1990, la contaminación patógena severa afecta a un tercio de los ríos, condicionando la salud del hombre por consumir agua contaminada. La contaminación orgánica severa afecta a cerca de un séptimo de todos los tramos de río, mientras que la contaminación salina o inorgánica severa y moderada afecta a cerca de un décimo de todos los tramos de río de América Latina, África y Asia (UNEP, 2016).

El análisis de la calidad del recurso hídrico es importante ya que afecta a todos los aspectos de los ecosistemas y del bienestar humano, como la salud de una comunidad, el alimento que se ha de producir, las actividades económicas, la salud de los ecosistemas y la diversidad biológica (FAO WATER, 2016).

Realizar estudios de concentraciones inorgánicas en ríos resultan fundamentales ya que estos parámetros condicionan la calidad del recurso hídrico para el riego agrícola, las concentración de sales disueltas (CE), presencia relativa de sodio (RAS), contenido de carbonatos y bicarbonatos , concentración de cloro, boro, y manganeso; y nutrimentos como calcio, magnesio y sulfatos son parámetros que

sirven para definir de acuerdo a normativas ambientales vigentes la calidad y aceptabilidad del agua para uso agrícola (Castellón, J., Bernal, M., Hernandez, M., 2015).

De acuerdo a las normativas ambientales vigentes, los parámetros orgánicos en el agua condicionan la calidad de la misma para consumo humano y preservación de la vida acuática, los ríos presentan grandes niveles de contaminación orgánica principalmente por el vertido de aguas residuales provenientes de la población, por lo que la determinación de la materia orgánica contenida en el agua es una medida primordial en el establecimiento de sus condiciones físicas e índices de contaminación, mediante la cual, posteriormente, se determinan parámetros básicos en la gestión y depuración de agua (Ambientum , 2002).

El río Ambi, en el sector de la ciudad del conocimiento Yachay fue objeto de estudio desde el año 2014 por parte del Grupo de Investigación en Contaminación Ambiental (GICA) de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, en este se determinaron los parámetros inorgánicos y climáticos de la zona.

La importancia del estudio de las concentraciones de las especies orgánicas e inorgánicas en el sistema hidrográfico del río Ambi radicó en que la principal actividad económica de la zona de estudio es la agricultura y ganadería, la agricultura concentra el 39% del total de la población económicamente activa de la provincia de Imbabura, concentrándose en el cultivo de productos transitorios con la producción de fréjol, maíz, cebada y papa, por lo que potenciar el uso del agua del río Ambi y sus afluentes para estas actividades generarían beneficio en la comunidad (Ministerio de Coordinación de la Producción Empleo y Competitividad , 2011).

En Imbabura el río Ambi es el principal afluente, cruza cinco de los seis cantones. Los datos del ex Instituto Nacional de Riego, en el 2009, demostraban que el 60% del agua de riego de la provincia se extraía del río Ambi. El otro 40% se obtenía del río Tahuando, quebrada y acequias.

Su cuidado es un tema pendiente. Las descargas de las aguas residuales y basura son los inconvenientes. Sin embargo, no existe un estudio sobre el nivel de contaminación.

Otro aspecto a considerar fue que en la cuenca del río Ambi se encuentra ubicada la ciudad de conocimiento Yachay, la misma que cuenta con una inversión de 439 millones de dólares, además de que pretende potenciar la producción agrícola y pecuaria con la destinación de 1.000 has para el desarrollo de la agricultura experimental y agroindustrial.

Dentro de la modelación unidimensional, se incluye la modelación hidrológica, hidráulica y de calidad del agua desde varios puntos de vista. La realización del modelo unidimensional parte de la obtención de datos meteorológicos e hidrológicos. En el Ecuador dichos datos son medidos y proporcionados por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI). Para el presente proyecto se contó con tres estaciones meteorológicas principales que se ubican en la zona del estudio: Inguincho (M001), Otavalo (M105) y Cahuasqui-Fao (M107); ubicadas en la provincia de Imbabura. Para dichas estaciones se recopiló datos de precipitación, evaporación, evapotranspiración, humedad relativa, temperatura tomados desde el año 1979 hasta el 2015.

Para la medición de caudales se tuvo la estación hidrológica Ambi DJ Cariyacu (H0023), con datos desde el año 1963 al año 2000 y del año 2014 al primer semestre del año 2015.

## **1.2 Definición del problema**

La escasa información que se tiene sobre los cuerpos de agua y su calidad reflejados en los niveles de concentraciones iónicas y orgánicas, puede determinar el deterioro del nivel de vida de las poblaciones que utilizan dichas aguas para actividades especialmente agrícolas, el desconocimiento de la composición de minerales y organismos biológicos en las aguas de ríos, lagos, lagunas, etc., puede llevar a que los cultivos se pierdan por ser regados con agua que no cumple con los

estándares de calidad establecidos en normativas. Así también la variación de estas concentraciones en el tiempo en un cuerpo de agua ayuda a entender que factores del sistema hidrográfico hacen que las aguas se vean afectadas en determinada composición mineralógica (Pinos, M., Pizarro, K., Pomavilla, J., 2011).

En el caso específico de esta investigación los principales problemas que se tienen en la subcuenca del río Ambi se los puede resumir en la Tabla 1:

**Tabla 1.**  
**Principales problemas en la subcuenca del río Ambi**

PROBLEMA	CAUSAS
Acelerado deterioro de las cuencas hidrográficas.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Contaminación de los recursos hídricos.</li> <li>• Conflictos de usos de la tierra.</li> <li>• Flora y fauna nativas en peligro de extinción.</li> <li>• Poco cuidado de las áreas protegidas.</li> <li>• Limitada atención a las zonas de riesgo.</li> </ul>
Producción agropecuaria no sustentable.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prácticas agrícolas inadecuadas.</li> <li>• Limitada asistencia técnica en agricultura y ganadería.</li> <li>• Falta de oportunidades para emprender en proyectos productivos.</li> <li>• Deficiencia en la provisión de agua en cantidad y calidad necesaria.</li> </ul>
Débil organización local para la gestión de los recursos naturales de la cuenca.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Falta de formas coherentes de asociación de la sociedad civil y de coordinación de sus instituciones.</li> <li>• Poca participación de los gobiernos locales para promover la conservación de la cuenca.</li> </ul>
Limitada capacitación de autoridades y pobladores para afrontar el manejo integrado de los recursos hídricos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desconocimiento de la población sobre el manejo sustentable de los recursos naturales.</li> </ul>

**Fuente:** (PRODERENA, 2001)

Todo lo anterior lleva a un plan de manejo ambiental que mitigue los problemas encontrados en la investigación producto de los modelación tanto geostadística como unidimensional, y así poder tratar las causas que originan los problemas en todo el sistema hidrográfico para aprovechar los recursos de una manera adecuada.

### **1.3 Justificación**

Partiendo del marco legal expresado en el Plan Nacional del Buen Vivir, específicamente en los objetivos tres y siete del mismo, en donde se recalca la importancia de mejorar la calidad de vida de la población y garantizar los derechos de la naturaleza promoviendo la sostenibilidad ambiental, territorial y global (PNBV, 2013), el proyecto de investigación está alineado a dichos objetivos al realizar una propuesta de manejo del recurso agua del río Ambi que tiene su uso potencial en actividades agrícolas, especialmente influenciado por el asentamiento de la ciudad Yachay, con una inversión aproximada de 439 millones de dólares (SENESCYT, 2015).

La elaboración del proyecto conllevó el manejo de información hidráulica, hidrológica, meteorológica y de calidad de aguas, los mismos que procesados en programas computacionales hidráulicos (HEC-RAS) e hidrológicos (HEC-HMS), permitieron predecir mediante la modelación, caudales máximos probables y la calidad actual y futura del sistema hidrográfico del río Ambi. Este análisis ayudó a comprender los procesos físicos y químicos de dicho sistema hidrográfico para uso agrícola y preservación de la vida acuática.

### **1.4 Objetivos**

#### **1.4.1 General**

Realizar un análisis de las concentraciones orgánicas e inorgánicas a través de modelos unidimensionales y geoestadístico con el fin de proponer un plan de manejo del recurso agua en el sistema hidrográfico del río Ambi.

### **1.4.2 Específicos**

- Recopilar datos meteorológicos, hidráulicos, morfológicos y especies orgánicas e inorgánicas del sistema hidrográfico del río Ambi desde el año 2014 al 2016.
- Medir especies orgánicas e inorgánicas en el sistema hidrográfico del río Ambi a través del muestreo del agua en dos épocas representativas del año (lluvias y estiaje).
- Realizar una modelación unidimensional (hidrológica, hidráulica y de calidad de agua) utilizando los programas HEC-HMS y HEC-RAS.
- Realizar un análisis multitemporal de las variables principales para observar el cambio en su comportamiento a través del tiempo.
- Realizar un análisis geoestadístico de las principales variables para predecir sus valores en puntos no muestreados.
- Realizar una propuesta de manejo del recurso agua de acuerdo a los potenciales usos del río Ambi, principalmente en actividades de riego.

### **1.5 Hipótesis**

Las concentraciones orgánicas e inorgánicas de las aguas del río Ambi se encuentran sobre el límite máximo permisible de la normativa legal vigente en el Ecuador (TULSMA), en particular con materia orgánica y con bacterias patógenas del grupo de los coliformes.

## CAPÍTULO 2

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Modelación unidimensional

Los modelos unidimensionales, asumen que una de las dimensiones prevalece sobre las otras dos. Esta dimensión es la longitudinal a lo largo del eje del río o canal, el tirante y la velocidad son calculadas de las secciones transversales introducidas, es decir toda la sección es representada por un único valor medio de velocidad, los modelos unidimensionales no consideran variaciones en la distribución de velocidades horizontal y verticalmente (Elera, 2005).

Los modelos unidimensionales se basan en esquemas numéricos relativamente simples pero eficaces (ecuación de la conservación de la energía, ecuación de Manning, ecuación de la cantidad de movimiento, etc.), que pueden considerar cambios de régimen, cauces con geometrías complejas y con llanuras de inundación y singularidades tales como azudes, puentes, pasos bajo vía, etc (Bladé, E., Sánchez, M., Sánchez, H., Niñerola, D., Gómez, M., 2009).

#### 2.2. Modelo hidráulico unidimensional con HEC- RAS

HEC-RAS (River Analysis System - Water Surface Profile Modeling) es un paquete computacional desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de las Fuerzas Armadas de los Estados Unidos (USACE) para la modelación hidráulica de la corriente en ríos o en canales artificiales. La simulación numérica del flujo se fundamenta en las ecuaciones del flujo unidireccional (Fitchner Hidroestudios, 2014).

El procedimiento computacional se basa en la solución unidimensional de la ecuación de la energía (Bernoulli). Las pérdidas de energía corresponden al efecto de la fricción en forma continua evaluadas por medio de la ecuación de Manning y a la contracción/expansión entre secciones transversales adyacentes en forma local

evaluada por medio de un factor o porcentaje de la altura de velocidad media. La ecuación de momentum (impulso o cantidad de movimiento) es utilizada en situaciones en las cuales el perfil de agua es rápidamente variado, estas secciones incluyen la presencia del resalto hidráulico, de puentes y confluencia de tributarios al río principal (Engineers U.A, 2014).

La metodología del cálculo se basa en la resolución de la ecuación de balance de la energía en una dimensión mediante un proceso iterativo. La ecuación de energía de Bernoulli se presentan en la Ecuación (1):

$$Y_2 + Z_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Y_1 + Z_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad (1)$$

Dónde:

$Y_1, Y_2$  = Altura lámina de agua en la sección

$Z_1, Z_2$  = Elevación del canal principal

$V_1, V_2$  = Velocidades medias

$\alpha_1, \alpha_2$  = Coeficientes de velocidad

$g$  = Aceleración de la gravedad

$h_e$  = Pérdida de energía

Las pérdidas de energía se avalúan por el efecto de la fricción, ecuaciones de Manning y por contracción – expansión, la ecuación para el cálculo de la pérdida de energía se presenta en la Ecuación (2)

$$h_e = L\bar{S}_f + C \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right| \quad (2)$$

Donde:

$L$  = Tramo de descarga

$S_f$  = Pendiente por fricción representativa entre las dos secciones

$C$  = Coeficiente de pérdida por contracción y expansión

En secciones donde se desconoce las pérdidas de energía y existan variaciones rápidas del perfil de lámina la ecuación de “momentum” se utiliza para establecer el equilibrio de fuerza en los resaltos hidráulicos (Castro, E., Carrasco, L., 2009). Dicha ecuación se presenta en la Ecuación (3).

$$\frac{I}{A} * \frac{\delta Q}{\delta t} + \frac{I}{A} * \frac{\delta}{\delta x} \left( \frac{Q^2}{A} \right) + g \frac{\delta Y}{\delta x} - gS_f - gS_0 = q_1(V_1)x \quad (3)$$

Donde:

Q = Caudal, en m<sup>3</sup>/s

t = Tiempo, en s

x = Distancia en la dirección de flujo, en m

y = Calado hasta el tubo del flujo, en m

A = Área mojada, en m<sup>2</sup>

v = Velocidad media, en m/s

Sf = Pendiente de la línea de energía, en m/m

g = Aceleración de la gravedad, en m/s<sup>2</sup>

### 2.3. Requerimientos de entrada para el modelo HEC-RAS

Para el desarrollo de la simulación numérica se debe contar con datos iniciales como topografía, hidrología, caracterización del material del contorno.

El estudio hidrológico permite definir los caudales de aguas naturales de los ríos modelados en sus distintos tramos, se requiere también del valor del coeficiente de resistencia “n” en la ecuación de Manning en función de la relación entre la profundidad hidráulica y el tamaño característico del material del contorno en secciones transversales representativas para cada tramo y para cada curso natural principal (Fitchner Hidroestudios, 2014).

## 2.4. Modelo de calidad de aguas unidimensional con HEC-RAS

El modelo de calidad de agua permite evaluar planes alternativos y simular condiciones actuales y futuras con el fin de analizar escenarios y anticipar las variaciones de concentración que tendrán los parámetros de calidad en las aguas (Serman & asociados s.a, 2008).

Para el análisis de la calidad de aguas, HEC-RAS utiliza un esquema numérico explícito para resolver la ecuación unidireccional de la dispersión – advección. El transporte y la variación de un limitado número de parámetros característicos de la calidad del agua (Engineers U.A, 2014).

El módulo de calidad de aguas permite el análisis detallado de la variación de la temperatura y transporte de diferentes componentes de la calidad del agua como: algas, oxígeno disuelto, DBO<sub>5</sub>, Fósforo (Orgánico y Ortofosfatos) y Nitrógeno (Amonio, Nitritos, Nitratos y Nitrógeno Orgánico).

Las condiciones de borde o parámetros de ingreso que requiere este módulo son: temperatura del agua, concentración de algas en los caudales afluentes, oxígeno disuelto, cargas contaminantes, DBO, nitrógenos, nitratos fósforos, coliformes fecales, Para realizar la simulación de análisis de calidad en HEC-RAS 5.0.1 se necesita previamente tener un modelo hidráulico calibrado (Fitchner Hidroestudios, 2014).

## 2.5. Calidad del agua

El concepto de calidad de agua sirve para definir características físicas, químicas y biológicas que se emplea como parámetros para definir la aceptabilidad de un agua cualquiera. La composición química de las aguas se ven alteradas por actividades agrícolas ganaderas e industriales, por el vertido de aguas residuales o por el paso del agua por terrenos tratados con productos agroquímicos. Como consecuencia de esto se incorporan sustancias de diferente naturaleza al agua natural (Carrera, *et al.*, 2015).

Dentro de los compuestos químicos más comunes a ser encontrados en aguas dulces están como constituyentes mayoritarios los carbonatos, bicarbonatos, sulfatos, cloruros y nitratos, y como constituyentes minoritarios los fosfatos y silicatos, metales como elementos traza y gases disueltos como oxígeno, nitrógeno y dióxido de carbono (UPDC, 2016).

## 2.6. Calidad de aguas para riego

Dentro de la calidad de agua para riego existen parámetros físico - químicos que desde el punto de vista agrícola son fundamentales, entre ellos se tiene: la temperatura, pH, conductividad eléctrica, sólidos totales, orgánicos, inorgánicos, bicarbonatos, boro, calcio, cloruros, fosfatos, magnesio, nitratos, potasio, sílice, sodio y sulfatos (Carrera, *et al.*, 2015).

Los problemas más comunes en el uso de agua para riego se relacionan con la salinidad medida en función de la conductividad eléctrica, alcalinidad, infiltración de agua en el suelo, toxicidad de iones presentes en ella, efectos causados por sólidos en suspensión, sodio entre otros (García, 2012).

### 2.6.1. Relación de adsorción de sodio RAS

El RAS es un parámetro que ayuda a predecir un problema potencial ocasionado por el sodio, expresa la concentración relativa de sodio respecto a las concentraciones de calcio y magnesio, esta relación fue propuesta por la USDA, en 1954, y es presentado en la Ecuación (4) (García, 2012).

$$RAS = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}} \quad (4)$$

Dónde: Na, Ca y Mg se expresan en meq/l

Esta relación propuesta por la USDA no considera los cambios debido a la solubilidad del calcio, por la presencia y combinación del calcio, carbonatos, bicarbonatos y sulfatos ocurren procesos de precipitación o dilución, los mismos que

exceden su producto de solubilidad y modifican las concentración del sodio (García, 2012).

En 1968, Bower *et al.* crearon una modificación de índice RAS, denominado RAS ajustado en donde se tiene en cuenta la formación de precipitados de  $\text{CaCO}_3$ , este método utiliza el índice de saturación de Langelier ( $\text{IS}=\text{pHa}-\text{pHc}$ ),  $\text{pHc}$  es el pH teórico que el agua debería tener en equilibrio con el  $\text{CaCO}_3$ , mientras que para el  $\text{pHa}$ , Bower *et al* (1983) aceptaron como valor fijo 8.4 debido a que ese es el valor de pH de un suelo no sodico que contiene  $\text{CaCO}_3$ , con base de que el suelo tiene mayor capacidad amortiguadora que el agua, si el índice de saturación es positivo el  $\text{CaCO}_3$  se precipita, mientras que los valores negativos indican que el  $\text{CaCO}_3$  se disuelve, en la Ecuación (5) se presenta la fórmula utilizada para el cálculo del RAS ajustado (Carrera, D., 2011).

El cálculo del  $\text{pHc}$  se calcula a partir del análisis del agua mediante la Tabla 2.

$$\text{RASaj} = \frac{\text{Na}}{\sqrt{\frac{\text{Ca} + \text{Mg}}{2}}} [1 + (8,4 - \text{pHc})] \quad (5)$$

Donde:

$$\text{pHc} = (\text{pK}_2' - \text{pK}_c') + p(\text{Ca}^{2+}) + p(\text{Alk}):$$

$$\text{pK}_2 - \text{pK}_c: [\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}] + [\text{Na}^+]:$$

$$\text{pCa}: [\text{Ca}^{2+}]$$

$$p(\text{Alk}) : [\text{CO}_3^{2-}] + [\text{HCO}_3^-]$$

**Tabla 2.**  
**Valores para el cálculo de  $\text{pHc}$**

Concentración	$\text{pK}_2 - \text{pK}_c$	$\text{pCa}$	$p(\text{Alk})$	Concentración	$\text{pK}_2 - \text{pK}_c$	$\text{pCa}$	$p(\text{Alk})$
meq/l				meq/l			
0.05	2.0	4.6	4.3	<b>2.50</b>	2.2	2.9	2.6
0.10	2.0	4.3	4.0	<b>3.00</b>	2.2	2.8	2.5
0.15	2.0	4.1	3.8	<b>4.00</b>	2.2	2.7	2.4
0.20	2.0	4.0	3.7	<b>5.00</b>	2.2	2.6	2.3
0.25	2.0	3.9	3.6	<b>6.00</b>	2.2	2.5	2.2

Concentración	pK <sub>2</sub> -pK <sub>c</sub>	pC <sub>a</sub>	p (Alk)	Concentración	pK <sub>2</sub> -pK <sub>c</sub>	pC <sub>a</sub>	p (Alk)
meq/l				meq/l			
0.30	2.0	3.8	3.5	<b>8.00</b>	2.3	2.4	2.1
0.40	2.0	3.7	3.4	<b>10.00</b>	2.3	2.3	2.0
0.50	2.1	3.6	3.3	<b>12.50</b>	2.3	2.2	1.9
0.75	2.1	3.4	3.1	<b>15.00</b>	2.3	2.1	1.8
1.00	2.1	3.3	3.0	<b>20.00</b>	2.4	2.0	1.7
1.25	2.1	3.2	2.9	<b>30.00</b>	2.4	1.8	1.5
1.50	2.1	3.1	2.8	<b>50.00</b>	2.5	1.6	1.3
2.00	2.2	3.0	2.7	<b>80.00</b>	2.5	1.4	1.1

**Fuente:** Ayers y Westcot, 1994

La relación de RAS ajustado sobreestima la peligrosidad del sodio por lo que Suarez (1981), citado por García (2012), propuso un RAS corregido en el que se tome en cuenta el efecto de los carbonatos, bicarbonatos y salinidad en los procesos de dilución y precipitación del calcio, la ecuación para el RAS corregido se presenta en la Ecuación (6).

$$RAS^{\circ} = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca^{\circ} + Mg}{2}}} \quad (6)$$

### 2.6.2. Salinidad potencial

La salinidad potencial es un índice que permite estimar el peligro que los iones cloruros y sulfatos pueden causar en el agua de riego ya que estos aumentan la presión osmótica en el suelo de los cultivos, los Cl<sup>-</sup> y SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> permanecen en la solución del suelo cuando la humedad aprovechable es menor al 50% (Aguilera, C., Martinez, E., R , 1996). El índice de salinidad potencial se calcula mediante la Ecuación (7) y las aguas según el índice de salinidad potencial se clasifican como indica la Tabla 3.

$$SP = Cl^{-} + 0.5 SO_4^{2-} \quad (7)$$

**Tabla 3.**  
**Cuadro de clasificación de aguas según el índice de Salinidad potencial**

Clase	Salinidad potencial (meq/l)
Buena	< 3
Condicionada	3-15
No recomendable	>15

Fuente: (Aguilera, C., Martinez, E., R , 1996)

### 2.6.3. Salinidad efectiva

La salinidad efectiva estima de manera más real el peligro que presentan las sales solubles del agua de riego al formar parte de la solución del suelo ya que considera la precipitación de carbonato de calcio, carbonato de magnesio, y sulfato de calcio, los mismos que aumentan la presión osmótica de la solución del suelo, la salinidad efectiva toma un mayor protagonismo cuando el agua de riego contiene grandes cantidades de carbonatos y bicarbonatos (Aguilera, C., Martinez, E., R , 1996).

La salinidad efectiva se calcula según las siguientes condiciones.

Si  $Ca^{2+} \geq (CO_3^{2-} + HCO_3^- + SO_4^{2-})$  Entonces :

$$SE = \sum cationes - (CO_3^{2-} + HCO_3^- + SO_4^{2-})$$

Si  $Ca^{2+} < (CO_3^{2-} + HCO_3^- + SO_4^{2-})$  pero  $Ca^{2+} > (CO_3^{2-} + HCO_3^-)$

$$\text{Entonces: } SE = \sum cationes - Ca^{2+}$$

Si  $Ca^{2+} < (CO_3^{2-} + HCO_3^-)$  pero  $(Ca^{2+} + Mg^{2+}) > (CO_3^{2-} + HCO_3^-)$

$$\text{Entonces: } SE = \sum cationes - (CO_3^{2-} + HCO_3^-)$$

Si  $(Ca^{2+} + Mg^{2+}) < (CO_3^{2-} + HCO_3^-)$  Entonces:

$$SE = \sum cationes - (Ca^{2+} + Mg^{2+})$$

Todos los iones deben ser expresados en meq/l. En la Tabla 4 se muestra la clasificación de las aguas según el índice de la salinidad efectiva.

**Tabla 4.**  
**Clasificación de las aguas según el índice de salinidad efectiva**

Clase	Salinidad efectiva (meq/l)
Buena	< 3
Condicionada	3-15
No recomendable	>15

Fuente: (Aguilera, C., Martinez, E., R , 1996)

## 2.7. Modelación hidrológica

Un modelo de simulación hidrológica es una representación simplificada de fenómenos que ocurren durante el ciclo hidrológico, tales como precipitación, evaporación, escorrentía y otros (Chow *et al.*, 1994).

El modelo hidrológico se lo realiza por medio de un conjunto de conceptos expresados en forma matemática y ligados por una secuencia espacio – temporal que se corresponde con la que se produce en la naturaleza (AQUAMARKET, 2005).

La modelación hidrológica es una herramienta de gran importancia para el estudio de avenidas, con este tipo de modelación se realiza el análisis y la prevención de las inundaciones; además, maneja hipótesis que ofrecen un cierto grado de confianza para la toma de decisiones, ya sea en la ordenación del territorio en torno a los ríos o para exigir criterios de diseño de obras e infraestructuras capaces de soportar y funcionar adecuadamente en situaciones de emergencia (Dueñas, C., 1997).

## 2.8. Modelación hidrológica con HEC-HMS

HEC-HMS es un paquete de modelación hidrológica desarrollada por el Cuerpo de Ingenieros de las Fuerzas Armadas de los Estados Unidos (USACE) , utiliza métodos de precipitación-escorrentía para estimar los hidrogramas de escorrentía directa generados por las precipitaciones en una cuenca o región durante un período especificado, además del cálculo de pérdidas, flujo base y propagación en cauces, para simular la respuesta hidrológica de una cuenca, el HEC-HMS utiliza los

siguientes componentes: modelo de la cuenca, modelo meteorológico, especificaciones de control y datos de entrada (Estrada,V., Pacheco,R., 2012).

El modelo de la cuenca representa a la cuenca física en donde se encuentran los parámetros de los elementos hidrológicos y se simula el proceso de escorrentía.

El modelo meteorológico consiste en calcular la entrada de precipitación requerida por un elemento, se pueden introducir los datos de precipitación del evento a simular y puede modelar lluvia congelada o líquida junto con evaporación. El modelo de control define el lapso de tiempo de la simulación, es decir, se especifica la fecha y hora de inicio y término de la precipitación, con un intervalo de tiempo que puede variar según la necesidad.

Los datos de entrada al modelo está relacionada con los métodos de cálculo que se van a operar. Los datos básicos que se debe proveer para realizar la modelación son los siguientes: precipitación histórica o de diseño, características del suelo, información morfométrica de las subcuencas, datos hidrológicos del proceso de transformación de lluvia en escorrentía, características hidráulicas de los tramos de canal y de la capacidad de los embalses.

Además para calibrar, validar y realizar el análisis de sensibilidad del modelo se requiere proporcionar información como hietogramas e hidrogramas y condiciones iniciales de humedad en los suelo (Tapia, 2012).

El programa utiliza cuatro procesos de simulación hidrológica (Silva *et al.*, 2005), que son:

1. Pérdidas por infiltración, el mismo que permite calcular que parte de la precipitación caída va a generar escorrentía directa, este proceso puede ser simulado mediante diferentes métodos.
2. Transformaciones, este proceso calcula la escorrentía directa producida por la lluvia neta.
3. El caudal base en donde suma a la escorrentía directa la escorrentía base puede utilizar el método de mensual constante, recepción exponencial o reservorio lineal.

4. El tránsito en canales este proceso calcula cómo evoluciona un hidrograma a medida que discurre a lo largo de un cauce o a través de un embalse.

## **2.9. Análisis multitemporal**

Un análisis multitemporal es el resultado de observar los valores de una variable a lo largo del tiempo en intervalos conocidos, permite detectar cambios entre dos o más fechas de referencia, deduciendo la evolución del medio natural o las repercusiones de la acción humana sobre ese medio (Chuvienco, 1990).

En un análisis multitemporal se toma como insumo básico los datos y las variables estudiadas en periodos de tiempo conocidos, el objeto del análisis es puntualizar y representar cualitativa y cuantitativamente las tendencias de cambio en forma de datos, tablas y gráficos, los mismos que evidencian la intensidad, localización y direccionamiento de las tendencias de cambio de las variables estudiadas en los periodos establecidos (Posada, E., Salvatierra, H., 2001).

## **2.10. Modelo Geoestadístico**

La geoestadística es una rama de la estadística aplicada, comprende a un conjunto de herramientas y técnicas que sirven para analizar y predecir los valores de una variable que se muestra distribuida en el espacio o en el tiempo de una forma continua tales como: porosidades, concentraciones de un contaminante, variables climatológicas entre otras. Debido a su aplicación orientada a los sistemas de información geográfica (SIG) es la estadística relacionada con los datos geográficos, de ahí que se le conozca además como estadística espacial (Moral Garcia, 2004).

Un análisis geoestadístico está compuesto por tres etapas, la primera etapa, conocida como análisis exploratorio de datos, está basada en técnicas estadísticas convencionales que permiten obtener todo un conjunto de información, desconocida a priori sobre la muestra bajo estudio, se lo puede realizar mediante análisis gráficos como histogramas, diagramas de caja entre otras para identificar valores atípicos la forma de la distribución, calcular medidas de variabilidad y correlación, esta etapa es importante para establecer si los supuestos de la geoestadístico son válidos y para

definir el procedimiento de predicción más conveniente, la segunda etapa es el análisis estructural esta etapa es el proceso de estimación y modelación de la función que describe la correlación espacial, la tercera etapa es la de predicciones que consiste en estimaciones de la variable estudiada en puntos no muestreados, considerando la estructura de correlación espacial seleccionada e integrando la información obtenida de forma directa en los puntos muestrales, y la conseguida indirectamente en forma de tendencias conocidas (Diaz, 2002).

### 2.10.1. Análisis estructural

Es la parte fundamental de la geoestadística, consiste en estimar y modelar una función que refleje la correlación espacial de la variable regionalizada a partir de la adopción razonada de la hipótesis más adecuada acerca de su variabilidad (Diaz, 2002).

El análisis estructural está compuesto por el cálculo del semivariograma experimental y un ajuste a un modelo teórico conocido, el semivariograma experimental determina las características de variabilidad y correlación espacial del fenómeno estudiado (Gutierrez, 2006).

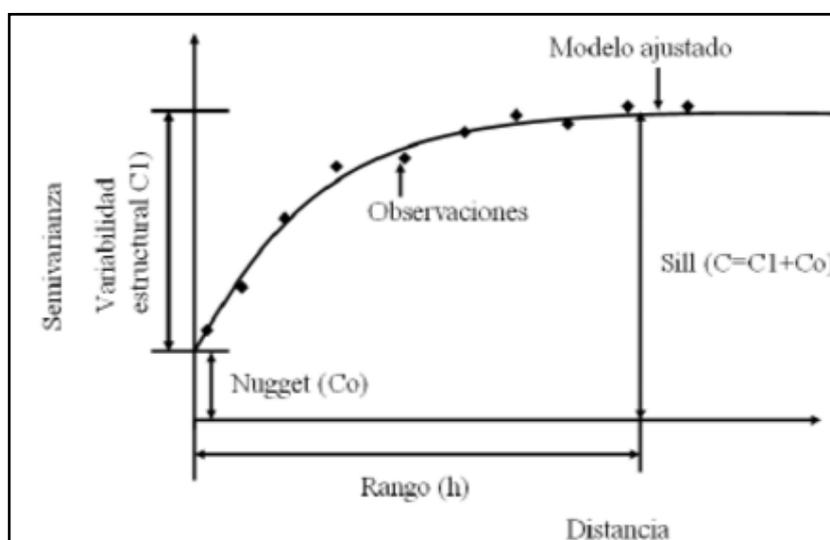
El semivariograma es una función que relaciona la semivarianza con el vector  $h$ , el cual denota la separación en distancia y dirección de cualquier par de valores, la ecuación del semivariograma está representados en la Ecuación (8).

$$\tilde{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i + h) - Z(x_i)]^2 \quad (8)$$

Donde,  $N(h)$ , es el número total de pares de muestras separados por un intervalo de distancia  $h$ .  $Z(x)$  es el valor de la muestra en una localización  $x$ .  $Z(x+h)$  es el valor de la muestra a la distancia de intervalo  $h$  desde  $x$ .

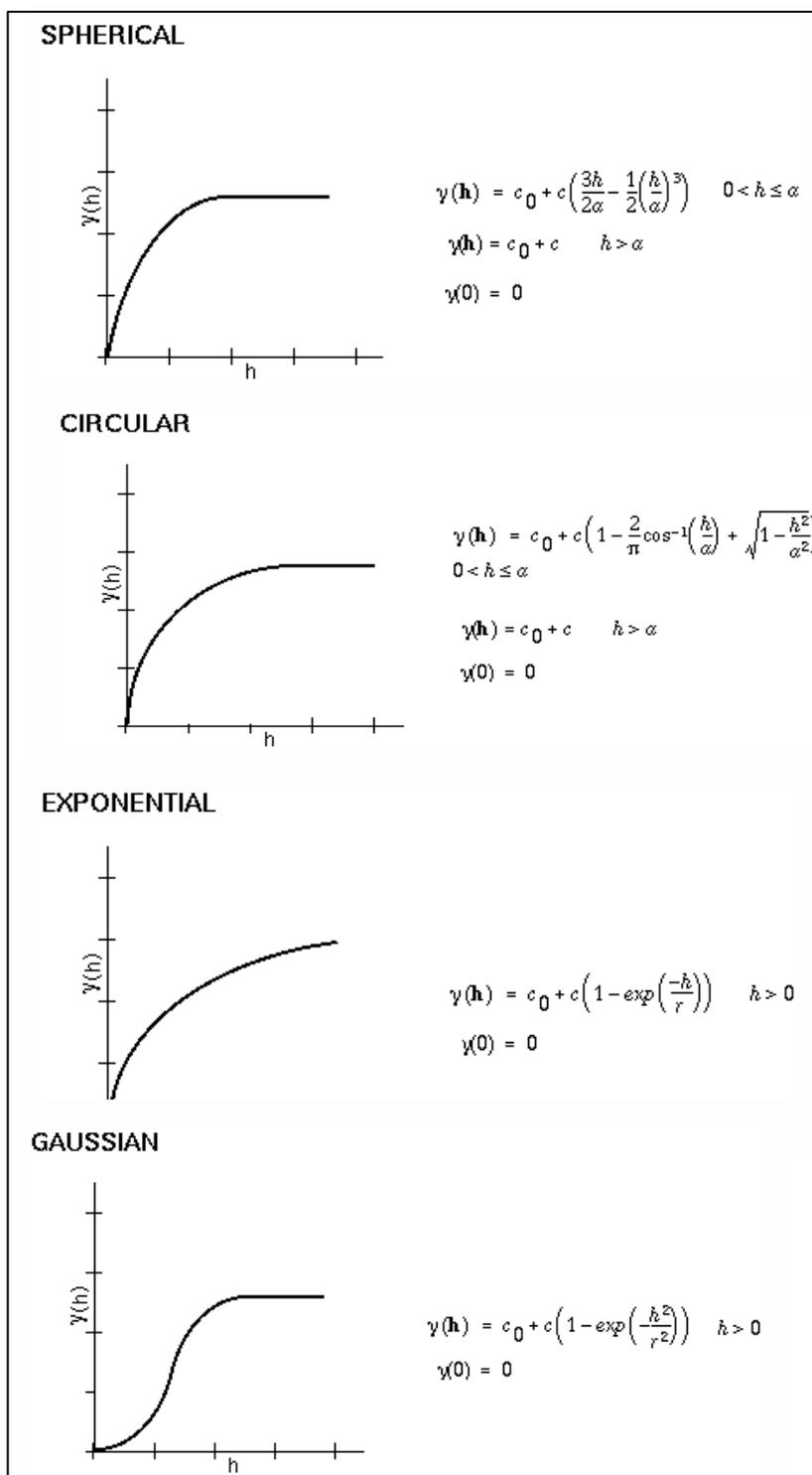
Existen distintos modelos de semivariogramas teóricos para poder ajustarse al semivariograma experimental, estos modelos pueden ser acotados y no acotados los acotados pueden ser lineales, logarítmicos y potenciales mientras que los no acotados pueden ser esféricos exponenciales y gaussianos (Diaz, 2002).

Todos los modelos experimentales están compuestos por tres parámetros que son: el efecto pepita o nugget conocida como  $C_0$  y es una discontinuidad del semivariograma con el origen se debe a errores de medición o escala de la variable, la meseta, se denota por  $C_1$  que es límite del semivariograma cuando la distancia  $h$  tiende al infinito debido a que el efecto pepita representa error en la medición para tener un modelo que explique bien la realidad se debe tener cuidado con que la pepita no represente más del 50% de la meseta y el rango que es la distancia hasta la cual hay correlación entre los datos. En la Figura 1 se presenta estos elementos del semivariograma teórico.



**Figura 1. Elementos del semivariograma teórico**

En la Figura 2 se presentan los principales modelos teóricos del semivariograma con sus respectivas ecuaciones.



Fuente: (ArcGIS, 2010)

**Figura 2. Modelos teóricos de semivariogramas**

### 2.10.2. Método de Kriging

Este método está basado en modelos estadísticos que incluyen la autocorrelación entre los puntos medidos, presupone que la distancia o la dirección entre los puntos de muestra reflejan una correlación espacial que puede utilizarse para explicar la variación en la superficie. La herramienta Kriging ajusta una función matemática a una cantidad especificada de puntos o a todos los puntos dentro de un radio específico para determinar el valor de salida para cada ubicación. En el método de Kriging la forma del semivariograma nos indica la capacidad de predicción de cada punto en función de la distancia la fórmula general del método de Kriging se detalla en la Ecuación (9) (ArcGIS, 2010).

$$Z(S_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(S_i) \quad (9)$$

Donde :

$Z(s_i)$  = el valor medido en la ubicación  $i$

$\lambda_i$  = una ponderación desconocida para el valor medido en la ubicación  $i$

$s_0$  = la ubicación de la predicción

$N$  = la cantidad de valores medidos

La clasificación del método de Kriging según el estimador lineal puede ser simple, ordinario, universal o residual, de estos métodos el método de Kriging simple requiere el conocimiento de la media y la covarianza por lo que se vuelve impráctico ya que estos datos generalmente son desconocidos (Diaz, M., Gonzales, R. , 2009)

El Kriging ordinario es el más general y más utilizado de los métodos Kriging presupone que el valor medio constante es desconocido, El Kriging universal presupone que hay una tendencia de invalidación en los datos y puede modelarse a

través de la función determinística polinómica. Esta función polinómica se resta de los puntos medidos originalmente y la autocorrelación se modela a partir de los errores aleatorios (ArcGIS, 2010).

En el método de Kriging ordinario al desconocer la media se establece una condición adicional al sistema de ecuaciones del Kriging simple, en este método se debe buscar que los valores de las ponderaciones ( $\lambda$ 's) minimicen la varianza y satisfagan que su suma sea igual a uno, para garantizar la condición de insesgamiento es decir que la esperanza matemática coincide con el valor real del parámetro a estimar, lo cual se resuelve a través del método de interpoladores de Lagrange (Diaz, M., Gonzales, R., 2009), la ecuación que rige el método de Kriging ordinario se encuentra detallado en la Ecuación (10).

$$Z(u) = \sum_{\alpha=1}^N \lambda_{\alpha}(u)Z(u_{\alpha}) \quad (10)$$

### 2.10.3 Método determinístico (IDW)

El método de inverso de la distancia ponderada (IDW) es un método determinístico que utiliza la distancia de los puntos con datos hacia el punto desconocido, asignando pesos a los datos del entorno en función inversa a la distancia que los separa del punto desconocido. En este método se asume que la influencia local del punto disminuye con la distancia dando así un mayor peso a los puntos observados más cercanos al punto desconocido y una menor ponderación a los puntos más alejados, la fórmula en la que se basa el método de IDW se presenta en la Ecuación (11) (Abad, 2014).

$$Z(s) = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{d_i^{\alpha}}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i}} \quad (11)$$

El método IDW está basado en la inversa de la distancia elevada a una potencia matemática ( $\alpha$ ), el mismo permite controlar la significancia de puntos conocidos en los valores interpolados basándose en la distancia desde el punto de salida, para una potencia alta el énfasis es mayor sobre los puntos más cercanos, mientras que una potencia menor le da mayor importancia a los puntos más distantes, el valor predeterminado de esta potencia es de dos (ArcGIS, 2010).

### **2.11. Análisis de Componentes Principales**

El Análisis de Componentes Principales (ACP) es una técnica estadística de síntesis de la información, o reducción de la dimensión o número de variables. Es decir, ante un banco de datos con muchas variables, el objetivo será reducirlas a un menor número perdiendo la menor cantidad de información posible. Los nuevos componentes principales o factores serán una combinación lineal de las variables originales, y además serán independientes entre sí (Terrádez, 2013).

En este análisis, no se parte de una hipótesis previa, y es un método descriptivo que básicamente permite obtener una representación de nuestros casos en el nuevo espacio dimensional de nuestras nuevas variables o componentes principales. Se generan como función lineal de las variables, es decir no se parte de factores iniciales (Guisande, C., Barreiro, A., Maneiro, I., Riveiro, I., Vergara, A., Vaamonde, A., 2006).

## CAPÍTULO 3

### METODOLOGÍA CUENCA DEL RÍO AMBI

#### 3.1. Descripción del área de estudio

El proyecto se llevó a cabo en el sistema hidrográfico del río Ambi el mismo que se encuentra ubicado en la provincia de Imbabura, pertenece a la cuenca del río Mira ubicada en la parte oriental con respecto a la cordillera de Toisan, (Flores, 2010).

Dentro de la cuenca del río Mira se halla la subcuenca del río Ambi que se encuentra limitada al norte por el río Chota- Mira, al sur por el nudo de Mojanda, al oriente por Pimampiro y el río Chota y al occidente por las estribaciones internas de la Cordillera Occidental de los Andes. La cuenca del río Ambi cubre 1129.8 km<sup>2</sup> de extensión aproximadamente y está conformada por los cantones: San Miguel de Urcoquí, Antonio Ante, Cotacachi, Ibarra y Otavalo.

En parte de la cuenca se sitúa la ciudad del conocimiento Yachay en las parroquias de Urcoquí y Tumbabiro, esta abarca un área de 45.93 km<sup>2</sup> y según el resumen ejecutivo del informe de Desarrollo e Instrumentalización de la Planificación Urbana se estima una población de 69.752 habitantes.

El río Ambi nace en el cerro Imbabura a 4000 m.s.n.m, con los afluentes Itambí que alimenta al lago Imbakucha- San Pablo que luego con el nombre de Jatunyacu se une al Blanco y al Yanayacu formándose así el río Ambi (A. B. L. Antonio, 2014).

En la Figura 3 se muestra el mapa de ubicación de la subcuenca del río Ambi.



**Figura 3. Mapa de ubicación de la subcuenca del río Ambi**

## 3.2. Muestreo y análisis de agua.

### 3.2.1 Muestreo

El muestreo de agua se lo realizó a lo largo del sistema hidrográfico del río Ambi considerando los puntos tomados en el proyecto realizado por Tamayo (2016) “Calidad de aguas y suelos en la cuenca del río Ambi para uso agrícola en los campos experimentales en la ciudad del conocimiento Yachay mediante análisis físico-químico”, en donde se realizó un muestreo en el mes de octubre de 2014 correspondiente a épocas intermedias de precipitaciones y un segundo muestreo en el mes de abril de 2015 correspondiente a épocas de lluvia.

Para el presente estudio se realizó el muestreo en dos épocas representativas del año 2016, determinadas a partir de los datos de precipitación proporcionados por el Instituto Nacional de Hidrología y Meteorología del Ecuador (INHAMI).

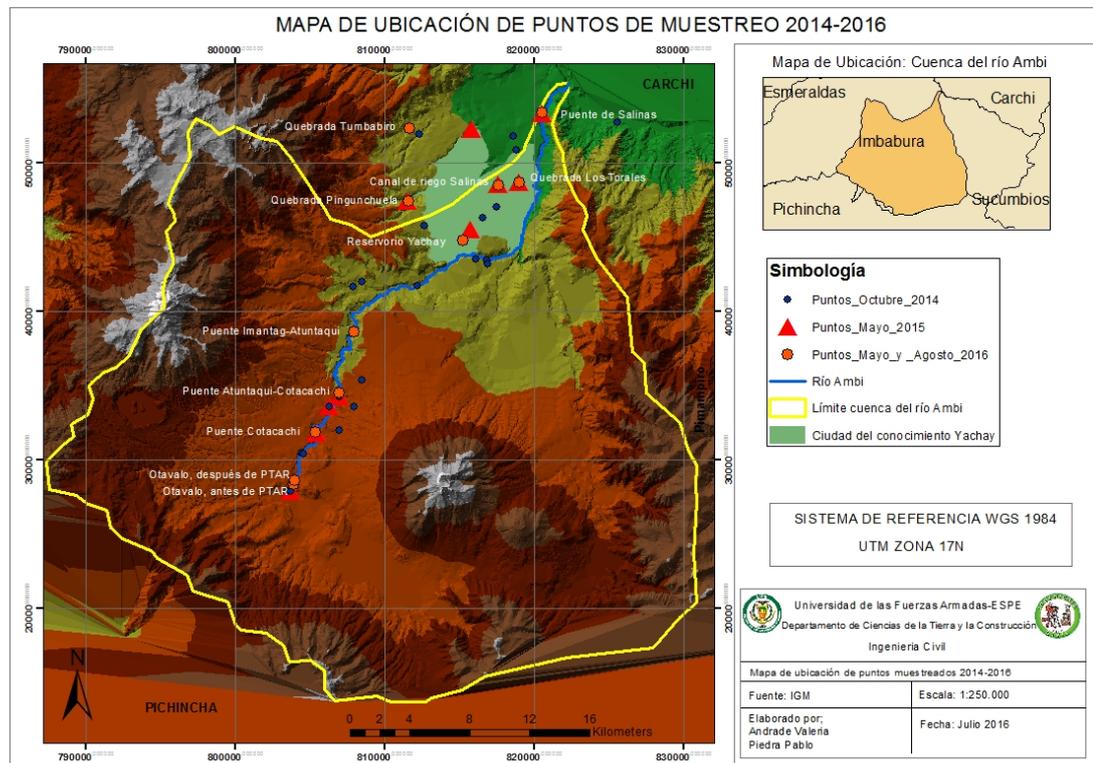
El primer muestreo se lo realizó en época de altas precipitaciones, específicamente en mayo del 2016 en donde se tomaron 10 puntos, el segundo

muestreo se lo realizó en época de estiaje en el mes de agosto del 2016. La descripción y coordenadas geográficas de los puntos considerados en ambos muestreos se encuentran detalladas en la Tabla 5. Así, para este estudio se contó con información obtenida en los años 2014, 2015 y 2016 con un total de 57 puntos monitoreados, de los cuales se utilizó la información de los puntos que presentaron concentraciones más críticas en el sistema hidrográfico.

**Tabla 5.**  
**Coordenadas de los Puntos de muestreo de agua del Sistema Hidrográfico del río Ambi**

Punto	Coordenadas			Temp °C	Descripción
	N	E	Z		
1	820491	53296	1691	20	Puente de salinas
2	818999	48609	1759	22	Hacienda Yachay , Quebrada los Torales, puente hidrogeológico, ojo de agua
3	817611	48462	1824	21	Yachay, Canal de riego Salinas
4	815179	44735	2060	23	Yachay, Reservorio Yachay
5	811628	52268	2600	19	Tumbabiro,quebrada Tumbabiro
6	811540	47385	2137	23	Quebrada Pinginchuela
7	807966	38557	2172	19	Rio Ambi, Puente Imantag Atuntaqui
8	806944	34482	2293	20	Rio Ambi, Puente Atuntaqui Cotacachi
9	805382	31803	2390	17	Cotacachi Rio Ambi, puente Cotacachi
10	803914	28354	2464	16	Otavaló, inicio río Ambi, antes de PTAR

En la Figura 4, se muestran los puntos de muestreo del 2014 al 2016 tomados a lo largo del sistema hidrográfico del río Ambi.



**Figura 4. Mapa de ubicación puntos de muestreo**

Los puntos muestreados en las quebradas Tumbabiro y Pingunchuela a pesar de estar fuera del área de la subcuenca, fueron considerados debido a sus altas concentraciones, señaladas en el trabajo de investigación elaborado por Tamayo (2016).

En la investigación de Tamayo (2016) de un total de 26 puntos monitoreados en el primer muestreo en octubre del 2014, se determinó por medio del nivel de concentraciones inorgánicas 11 puntos con concentraciones relevantes para ser considerados en el muestreo de abril de 2015 los mismos que fueron considerados para el presente proyecto de investigación.

Para el muestreo se siguió lo establecido en las normas NTE INEN 2-176 y NTE INEN 2-169 para la toma y preservación de las muestras tomadas en campo, teniendo en consideración los recipientes de almacenamiento temperaturas y tiempo

de conservación de la muestra para evitar la modificación del contenido de dióxido de carbono y la variación en el valor del pH y concentraciones inorgánicas.

### 3.2.2. Método de Análisis

Para el análisis de las muestras del agua se analizaron 17 parámetros, los cuales fueron ensayados en el laboratorio de Medio Ambiente de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE en el año 2016. Los parámetros, metodología y normativa de referencia considerada se encuentran detallados en la Tabla 6. Los procedimientos, materiales, reactivos y cálculos realizados para cada uno de los ensayos descritos se encuentran detallados en el Anexo 1.

En el Anexo 2, se presentan imágenes de los muestreos realizados en campo y de los ensayos realizados en el laboratorio de Medio Ambiente de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE.

**Tabla 6.**  
**Métodos Estándares para Análisis de Agua**

PARÁMETRO	MÉTODO/EQUIPO	NORMA DE REFERENCIA
Temperatura	Termométrico / Termómetro de mercurio Promolab®	EPA 1983, método 170.1
pH	Multiparamétrico HACH ión pH	(HACH, 2000).
Conductividad eléctrica	Multiparamétrico HACH ión CE	(HACH, 2000).
Sodio y potasio	Absorción atómica	(APHA, 2005). Método 3111
Calcio	Volumétrico, titulación EDTA 0.01 M / indicador Murexida	(APHA, 1998), método 3500-Ca-B
Magnesio	Dureza, volumétrico titulación EDTA 0.01 M/ negro de Eriocromo	(APHA, 1998). Método 2340C
	Magnesio: método por cálculo	(DINAMA, 1996). Código 12101.

<b>PARÁMETRO</b>	<b>MÉTODO/EQUIPO</b>	<b>NORMA DE REFERENCIA</b>
Carbonatos	Alcalinidad, volumétrico titulación con ácido sulfúrico 0.02 N, indicador: Fenolfaleina / Naranja de Metilo	(EPA, 1983). Método 310.1
Bicarbonatos	Volumétrico titulación con ácido sulfúrico 0.02 N, indicador: Fenolfaleina / Naranja de Metilo	(EPA, 1983). Método 310.1
Cloruros	Titulación con nitrato de plata 0.0191 N, indicador: Dicromato de Potasio	(NTE INEN 0976, 1984).
Boro	Método de la Curcumina	(APHA, 1988). Método 4500-B B
Fosfatos	Espectrofotetría / Espectrofotómetro Hach DR5000	(HACH, 2000). Método 8190
Sulfatos	Espectrofotetría / Espectrofotómetro Hach DR5000	(HACH, 2000). Método 8190
Nitratos	Espectrofotetría / Espectrofotómetro Hach DR5000	(HACH, 2000). Método 8051
STD (sólidos totales disueltos)	Gravimetría utilizando estufa Hot-Plate. Modelo Type 2200 Thermoline	(APHA, 1995). Método 2540B
DBO <sub>5</sub>	Hach BOD Track / Método de Winkler	(APHA, 2005), método 5210B
DQO	Espectrofotetría / Espectrofotómetro Hach DR5000	(HACH, 2000).
Coliformes fecales	Método filtro de membrana	(APHA, 2005), método 9222D

### 3.3. Datos meteorológicos

Para el análisis de los datos meteorológicos para la determinación de los histogramas de precipitación y la precipitación media de la cuenca con los que se obtuvieron las épocas representativas de muestreo y los datos necesarios para los modelos unidimensionales en HEC-HMS y HEC-RAS se contó con los datos proporcionados por el INAMHI de las estaciones meteorológicas principales que se ubican en la zona del estudio: Inguincho (M001), Otavalo (M105), Cahuasqui-FAO

(M107), La Victoria (M009) y Pimampiro (M0315); ubicadas en la provincia de Imbabura de las cuales se cuentan con datos de precipitación, desde el año 1979 hasta el 2015. Los datos proporcionados por el INAMHI no estaban completos por lo que los mismos fueron rellenados mediante dos metodologías, la de regresión lineal y la de la razón normal, debido a la gran cantidad de datos faltantes la mejor metodología fue la de regresión lineal, se utilizó la estación M0009 como estación de referencia para el relleno de datos, y la validación de los datos rellenos se realizó mediante dos metodologías, la primera fue la prueba de rachas y la segunda la curva de doble masa (Carrera, D., Guevara, P., Tamayo, L., Balarezo, A., Narvaez, C., Morocho, D., 2016).

Para la obtención de los hietogramas de precipitación se requirió la información de precipitaciones máximas en 24 horas de las estaciones M001, M105, M107, M315 Y M009 las mismas que se encuentran en la zona del estudio, al ser los datos proporcionados por el INAMHI incompletos se requirió del relleno de datos lo cual se realizó mediante el método de regresión lineal. Se utilizó la estación Otavalo (M105) como estación de referencia y se comprobó la correlación de los datos rellenos con la prueba de doble masa.

### **3.4. Modelos unidimensionales**

#### **3.4.1. Modelación hidráulica y de calidad**

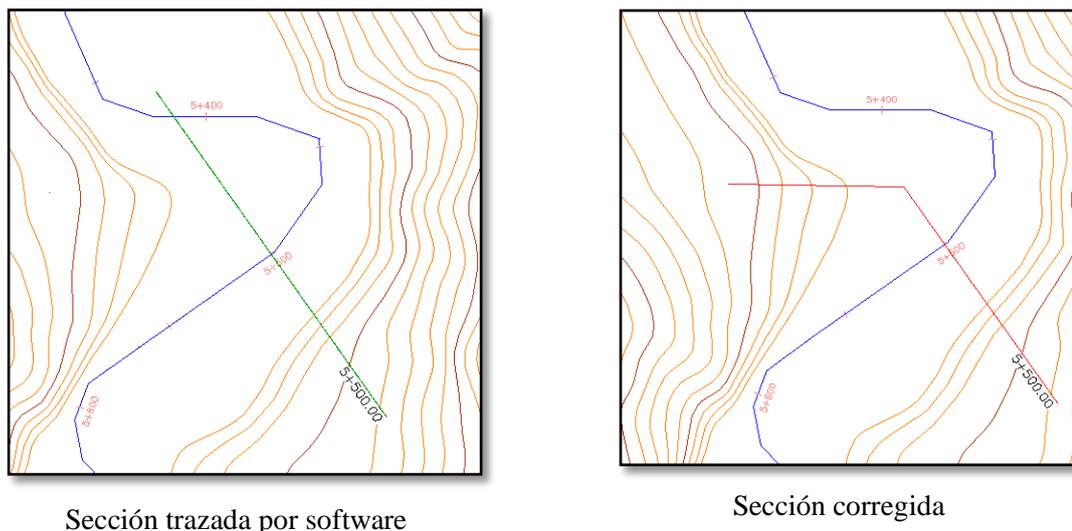
Para la modelación hidráulica y de calidad del río se utilizó el software libre HEC-RAS desarrollada por U.S. Army Corps of Engineers, de los Estados Unidos, la modelación hidráulica permitió establecer las condiciones del flujo a lo largo de los cauces, definiendo variables importantes como: alturas de agua, velocidad y tiempos de flujo, además de ser el requisito indispensable para realizar la simulación de análisis de calidad de agua.

El modelo de calidad de agua se lo realizó mediante el módulo de calidad de aguas de HEC-RAS 5.0.1, el cual permitió el análisis detallado de la variación de la temperatura y transporte de diferentes componentes de la calidad del agua (FITCHNER HIDROESTUDIOS, 2014).

Para la realización del modelo hidráulico y posteriormente el modelo de calidad se requirió de distintos datos de entrada como fueron las secciones transversales del río, el coeficiente de rugosidad, los caudales del río, caudales sanitarios y parámetros de calidad de las aguas medidos como oxígeno disuelto, DBO, DQO, nitratos fosfatos entre otros parámetros.

#### 3.4.1.1. Secciones transversales del río

Para la determinación de las secciones transversales se utilizó el software CIVIL 3D, en donde a partir de la topografía a lo largo del cauce del río Ambi obtenido del Instituto Geográfico Militar (IGM) a una escala de 1:5000 con curvas de nivel cada 5m, se obtuvo una superficie topográfica con la que se pudo trazar secciones transversales cada 500 m de longitud. Las secciones transversales fueron trazadas perpendiculares al cauce del río de manera automática por el software, por lo que en ciertas secciones se tuvo que realizar un ajuste manual para que la sección sea trazada perpendicular al cauce y a la topografía. En la Figura 5 se muestra un ejemplo de una sección obtenida automáticamente por el software y la corrección manual realizada en la misma, dichas correcciones fueron fundamentales para la exportación correcta de las secciones en el programa HEC-RAS.



**Figura 5. Vista en planta sección 5+500.00 m río Ambi**

Al tener una topografía a escala 1:5000 se encontraron errores e imprecisiones en el ancho del río, por lo que para corregir los mismos se ocupó un shape con información del ancho del río Ambi obtenido del geoportal del IGM, con el cual se midió el ancho en todas las secciones y se corrigieron los mismos en todas las secciones analizadas para finalmente exportarlas al software HEC-RAS.

### 3.4.1.2. Coeficiente de rugosidad de Manning

Para la selección del coeficiente de rugosidad se adoptó los valores presentados en la Tabla 7 desarrollado por King, H.W (1954), en donde se selecciona el coeficiente de acuerdo a la superficie y las condiciones de las paredes del canal en donde con un asterisco se señala los valores más usados en la práctica. El estudio “Conducción de agua por canales” realizado por la Facultad de Agronomía de la Universidad de la Republica en Uruguay, recomienda valores de rugosidad de acuerdo a la forma superficie y vegetación del canal, dichos coeficientes se presentan en la Figura 6.

**Tabla 7.**  
**Coeficiente de rugosidad de Manning**

Superficie	Condición de las paredes		
	Buena	Regula	Mala
En tierra, rectos y uniformes	0.020	0.0225	0.025
En roca, lisos y uniformes	0.030	0.033*	0.035
En roca, con salientes, sinuosos	0.040	0.045	
Sinuosos de escurrimiento lento	0.025*	0.0275	0.030
Dragados en tierra	0.0275*	0.030	0.033
Lecho pedregoso, bordes de tierra y maleza	0.030	0.035*	0.040
Plantilla de tierra, taludes ásperos	0.030*	0.033*	0.035

Fuente: King, H.W, 1954.



**Figura 6. Valores de coeficiente de Manning**

**Fuente:** (U.S. Geological Survey, 1989)

Otra forma de calcular el coeficiente de rugosidad es considerando el valor de “n” como el resultado de la acción combinada de una serie de factores que lo afectan. Esta forma es llamada como el método de Cowan determinado por la Ecuación (12) (Chow, Ven Te., 2004).

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4)n_5 \quad (12)$$

Donde:

- n<sub>0</sub> = Valor básico de n para un canal recto y uniforme de un material dado.
- n<sub>1</sub> = Se determina para corregir el efecto por irregularidades de la superficie.
- n<sub>2</sub> = Se considera las variaciones en la forma y tamaño de la sección transversal del canal.
- n<sub>3</sub> = Se considera el efecto de obstrucción u obstáculos al flujo.
- n<sub>4</sub> = Depende de la vegetación.
- n<sub>5</sub> = Depende de la sinuosidad longitudinal del canal

### 3.4.1.3. Determinación de caudales

Para la determinación de los caudales necesarios para la modelación hidráulica y de calidad en el programa HEC-RAS se partió de los caudales medidos en la estación hidrométrica Ambi DJ Cariyacu (H0023), con datos desde el año 1963 al año 2000 y del año 2014 al primer semestre del año 2015, de estos datos se obtuvieron los caudales mínimos, medios y máximos anuales con los cuales a partir de la metodología propuesta en el estudio “Determinación de Caudales en cuencas con poco información Hidrológica” , se calculó el coeficiente de escorrentía presentado en la Ecuación (13). (Sandoval, W., Aguilera, E., 2014).

$$C = \frac{Q_0 10^6}{31.71 \bar{P} A} \quad (13)$$

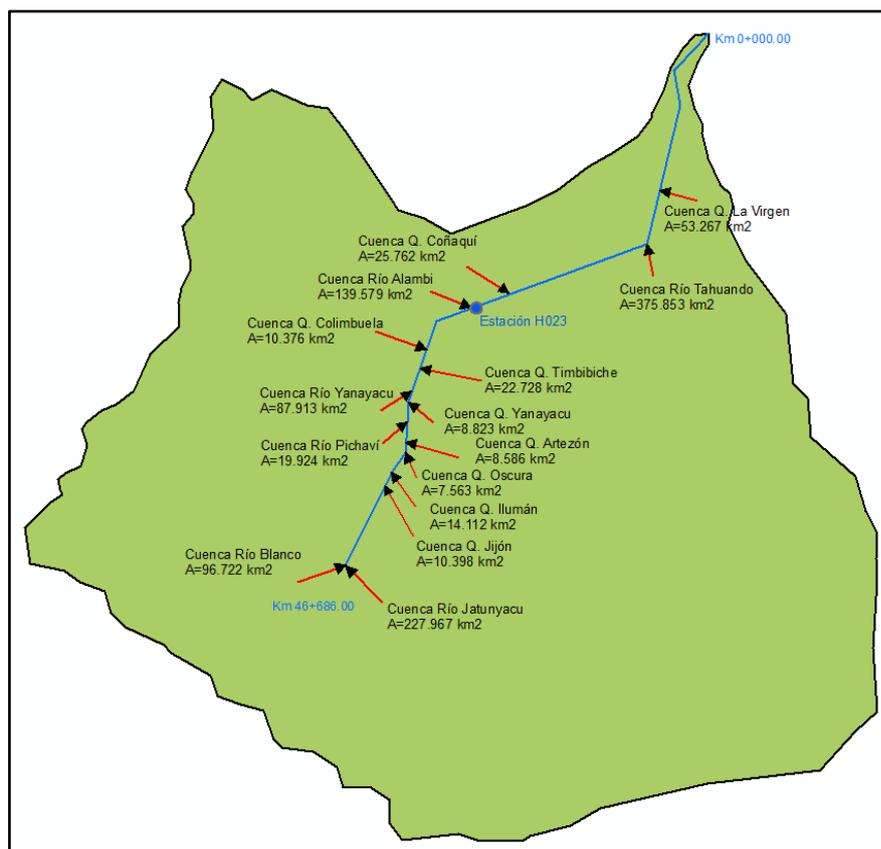
Donde :

$Q_0$  = Caudal medio de la cuenca, en  $m^3/s$

$\bar{P}$  = Promedio de precipitaciones anuales de la cuenca (mm)

$A$  = Área de la cuenca

Para el cálculo del coeficiente de escorrentía se tuvo el caudal medio medido en la estación hidrométrica, se trazó la cuenca correspondiente al caudal medido y mediante el método de isoyetas se encontró la precipitación promedio de la cuenca. Se realizó un esquema presentado en la Figura 7, en donde se indican los aportes puntuales de caudal que se tiene en el sistema hidrográfico del río Ambi. Para cada aporte de caudal se trazó la subcuenca correspondiente indicadas en la Figura 8 y se calculó la precipitación media con el método de las isoyetas.

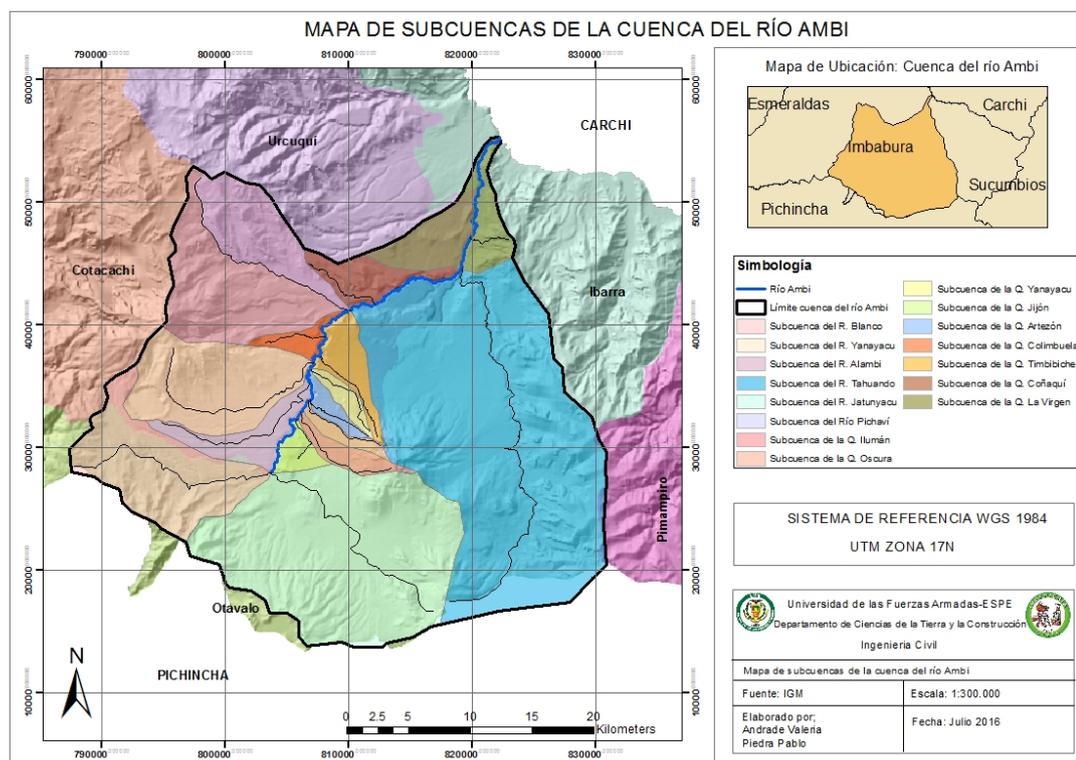


**Figura 7. Esquema del modelo de caudales para HEC-RAS.**

Con el coeficiente de escorrentía, las áreas y precipitaciones medias de las subcuencas se pudo calcular mediante la Ecuación (14) el caudal correspondiente (Sandoval, W., Aguilera, E., 2014).

$$Q_o = \frac{31.71 * C * \bar{P}A}{10^6} \quad (14)$$

De igual manera se trabajó para la determinación de los caudales mínimos y máximos.



**Figura 8. Mapa de subcuencas del sistema hidrográfico del río Ambi**

#### 3.4.1.4. Determinación de caudales sanitarios

Los caudales sanitarios fueron calculados por medio de la población correspondiente a las parroquias y cantones ubicadas en la cuenca de río Ambi, cuya descarga sanitaria es realizada en los principales ríos y quebradas de las 15 subcuencas que posteriormente desembocan en el río Ambi. Dicha población fue multiplicada por la dotación de agua potable correspondiente y afectado por el coeficiente de retorno de aguas residuales (IEOS, 1992).

Para el cálculo de la población se acudió a la información proporcionada por el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC), esta institución cuenta con datos actualizados hasta el censo realizado en año 2010. Además para la zona del proyecto existe un shape con información acerca de la ubicación, población y densidad poblacional de las parroquias de la zona del proyecto, con dicha información fue posible el cálculo de la población que aporta caudal sanitario en cada una de las

subcuencas del proyecto. La población fue calculada para el año 2010 que es el último año de actualización de los datos del INEC y por medio de la tasa de crecimiento poblacional para las parroquias consideradas se proyectó la población para el año 2016, 2020, 2030 y 2040.

La dotación correspondiente a cada población fue determinada por medio de la información de los planes territoriales de las principales parroquias consideradas y en los valores proporcionados por la Norma de Abastecimiento de Agua Potable y Eliminación de Aguas Residuales en el Área Urbana y Rural (IEOS, 1992).

El coeficiente de retorno “c” se obtiene de mediciones de zonas residenciales típicas, dicho coeficiente fue determinado de acuerdo a proyectos realizados en la zona donde un valor típico de dicho coeficiente es de 0.75 (IEOS, 1992).

Con esto, finalmente los caudales sanitarios se calcularon según la Ecuación (15):

$$Q_s = \frac{\text{Dotación} * \text{Población}}{86400} * c \quad (15)$$

Los datos de población existentes corresponden al último censo realizado en 2010, por lo que los caudales sanitarios correspondieron también a dicho año. En el modelo se pretendió conocer la calidad teórica actual del río y predecir para los años 2020, 2030 y 2040, tiempo correspondiente a un período de diseño de una obra para riego, por tal motivo los datos de población para el cálculo de caudales debe ser proyectado en base a los datos existentes para el 2010, considerando las tasas de crecimiento dadas por el INEC para cada parroquia.

Con el fin de modelar el escenario más real, se utilizó la tasa de crecimiento poblacional de cada una de las parroquias en cada subcuenca y se proyectó para los años antes mencionados siguiendo la Ecuación (16).

$$P_{futura} = P_{base} * (1 + r)^n \quad (16)$$

Las tasas de crecimiento poblacional utilizadas en el presente proyecto son las mostradas en la Tabla 8.

**Tabla 8.**  
**Tasas de crecimiento poblacional por subcuencas**

Subcuenca	Tasa de crecimiento (%)
R. Blanco	1.98
R. Yanayacu	1.48
R. Alambi-Cariyacu	0.65
R. Tahuando	2.02
R. Jatunyacu	1.98
R. Pichaví	1.73
Q. Ilumán	1.92
Q. Oscura	1.92
Q. Yanayacu	2.14
Q. Jijón	1.98
Q. Artezón	1.83
Q. Colimbuela	0.65
Q. Timbibiche	2.14
Q. Coñaquí	1.62
Q. La Virgen	1.82

Con la población futura obtenida, se utilizó la Ecuación (15) para el cálculo de los caudales proyectados.

#### **3.4.1.5. Concentraciones de parámetros de calidad**

Las concentraciones de los parámetros de calidad indicados que fueron modelados en el software HEC-RAS, se los determinó a partir de conocer las cargas aportantes por la población y/o los suelos en cada una de las subcuencas.

En el caso de los parámetros orgánicos (coliformes, DBO, OD), las concentraciones se deben únicamente a las cargas que aportan las personas por medio de los caudales sanitarios y que se miden en unidades de gramos por habitante

y por día. Por otra parte, los parámetros inorgánicos modelados se deben también a su contenido existente en el suelo y al uso de fertilizantes y otros productos químicos para actividades agrícolas. En la Tabla 9 se muestran las cargas aportantes por la población según cada uno de los parámetros modelados (IEOS, 1992).

**Tabla 9.**  
**Cargas aportantes por la población**

Parámetro	Unidad	Carga
DBO <sub>5</sub>	gr/(hab.día)	50
Nitratos (NO <sub>3</sub> )	gr/(hab.día)	5
Coliformes Fecales	N/(hab.día)	2.0E+10
Fosfatos (PO <sub>4</sub> )	gr/(hab.día)	2

**Fuente:** IEOS y FITCHNER HIDROESTUDIOS

Para el caso de la DQO, no existe bibliografía que indique una cantidad de carga contaminante de este parámetro, sin embargo se conoce que su comportamiento es similar a la de la DBO pero aumentando una proporción, la cual se obtuvo de las observaciones en laboratorio.

Con los caudales y la población proyectada desde el año 2016 al 2040, se calculó las concentraciones para cada parámetro según la Ecuación (17).

$$\text{Concentración} = \frac{\text{Carga} * \text{Población}}{Q} \quad (17)$$

La concentración debe estar expresada en *mg/l*, por lo que hay que considerar las unidades de cada componente de la ecuación y llevarla a la unidad requerida por el programa.

En las cargas se consideró un 5% de aumento en la concentración final de cada parámetro para todos los años, esto con el fin de representar también el crecimiento industrial en la zona, aspecto importante a considerar ya que el sector industrial aporta una mayor carga contaminante que el sector doméstico.

En el estudio realizado por FITCHNER HIDROESTUDIOS (2014), para la ciudad de Quito, se consideró el 15% de aumento en la concentración, por industrialización. Este dato fue tomado de base para la consideración del 5% en el

presente modelo de calidad, sabiendo que la zona de estudio presenta un nivel de industrias mucho menor que la ciudad de Quito.

### 3.4.2. Modelación Hidrológica

La modelación hidrológica se la realizó mediante el software HEC-HMS desarrollado por el U.S. Army Corps of Engineers, de los Estados Unidos, la información de entrada requerida en el modelo se puede clasificar en cinco grupos que dependen directamente de los métodos de cálculo que se manejen en el programa (Alvear, C., Carpio, J., Silva, M., 2006).

Para la selección de la metodología utilizada en este proyecto, se tuvo en cuenta la información disponible según los datos requeridos para cada metodología. El grupo de información, método escogido y la información requerida se encuentran detalladas en la Tabla 10.

**Tabla 10.**  
**Grupo de información, método escogido e información requerida.**

<b>Grupo</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Método</b>	<b>Información requerida</b>
<b>Morfometría de las subcuencas</b>	Parámetros físicos y morfológicos de las subcuencas.	ArcGIS 9.2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Área de las subcuencas</li> <li>• Longitud y pendiente del cauce principal (para el cálculo del TC y Tlag)</li> </ul>
<b>Precipitación histórica o de diseño</b>	Hietogramas de diseño	Datos de estaciones, ponderados por el usuario	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Registros de tormentas (Hietogramas de diseño).</li> <li>• Ponderación espacial y temporal de los datos de las estaciones para cada subcuenca (polígonos de Thiessen).</li> </ul>
<b>Condiciones de humedad del suelo</b>	Perdidas de infiltración	SCS (número de curva )	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pérdidas iniciales (mm).</li> <li>• Número de curva, calculado como promedio sobre la subcuenca respectiva.</li> </ul>

Grupo	Parámetro	Método	Información requerida
			<ul style="list-style-type: none"> <li>Porcentaje de área impermeabilidad.</li> </ul>
<b>Transformación de lluvia en escorrentía</b>	Transformación de lluvia en escorrentía	Hidrograma unitario sintético del SCS	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tiempo de retardo Tlag (minutos).</li> </ul>
<b>Hidráulica de los métodos de tránsito</b>	Tránsito de caudales	Tiempo de retardo	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tiempo de retardo Tlag (minutos).</li> </ul>

### 3.4.2.1. Información morfométrica

El modelo físico de la cuenca corresponde a la representación de la misma con todos los elementos que la conforman, en la Tabla 11 se detallan los elementos que se consideraron en el modelo físico de la cuenca, y la herramienta usada para su representación en el programa HEC-HMS.

**Tabla 11.**  
**Elementos hidrológicos usados en el modelo HEC-HMS**

Elemento	Elemento considerado	Herramienta en HEC-HMS	Descripción
Subcuenca	15	Subbasin 	Se usa para representar la cuenca física, Dada la precipitación, la salida de agua de la subcuenca se calcula restando las pérdidas a la precipitación y transformando el exceso de la precipitación en el caudal de salida de la subcuenca
Nudo	15	Junction 	Los nudos son los puntos en donde se unen, o descargan la subcuenca en el cauce principal, el elemento se usa para sumar los flujos de agua de los elementos hidrológicos aguas arriba del nudo.

Elemento	Elemento considerado	Herramienta en HEC-HMS	Descripción
Tramo	14	Reach 	Se usa para transportar el agua generada desde un nudo de la cuenca hacia otro nudo de la cuenca aguas abajo, Los hidrogramas resultantes a la salida de las subcuencas se propagan a través de estos cauces o tramos

Para el trazado de las subcuencas del sistema hidrográfico del río Ambi se utilizó el programa ArcGIS 9.2, con el cual se generó el modelo digital del terreno y a partir del mismo se trazaron las subcuencas y se calcularon sus respectivas áreas. Se midió además la longitud del cauce más largo correspondiente a cada subcuenca y se determinaron las pendientes y diferencia de niveles de los mismos trazando los perfiles de cada cauce. Estos datos fueron necesarios para el cálculo del tiempo de concentración de la cuenca, los mismos que debido a su variación fueron calculados mediante tres fórmulas y se determinó un tiempo de concentración promedio, el autor y la fórmula utilizada para dicho cálculo se presenta en la Tabla 12.

**Tabla 12. Ecuaciones para el cálculo del Tiempo de concentración**

Autor	Fórmula Utilizada	Descripción
California	$T_c = 58 * \left( \frac{Lr^3}{H} \right)^{0.385}$	Tc Tiempo de concentración (min) Lr Longitud del río (km) H Diferencia de cotas (m)
Kirpich	$T_c = 0.0195 * \left( \frac{Lr^3}{\frac{2}{3}H} \right)^{0.385}$	Tc Tiempo de concentración (min) Lr Longitud del río (m) H Diferencia de cotas (m)
Ven Te Chow	$T_c = 0.483 \left( \frac{Lr}{\sqrt{Y_r}} \right)^{0.64}$	Tc Tiempo de concentración (min) Lr Longitud del río (m) Yr Pendiente bruta del cauce (%)

### 3.4.2.2. Información acerca de la precipitación histórica o de diseño

Por la información disponible, se escogió el método de datos de las estaciones ponderados por el usuario, para dicho método se requiere los hidrogramas de precipitación de las estaciones en la zona del proyecto que son la M001, M105, M107, M315 y M009.

Para determinar los hietogramas de diseño se utilizó el método de la curva Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF). A partir de la intensidad en mm calculada según el periodo de retorno seleccionado, se calculó la precipitación alterada por medio del método de bloques alternos (Chow, V., Maidment, D., Mays, L., 1994).

Para el cálculo de las curvas IDF se utilizó dos metodologías, la primera a partir de las ecuaciones proporcionadas por el INAMHI determinadas con las precipitaciones máximas en 24 horas. A partir de estas ecuaciones y con las intensidades máximas en 24 horas para períodos de retorno mayores a dos años se obtuvieron las curvas IDF (INAMHI , 2015).

El INAMHI no cuenta con las ecuaciones IDF de todas las estaciones meteorológicas por lo que para las estaciones M001, M009 Y M315 se las elaboró a partir de los datos de las precipitaciones máximas en 24 horas. Con dichos datos se obtuvieron las precipitaciones e intensidades diarias máximas probables según el período de retorno utilizando la distribución de probabilidades pluviométricas de Gumbel. A partir de estos datos se calculó las regresiones intensidad –duración – tiempo y la constante de regresión de la cuenca obteniendo los coeficientes K, m, n para la determinación de la ecuación IDF (Ecuación 18), metodología propuesta por Bernard en 1932 (Cereceda, 2008).

$$I = \frac{K * T^m}{t^n} \quad (18)$$

Donde:

I = Intensidad en (mm/h)

t = Duración de la lluvia en minutos

T = Periodo de retorno (años)

K,m,n = Parámetros de ajuste

Para la determinación de la ponderación espacial de cada estación se trazaron los polígonos de Thiessen y se calcularon las áreas de aporte de cada pluviógrafo para cada subcuenca (Nania, 2007).

### 3.4.2.3. Condiciones de humedad del suelo

Este grupo de información está relacionado con las pérdidas por infiltración, el método seleccionado para el cálculo de las mismas fue el método de Soil Conservation Service (SCS), el método relaciona la escorrentía superficial (R) con la precipitación total (P) y con la capacidad de almacenamiento ( $S_{max}$ ) mediante la Ecuación (19). La capacidad de almacenamiento se calcula en función de un número adimensional de curva CN tal como se muestra en la Ecuación (20).

$$R = \frac{(P - 0.2S_{max})^2}{(P + 0.8S_{max})}, \quad \text{para } P > 0.2 S_{max} \quad (19)$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \text{ en mm} \quad (20)$$

Para el cálculo del número de curva se clasificó al suelo de las subcuencas según los grupos que propone el método SCS de acuerdo a la Tabla 13 según la taxonomía y características del suelo en la zona del proyecto.

**Tabla 13.**  
**Tipos de suelo y características**

<b>Tipo de suelo</b>	<b>Características</b>
<b>A</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Litología de gravas, y arenas</li> <li>• Porcentaje de arcilla (0-10%)</li> <li>• Alta permeabilidad</li> <li>• Bajo potencial de escorrentía</li> <li>• Alta Infiltración</li> <li>• Mucha Humedad</li> </ul>
<b>B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Litología de arenas calcáreas con limos (margas)</li> <li>• Granulometría entre gruesa y fina</li> <li>• Porcentaje de arcilla (10-30%)</li> <li>• Moderada permeabilidad</li> <li>• Moderadamente Bajo potencial de escorrentía</li> <li>• Tasa de Infiltración Moderada</li> <li>• Moderada Humedad</li> </ul>

<b>Tipo de suelo</b>	<b>Características</b>
<b>C</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Litología de limo con arcillas y calizas con limos</li> <li>• Granulometría fina a muy fina</li> <li>• Porcentaje de arcilla (30-70%)</li> <li>• Permeabilidad lenta</li> <li>• Moderadamente alto potencial de escorrentía</li> <li>• Infiltración lenta (cuando muy húmedos)</li> <li>• No existe movimiento hídrico vertical</li> </ul>
<b>D</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Litología de arcillas, calizas (cangahua)</li> <li>• Porcentaje de arcilla (70-100%)</li> <li>• Material casi impermeable</li> <li>• Alto potencial de escorrentía</li> <li>• Infiltración muy lenta</li> <li>• Nivel freático alto permanente</li> </ul>

Fuente: (Alvear, C., Carpio, J., Silva, M., 2006)

Una vez determinado al tipo de suelo se clasificó al uso del mismo a través del shape existente de usos del suelo de la sierra a escala 1:50000 obtenido del Sistema Nacional de Información Geográfica 2014, para una mayor simplificación a los usos del suelo se les reagrupó en cuatro grandes grupos según la Tabla 14.

**Tabla 14.**  
**Reclasificación usos del suelo**

<b>Clasificación original</b>	<b>Reclasificación</b>	
<b>Descripción</b>	<b>Número</b>	<b>Descripción</b>
Agua a cielo abierto Humedales leñosos Humedales herbáceos	1	Agua
Poblados en espacio abierto Poblados de baja intensidad Poblados de media intensidad Poblados de alta densidad	2	Poblados
Bosques secos Bosques verdes Bosques mixtos	3	Bosque
Tierra infértil Arbustos, matorrales Pastizales Pasto Cultivo	4	Agricultura

Con esta reclasificación se utilizó la extensión del programa en ArcGIS, HEC-GEO-HMS, en donde una de sus opciones es la creación del número de curva. La información que se requirió fue el ráster del modelo digital del terreno y el shape del uso del suelo con información del grupo del suelo según la clasificación SCS y la reagrupación en los cuatro grupos existentes, además del valor del número de curva que depende del tipo y uso de suelo de acuerdo a la Tabla 15.

**Tabla 15.**  
**Valores del número de curva CN**

Grupo	Descripción	Tipo de suelo			
		A	B	C	D
1	Agua	100	100	100	100
2	Poblados	57	72	81	86
3	Bosque	30	58	71	78
4	Agricultura	67	77	85	89

La pérdida inicial se calculó mediante la Ecuación (21), la misma que depende de la capacidad de almacenamiento de la subcuenca.

$$Ia = 0.2S \quad (21)$$

#### **3.4.2.4. Información hidrológica del proceso de transformación de lluvia en escorrentía**

Para este proceso el método seleccionado fue el hidrograma unitario sintético del SCS, este método fue desarrollado a partir del estudio de gran cantidad de hidrogramas, registrados en una gran variedad de cuencas de donde se obtuvieron hidrogramas adimensionales, dividiendo la escala de caudales entre el caudal pico ( $Q_p$ ) y la escala del tiempo entre el tiempo al que se presenta el pico ( $t_p$ ), al obtener los datos del caudal y tiempo pico del hidrograma se obtienen las ordenadas del hidrograma multiplicando dichos valores por las coordenadas del hidrograma adimensional

Para este método el único parámetro necesario fue el tiempo del retardo. Para el cálculo del mismo se aplicó la fórmula empírica propuesta en el manual de HEC – HMS, Ecuación (22).

$$T Lag = Tc * 0.35 \quad (22)$$

Donde:

TLag = Tiempo de retardo (min)

Tc = Tiempo de concentración (min)

#### 3.4.2.5. Hidráulica de los métodos de tránsito

Para esta modelación se escogió el método de tiempo de retardo, este es el modelo de tránsito más simple del HEC-HMS en el cual el hidrograma del flujo de salida es el hidrograma de entrada, pero con todas las ordenadas trasladadas por una duración especificada.

Las ordenadas del flujo de salida son calculadas mediante la Ecuación (23).

$$O_t = \begin{cases} I_t & t < TLag \\ I_{t-TLag} & t \geq TLag \end{cases} \quad (23)$$

Donde:

O<sub>t</sub> = ordenada del hidrograma del flujo de salida en el tiempo t

I<sub>t</sub> = ordenada del hidrograma del flujo de entrada en el tiempo t

TLag = tiempo por el cual las ordenadas son retardadas.

El tiempo de retardo para cada tramo de tránsito de caudal fue calculado mediante la Ecuación (22).

#### 3.4.3. Comparación de los caudales máximos calculados.

Para comprobar los resultados obtenidos de la modelación hidrológica mediante el software HEC-HMS se utilizó la metodología desarrollada por *Sandoval y Aguilera* (2014) para la determinación de caudales máximos en cuencas con poca información,

dicho método depende del área de la cuenca la precipitación media y el período de retorno. Este método considera que el área de la cuenca es un factor predominante para el cálculo del caudal máximo, por lo que de acuerdo a la extensión de la cuenca se propone distintas ecuaciones de cálculo. La cuenca del río Ambi tiene una extensión mayor a 45 km<sup>2</sup> por lo que para el cálculo del caudal máximo se utilizó la Ecuación (24).

$$Q_{max} = a \frac{\overline{P}\sqrt{A}}{(1 + \lg A)} (0.5 \ln T - 0.7) \quad (24)$$

El coeficiente “a” es variable entre 0,01 y 0,1 el cual tiene una relación variable con la precipitación media, con el fin de obtener una mejor correlación, se ha dividido a la función para determinar dicho coeficiente en dos partes: la primera corresponde a cuencas con precipitación entre 500 y 2500 y una segunda parte, para zonas con precipitaciones entre 2500 y 4000 mm, que se la puede ampliar a 5000 mm tal como se muestra en la Tabla 16 (Sandoval, W., Aguilera, E., 2014).

**Tabla 16.**  
**Valores del coeficiente (a) método Sandoval Aguilera (2014)**

PRECIPITACIÓN (mm)	500 a 2500	> 2500 a 4000
Fórmula para el coeficiente a	a=0,644-0,08*ln(P)	a=0,1256*ln(P)-0,965

Fuente: (Sandoval, W., Aguilera, E., 2014)

### 3.5. Análisis multitemporal

El análisis multitemporal fue realizado a partir de los datos en común en las cuatro temporadas de muestreo. Por la poca cantidad de datos en el tiempo no fue posible realizar un análisis matemático o una predicción a futuro, por lo que el análisis fue elaborado mediante gráficos en Excel para observar la tendencia, comportamiento de las variables en estudio y su relación con la precipitación, en la época de muestreo del 2014 al 2016.

### 3.6. Análisis de Componentes Principales

El análisis de componentes fue realizado utilizando el programa Minitab 17 que es un software estadístico libre que permite determinar la correlación que existe entre dos o más variables. Proporciona valores propios de cada componente principal, también la proporción de varianza explicada y la varianza explicada acumulada, la misma que establece el menor número de variables que abarcan la mayoría del fenómeno en estudio. El programa da un puntaje a cada variable y determina la o las variables que tienen más peso por sobre las otras (Carmona, 2014).

Como variables del programa se ingresaron los 8 iones (aniones y cationes) que fueron objeto del presente estudio en todos los puntos muestreados, tanto para época seca como para época de lluvias.

### 3.7. Análisis geoestadístico

El análisis geoestadístico fue realizado para los cuatro muestreos del 2014 al 2016 realizados en la investigación de Tamayo (2016) y en el presente proyecto. Las variables analizadas se determinaron de acuerdo al análisis de componentes principales en donde por los iones más representativos y considerando el uso potencial del río Ambi para uso agrícola se agrupó a dichos iones de mayor concentración en tres parámetros fundamentales que son indicadores de la calidad del agua para uso agrícola tales como el  $RAS^{\circ}$ , la salinidad potencial y la salinidad efectiva.

El análisis geoestadístico consta de tres etapas: el análisis exploratorio de datos, el análisis estructural y la predicción, el programa ArcGIS 9.2 del laboratorio de Geomática de la ESPE cuenta con una extensión para realizar dicho análisis.

El análisis exploratorio de datos se lo realizó mediante la herramienta *Explore Data* del programa ArcGIS en donde se realizaron histogramas gráficos de cuantiles (Q-Q plot) y el análisis de tendencia tridimensional con el fin de analizar la distribución, simetría, tendencia y demás características de los datos. Dentro del

análisis exploratorio fue necesario la determinación de datos atípicos en las variables estudiadas el mismo que se lo realizó mediante un diagrama de caja utilizando el software libre Minitab 17.

El análisis exploratorio y la predicción se lo realizó en el programa ArcGIS mediante el método Kriging ordinario el cual a partir de semivariogramas teóricos puede realizar una predicción de los puntos no muestreados a partir de los datos muestreados, el cálculo de la precisión y el error del método lo realiza mediante validación cruzada (ArcGIS, 2010).

Debido a la cantidad de datos de muestreo con los que se contaba, se realizó una comparación de los modelos geoestadístico con modelos determinísticos que requieren una menor cantidad de datos disponibles para su interpolación.

El método determinístico utilizado fue el IDW el mismo que se lo realizó utilizando el software ArcGIS 9.2.

## CAPITULO 4

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. Relleno y Validación de Datos meteorológicos

Para la elaboración de los hietogramas de precipitación a partir de las curvas IDF fue necesario la obtención de las precipitaciones máximas en 24 horas de las estaciones meteorológicas ubicados en la zona del proyecto, al estar incompletos los datos proporcionados por el INAMHI se realizó el relleno de las estaciones M001, M009 y M315 con la estación M105 como referencia , el método estadístico seleccionado fue el de regresión lineal simple el mismo que permite construir modelos para representar la relación entre la variable independiente (X) que representa la variable que proporciona datos para el cálculo, y la variable dependiente (Y) que expresa los datos faltantes y se cuantifica la relación mediante el coeficiente de correlación R, el cual debe tener una correlación positiva de intensa a perfecta es decir mayor a 0.8 . (Lind, D.A, Marchal, W.G, Mason, R.D., 2004).

Para la comprobación y validación de la homogeneidad de los datos se usó la prueba de doble masa. Este método relaciona la precipitación acumulativa mensual entre la estación de relleno y la estación auxiliar (Monsalve, G., 2009).

En el caso de las estaciones de la cuenca del río Ambi en la prueba de doble masa se obtuvo una tendencia lineal con un coeficiente de correlación muy cercano a uno, por lo que el relleno de datos fue homogéneo.

Los datos de las estaciones meteorológicas rellenos y validados se encuentran detallados en el Anexo 3.

## 4.2. Concentraciones en el río Ambi

### 4.2.1. Concentraciones inorgánicas

La composición química de las aguas superficiales dependen principalmente de las rocas regionales presentes en el área involucrada, tipos de suelos, forma y extensión de la cuenca, además de las condiciones climáticas reinantes, fauna y flora local y de las actividades humanas desarrolladas en la zona (Daziano, C., 2011).

Las sustancias en disolución equivalentes a la salinidad son un factor determinante en la composición del agua y están determinadas por la concentraciones de cationes predominantes como el  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ , y  $\text{K}^+$ , y aniones como  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , y  $\text{Cl}^-$ , la concentración de estos iones constituye el 99% del total de la salinidad y su proporción aporta información sobre el origen y tipología de los materiales de la zona (Roldán, G., Ramírez, J., 2008).

La aceptabilidad de la composición de un agua cualquiera depende de sus usos, desde el punto de vista agrícola la calidad de agua se define por parámetros físico - químicos como el pH, la salinidad, la sodicidad y la toxicidad definida principalmente por la cantidad de sodio, cloruros y boros en las aguas (Jiménez A. , 2002).

En la Tabla 17 y Tabla 18 se muestran los resultados obtenidos en laboratorio de los iones más representativos que definen la calidad y composición del agua, para el muestreo realizado en mayo 2016 época de lluvias y agosto 2016 época de sequía respectivamente.

**Tabla 17.**  
**Composición iónica de las aguas del río Ambi en época lluviosa (Mayo 2016)**

No.	Temp	pH	CE μS/cm	CE dS/m	Ca <sup>2+</sup> (meq/L)	Mg <sup>2+</sup> (meq/L)	Na <sup>+</sup> (meq/L)	K <sup>+</sup> (meq/L)	Σ Cationes meq/L	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> (meq/L)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (meq/L)	Cl <sup>-</sup> (meq/L)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (meq/L)	Σ Aniones meq/L	Σ Iones mg/l	STD (mg/l)	P- PO4 (mg/l)	N- NO <sub>3</sub> (mg/l)	B mg /L
1	20	8.52	687	0.69	0.98	0.50	4.67	0.29	6.45	0.61	3.73	1.36	0.89	6.59	481.49	575	3.00	3.14	0.81
2	22	8.3	1123	1.12	0.31	0.18	8.76	0.89	10.14	0.94	7.22	0.98	0.96	10.10	794.20	940	4.30	4.53	0.90
3	21	8.22	531	0.53	1.60	1.44	1.94	0.19	5.17	0.83	3.21	0.78	0.48	5.30	373.11	430	2.60	2.26	0.84
4	23	9.47	200.9	0.20	0.73	0.16	0.74	0.17	1.80	0.92	0.15	0.22	0.56	1.85	111.81	130	2.50	0.49	1.18
5	19	9.02	3440	3.44	4.00	2.72	27.65	1.99	36.36	4.56	2.53	28.85	0.89	36.83	2183.38	2250	3.60	6.61	1.13
6	23	7.78	751	0.75	1.54	1.78	3.66	0.26	7.24	0.00	5.16	1.86	0.00	7.02	527.46	620	1.70	1.19	0.83
7	19	7.96	543	0.54	1.42	1.39	1.87	0.21	4.89	0.00	4.13	0.48	0.35	4.97	382.63	420	2.40	2.16	0.84
8	20	7.68	444	0.44	1.19	0.94	1.67	0.21	4.00	0.00	3.35	0.33	0.33	4.02	313.88	375	2.70	1.30	0.73
9	17	7.84	406	0.41	1.20	0.75	1.49	0.24	3.68	0.00	2.86	0.70	0.19	3.75	285.10	335	3.40	0.66	0.77
10	16	7.67	319	0.32	0.57	0.55	1.58	0.18	2.87	0.00	2.34	0.55	0.02	2.90	224.13	252	3.70	0.83	1.31
MIN	16	7.67	200.90	0.20	0.31	0.16	0.74	0.17	1.80	0.00	0.15	0.22	0.00	1.85	111.81	130.00	1.700	0.489	0.729
MAX	23.00	9.47	3440.00	3.44	4.00	2.72	27.65	1.99	36.36	4.56	7.22	28.85	0.96	36.83	2183.38	2250.00	4.300	6.610	1.575
PROM	19.64	8.25	844.49	0.84	1.35	1.04	5.40	0.46	8.26	0.79	3.47	3.61	0.47	8.33	567.72	632.70	2.890	2.317	0.935

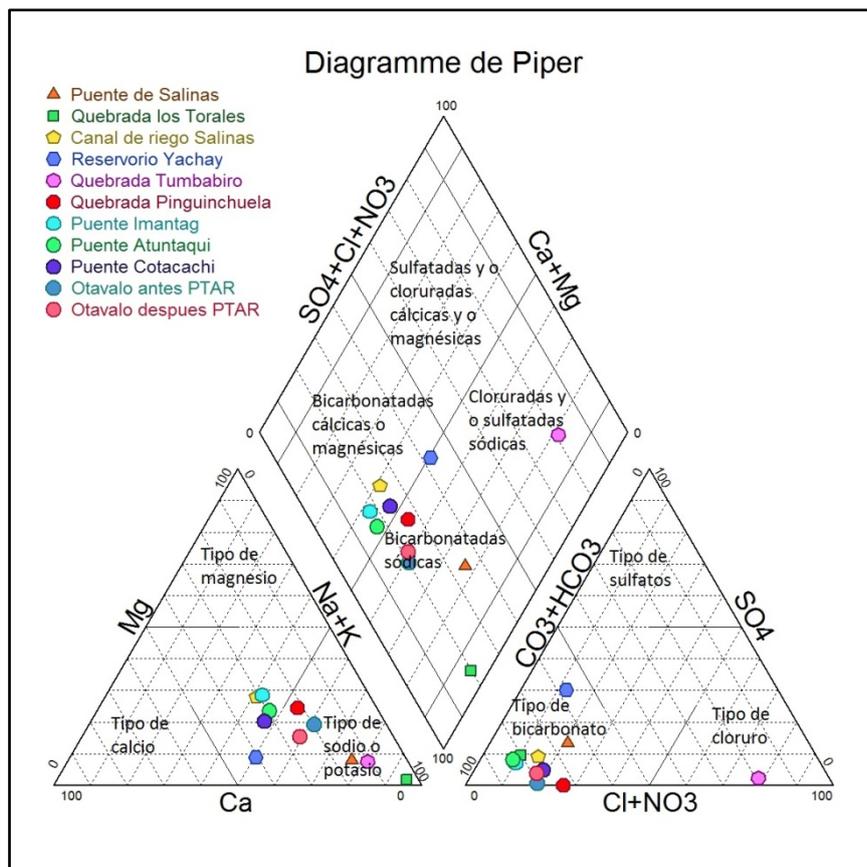
**Tabla 18.**  
**Composición iónica de las aguas del río Ambi en época Seca (Agosto 2016)**

No.	Temp	pH	CE μS/cm	CE dS/m	Ca <sup>2+</sup> (meq/l)	Mg <sup>2+</sup> (meq/l)	Na <sup>+</sup> (meq/l)	K <sup>+</sup> (meq/l)	Σ Cationes meq/l	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> (meq/l)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (meq/l)	Cl <sup>-</sup> (meq/l)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (meq/l)	Σ Aniones meq/l	Σ Iones mg/l	STD (mg/l)	P- PO4 (mg/l)	N- NO <sub>3</sub> (mg/l)	B mg/l
1	21	8.37	1484	1.48	1.42	3.84	7.98	0.27	13.51	2.47	7.61	2.11	1.21	13.40	940.13	951	4.30	7.40	0.31
2	21	7.95	1306	1.31	0.49	1.84	10.04	0.16	12.52	2.66	7.05	1.55	1.06	12.31	884.53	882	2.70	3.50	0.29
3	18	8.44	1228	1.23	2.42	4.81	4.38	0.11	11.73	2.90	6.22	1.82	0.55	11.49	769.16	790	1.30	2.20	0.43
4	17	8.69	477	0.48	1.49	1.66	1.42	0.03	4.60	1.37	2.37	0.54	0.50	4.78	312.51	334	4.80	1.60	0.41
5	16	8.77	5260	5.26	5.59	7.09	36.46	1.67	50.81	4.23	5.67	40.46	0.89	51.26	3051.91	3300	4.00	2.70	0.38
6	21	7.45	1109	1.11	2.06	3.04	4.67	0.21	9.98	0.00	6.17	3.87	0.02	10.06	708.45	715	1.30	0.20	0.33
7	21	7.73	1328	1.33	2.89	5.40	3.73	0.16	12.18	0.00	8.85	2.58	0.56	11.99	873.47	890	5.30	4.70	0.43
8	17	7.27	1046	1.05	1.59	3.38	4.73	0.13	9.83	0.00	7.39	1.60	0.48	9.47	717.36	725	5.70	3.50	0.40
9	16	7.88	1031	1.03	2.02	3.83	3.34	0.12	9.30	0.00	7.28	1.76	0.46	9.50	696.98	710	8.90	6.80	0.47
10	16	7.43	701	0.70	1.00	2.34	2.90	0.14	6.39	0.00	4.61	1.62	0.25	6.48	471.47	500	7.50	3.10	0.33
MIN	16.00	7.27	477	0.48	0.49	1.66	1.42	0.03	4.60	0.00	2.37	0.54	0.02	4.78	312.51	334.00	1.30	0.20	0.29
MAX	21.00	8.77	5260	5.26	5.59	7.09	36.46	1.67	50.81	4.23	8.85	40.46	1.21	51.26	3051.91	3300.00	8.90	7.40	0.47
PROM	18.45	8.00	1497	1.50	2.10	3.72	7.97	0.30	14.08	1.36	6.32	5.79	0.60	14.07	942.60	979.70	3.91	3.57	0.38

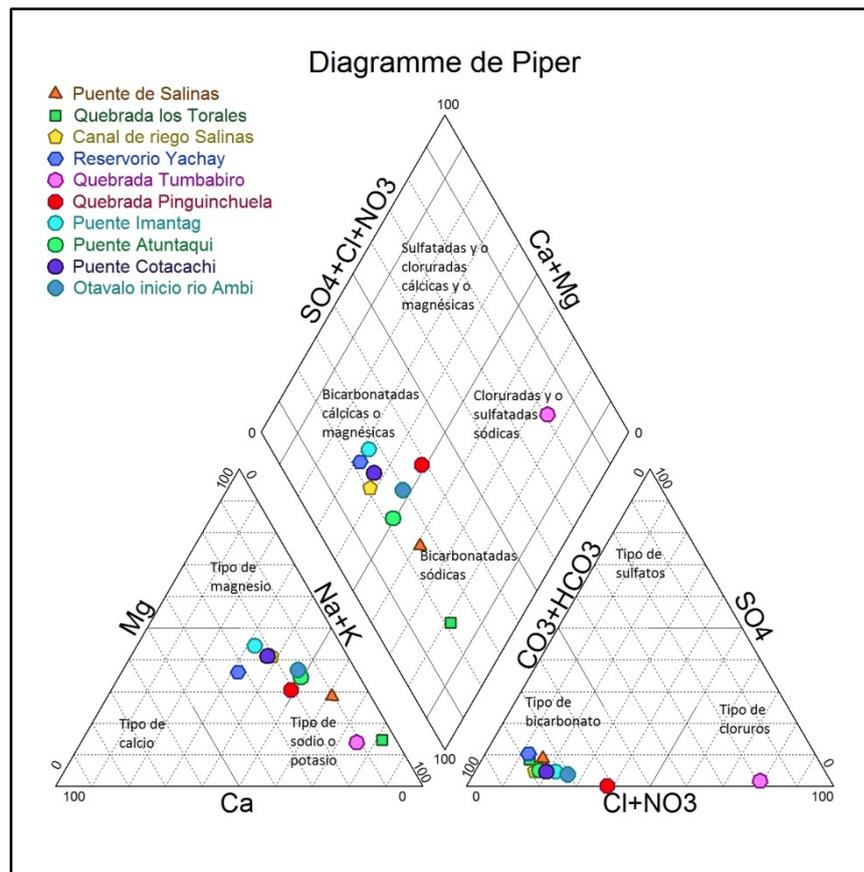
Es importante dentro del análisis de composición química de las aguas conocer la familia a la que pertenece el agua estudiada ya que de esta manera se puede inferir los efectos que pueden ocurrir en los suelos y cultivos al ser utilizada como agua para riego además de proporcionar información del origen de sus yacimientos (Carrera, D., 2011).

Uno de los métodos más comunes para este análisis es el diagrama trilineal de Piper, el mismo que está conformado por dos triángulos equiláteros, uno para los cationes y otro para los aniones, los datos de los diagramas triangulares se proyectan en el rombo central en el que se representa la composición del agua deducida a partir de aniones y cationes (Helsel & Hirsch, 2002).

En las Figuras 9 y 10 se presentan para las muestras analizadas los diagramas de Piper, tanto para el mes de mayo y agosto del 2016 respectivamente.



**Figura 9. Diagrama de Piper muestreo mayo 2016**



**Figura 10. Diagrama de Piper muestreo agosto 2016**

Como se observa en el diagrama de Piper, tanto para el muestreo realizado en mayo como en agosto las muestras del río Ambi pertenecen a las familias bicarbonatadas cálcicas-magnésicas y sódicas presentándose como anión predominante el bicarbonato y como cationes predominantes el sodio el calcio y el magnesio, a excepción de la muestra tomada en la quebrada de Tumbabiro que por su alto contenido de cloruros pertenece a la familia de cloruradas sódicas.

Las altas concentraciones de sodio, calcio y magnesio se debe probablemente a la geología del lugar, de acuerdo al mapa geológico de la República del Ecuador debido a las erupciones de los volcanes Imbabura y Cotacachi en el período Cuaternario se dió lugar a formaciones geológicas como: piroclastos primarios (tefra, flujos piroclásticos, ignimbritas) y retrabajados (cangahua); avalanchas de escombros, lahares, flujos de lava, los cuales fueron arrastrados desde las partes altas y depositados en la cuenca baja del río Ambi dando lugar a la presencia de rocas

ígneas sedimentarias y metamórficas que tienen alto contenido de estos iones (Carrera *et al.*, 2015).

Los bicarbonatos presentes en cuerpos naturales de agua dulce se originan generalmente del desgaste y disolución de rocas en la cuenca que contienen carbonatos (UPRM, 2016). En la cuenca del río Ambi la presencia del bicarbonato en las aguas se debe a que son aguas en contacto con rocas como las andesitas, feldespatos y calcitas.

Alto contenido de bicarbonatos en agua puede ser perjudicial, al combinarse con el calcio y el magnesio como es el caso del tipo de aguas del río Ambi, la precipitación del calcio y el magnesio en el suelo aumentan la cantidad de sodio incrementando así también el valor del RAS y la alcalinización y aumento de pH (Martínez L., 2009).

Las aguas de la quebrada Tumbabiro se encuentran en una zona con contacto volcánico, por lo que aumenta la presencia de cloruros y sulfatos en este tipo de aguas (Carrera, *et al.*, 2015). La quebrada Tumbabiro tiene un diferente comportamiento, estas aguas contienen una alta salinidad con una predominancia de los iones cloruros y sodio, por lo que tiene una diferente composición química y se encuentra en una diferente familia de aguas, la quebrada de Tumbabiro no forma parte de la cuenca del río Ambi pero por sus altas concentraciones fue importante su estudio.

#### **4.2.2. Concentraciones orgánicas**

Las aguas naturales, además de sustancias minerales y disueltas, pueden llevar en suspensión sustancias orgánicas provenientes del lavado de los suelos, del metabolismo de los organismos que viven en ellos o al recibir descargas de aguas residuales de origen doméstico o industrial las cuales provocan la contaminación del agua en niveles variables, la materia orgánica puede ser, en muchos casos, la responsable del color, el olor y el sabor del agua. Como es muy difícil determinar analíticamente la presencia de estas sustancias orgánicas en el agua, se han establecido métodos globales de determinación como son los parámetros de la

demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>) o la demanda química de oxígeno (DQO) (Barrenechea, 2004).

La demanda química de oxígeno, DQO, corresponde a la cantidad de oxígeno requerida para oxidar completamente por medios químicos los compuestos orgánicos a CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O, mientras que la demanda bioquímica de oxígeno, DBO, se define como la cantidad de oxígeno usado por los microorganismos no fotosintéticos a una temperatura de 20°C, para metabolizar los compuestos orgánicos degradables biológicamente (Cisterna, P., Peña, D., 2013).

En la Tabla 19 se encuentran detalladas las concentraciones encontradas en laboratorio de DBO<sub>5</sub> y DQO para época de lluvias muestreo mayo 2016 y época de sequía agosto 2016.

**Tabla 19.**  
**Concentraciones orgánicas (DBO<sub>5</sub> y DQO) del río Ambi**

No	DESCRIPCION	OD (mg/l)		DBO <sub>5</sub> (mg/l)		DQO (mg/l)		DBO <sub>5</sub> /DQO	
		mayo 2016	agosto 2016	mayo 2016	agosto 2016	mayo 2016	agosto 2016	mayo 2016	agosto 2016
1	Puente de salinas	6.14	5.27	22.18	34.16	41	61	0.54	0.56
2	Hacienda Yachay , Quebrada los Torales, puente hidrogeologico, ojo de agua	6.03	5.48	4.26	5.88	7	9	0.61	0.65
3	Yachay, Canal de riego Salinas	8.39	6.73	13.91	21	25	37	0.56	0.57
4	Yachay, Reservorio Yachay	11.42	7.29	9.46	14.94	13	24	0.73	0.62
5	Tumbabiro,quebrada Tumbabiro	7.71	6.90	11.88	17.1	19	28	0.63	0.61
6	Quebrada Pinginchuela	6.96	6.78	8.96	13.62	14	20	0.64	0.68
7	Rio Ambi, Puente Imantag Atuntaqui	6.75	6.14	14.67	21.9	28	43	0.52	0.51
8	Rio Ambi, Puente Atuntaqui Cotacachi	6.81	6.02	14.10	22.68	26	45	0.54	0.50
9	Cotacachi Rio Ambi, puente Cotacachi	7.09	5.98	15.87	22.32	36	49	0.44	0.46
10	Otavallo, inicio rio Ambi, antes de PTAR	7.17	6.22	14.64	19.5	29	39	0.50	0.50

Los valores de DBO<sub>5</sub> y DQO son mayores en el mes de agosto debido a que son los correspondientes a épocas de sequía donde por la disminución de caudal se da una menor dilución y por ende una mayor concentración, mientras que para el mes de mayo los valores determinados fueron menores debido al incremento de caudal en el

río y a la dilución de la concentración del caudal sanitario en el hidráulico (Rueda, 2010).

Los resultados obtenidos en todos los puntos de muestreo presentaron un mayor valor en la concentración de DQO que en la DBO<sub>5</sub>, esto se debe a que por medios químicos la oxidación de la materia orgánica es más completa, por lo que el valor de la DQO es mayor que el de la DBO<sub>5</sub> (Fernández, J., Curt, M.D., 2016).

La relación de valores de DBO<sub>5</sub> y DQO varía de acuerdo a los componentes asociados a la materia orgánica en degradación, esta relación es de gran importancia para determinar el tipo de contaminación de las aguas y la biodegradabilidad de la materia contaminante, para aguas domesticas la relación DBO<sub>5</sub>/DQO es 0.4 a 0.8 mientras que para aguas estabilizadas biológicamente la relación es menor a 0.12 (Romero Rojas, J., 1999)

Como se observa en los datos de laboratorio la relación DBO<sub>5</sub>/DQO varía en un rango de 0.5 a 0.73 con una relación promedio de 0.57 y 0.56, para el mes de mayo y agosto del 2016 respectivamente, estos valores se encuentra dentro del rango indicado en Romero Rojas (1999), por lo que se puede dar por aceptables los resultados obtenidos.

El grupo de coliformes es constante, abundante y casi exclusivo de la materia fecal, por lo que se utiliza como indicador de contaminación fecal en agua; conforme mayor sea el número de coliformes en agua, mayor será la probabilidad de estar frente a una contaminación reciente (Camacho, A., M.Giles, A.Ortegón, M.Palao, B.Serrano y O.Velázquez, 2009).

Del grupo de coliformes, los coliformes fecales son los más importantes dado que se relaciona más con la probabilidad de encontrar patógenos excretados (bacterias, parásitos y virus entéricos), por la capacidad de estos de crecer a mayor temperatura (Sandoval, A., Carlos, G., 1991).

El grupo de coliformes fecales, está constituido por bacterias Gram-negativas capaces de fermentar la lactosa con producción de gas a las 48 h. de incubación a

44.5 ± 0.1°C. Este grupo no incluye una especie determinada, sin embargo la más prominente es *Escherichia coli* (Camacho *et al.*, 2009).

El contenido de coliformes fecales en un río contaminado debe determinarse mediante el ensayo de tubos múltiples en unidades NMP/100ml. En el presente proyecto por la disposición de equipos de laboratorio, se los determinó mediante el método de filtración por membrana en unidades UFC/100ml. El análisis con este método se dificulta en muestras de agua con abundante carga bacteriana como es el caso del río Ambi, sin embargo el ensayo demostró el aumento o disminución de los coliformes a lo largo del río en las épocas de muestreo (Palma, R., Garnica, E., López, L., Ortiz, J., Peñaranda, S., Raad, J., 1999).

En la Tabla 20 se encuentra detallado los valores de coliformes fecales encontrados en laboratorio para el mes de mayo y agosto de 2016.

**Tabla 20.**  
**Coliformes fecales muestras río Ambi**

No	Descripción	UFC/100ml	
		may-16	ago-16
1	Puente de salinas	15600	20400
2	Hacienda Yachay , Quebrada los Torales, puente hidrogeologico, ojo de agua	250	1300
3	Yachay, Canal de riego Salinas	500	2000
4	Yachay, Reservorio Yachay	1800	4300
5	Tumbabiro, quebrada Tumbabiro	300	950
6	Quebrada Pinginchuela	200	1100
7	Rio Ambi, Puente Imantag Atuntaqui	2600	4900
8	Rio Ambi, Puente Atuntaqui Cotacachi	2200	4200
9	Cotacachi Rio Ambi, puente Cotacachi	2000	3900
10	Otavaló, inicio río Ambi, antes de PTAR	800	3500

Se aprecia claramente que el contenido de bacterias del grupo de los coliformes aumenta de manera significativa al disminuir el caudal en el río, es decir en el período de mayo a agosto. El número de colonias que se forma aumenta al punto de ser muchas veces incontable a simple vista. El número contado de UFC/100ml es aproximado debido a que las colonias presentaron diferentes tamaños pudiendo

contener cada una de ellas más de una unidad formadora de colonias, por lo tanto los valores de la tabla anterior son solo una referencia del comportamiento de los coliformes.

### 4.3. Comprobación de la exactitud de los resultados

Los resultados de las muestras de agua analizadas en el Laboratorio de Medio Ambiente de la Universidad de las Fuerzas Armadas se sometieron a una comprobación para verificar la exactitud de los mismos mediante los métodos establecidos en el libro *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, los cuales están recomendados por el Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria emitido por el Ministerio del Ambiente en el 2015 y los métodos expuestos en el libro *Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils*, escrito por Richards en 1954.

En dichos métodos se verificó la relación entre aniones y cationes, debido al equilibrio de cargas por la disolución de los electrolitos generando igual cantidad de cargas positivas y negativas (cationes y aniones), la suma de estos debe ser aproximadamente igual manteniendo una electro neutralidad en el sistema (Simes, 2011). Por medio de la Ecuación (25) se calcula el porcentaje de error el mismo que debe estar dentro de los rangos admisibles según la Tabla 21 propuesta por el *Standard Methods*.

$$\% \text{ error} = \frac{|\sum \text{ cationes} - \sum \text{ aniones}|}{|\sum \text{ cationes} + \sum \text{ aniones}|} * 100 \quad (25)$$

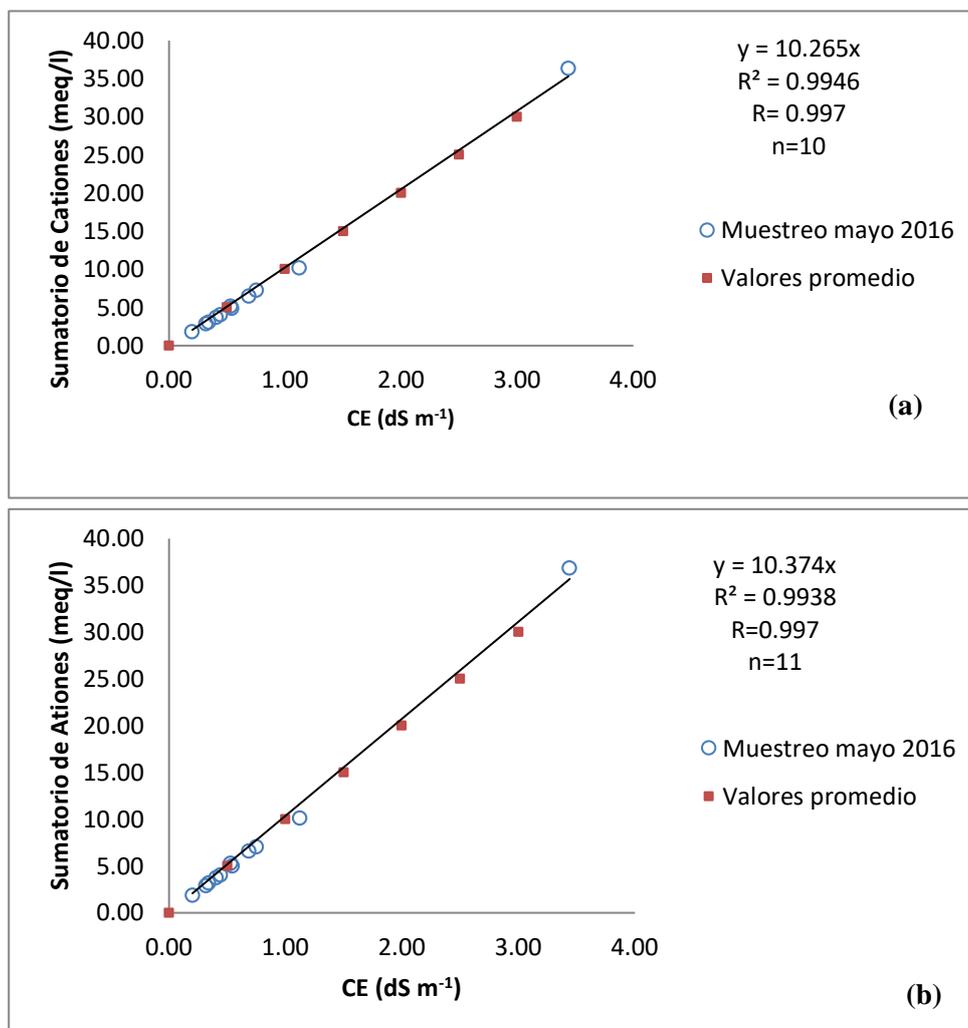
**Tabla 21.**  
**Porcentaje de error aceptable de la relación Cación-Anión.**

$\Sigma$ anion / cation meq/L	% error aceptable
0 – 3	0.2
3 – 10	2
10- 800	5

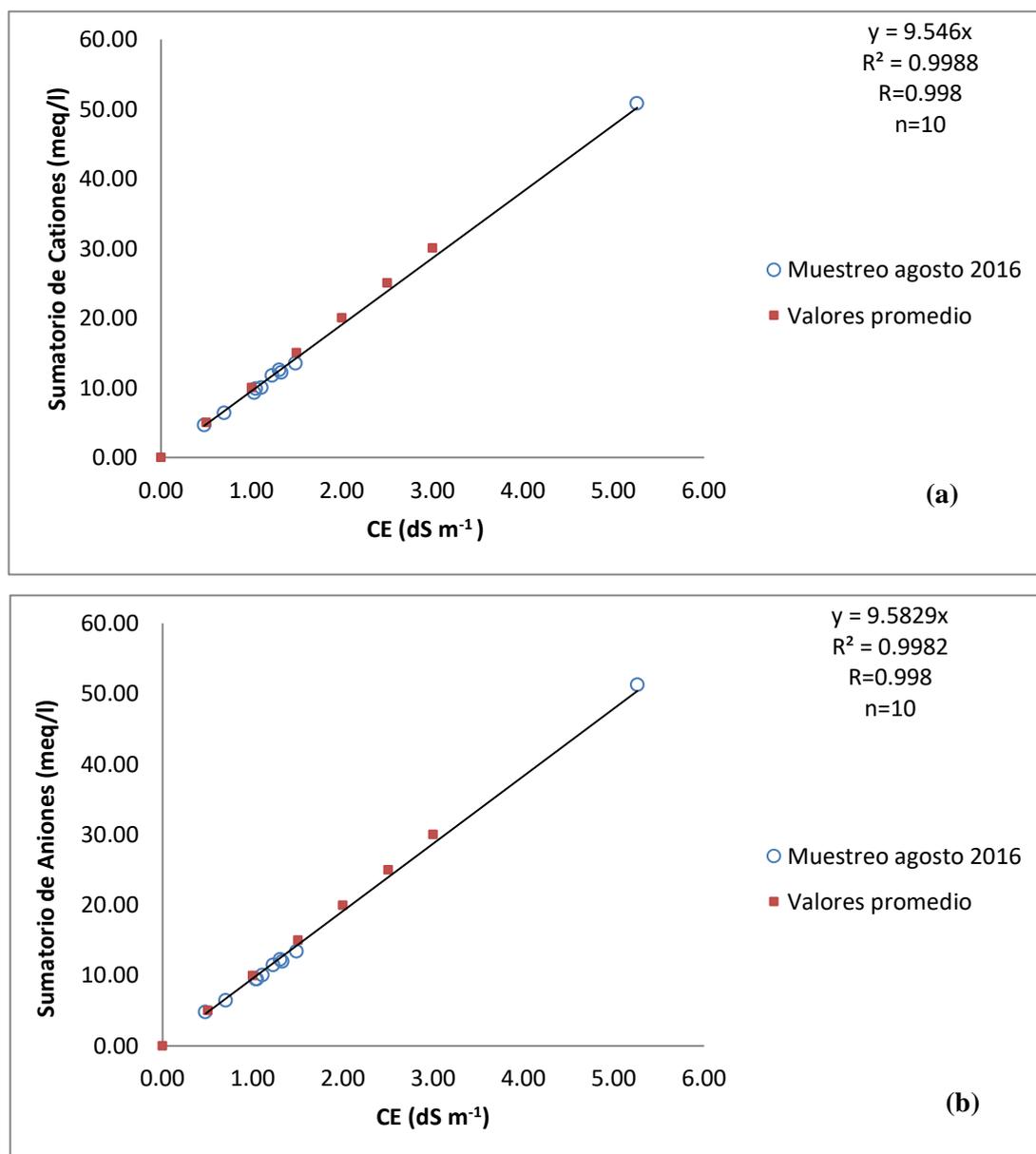
**Fuente:** Standard Methods, 1998

Para las muestras de agua analizadas en época de lluvias (Mayo 2016) y en épocas de estiaje (Agosto 2016) se tuvo un error promedio de 0.85 y 0.94 % respectivamente entrando dentro del rango de error aceptable propuesto por el Standard Methods.

En la metodología propuesta por Richards (1954) se presenta una relación lineal entre la CE y la suma de cationes o de aniones, la pendiente de esta relación depende de la tipología de aguas y debe estar en un rango del 8 al 11%, con un coeficiente de correlación cercano a uno. Se obtuvo como resultado de las muestras analizadas en época lluviosa una pendiente del 10.3 % con un coeficiente de correlación “r” de 0.997 mientras que para época seca se obtuvo una pendiente de 9.56 con un coeficiente de correlación de 0.998 (Figura 11 y 12).



**Figura 11. Muestreo mayo 2016 a) Relación funcional entre la CE y la concentración de cationes b) Relación funcional entre la CE y la concentración de aniones**



**Figura 12. Muestreo agosto 2016 a) Relación funcional entre la CE y la concentración de cationes b) Relación funcional entre la CE y la concentración de aniones**

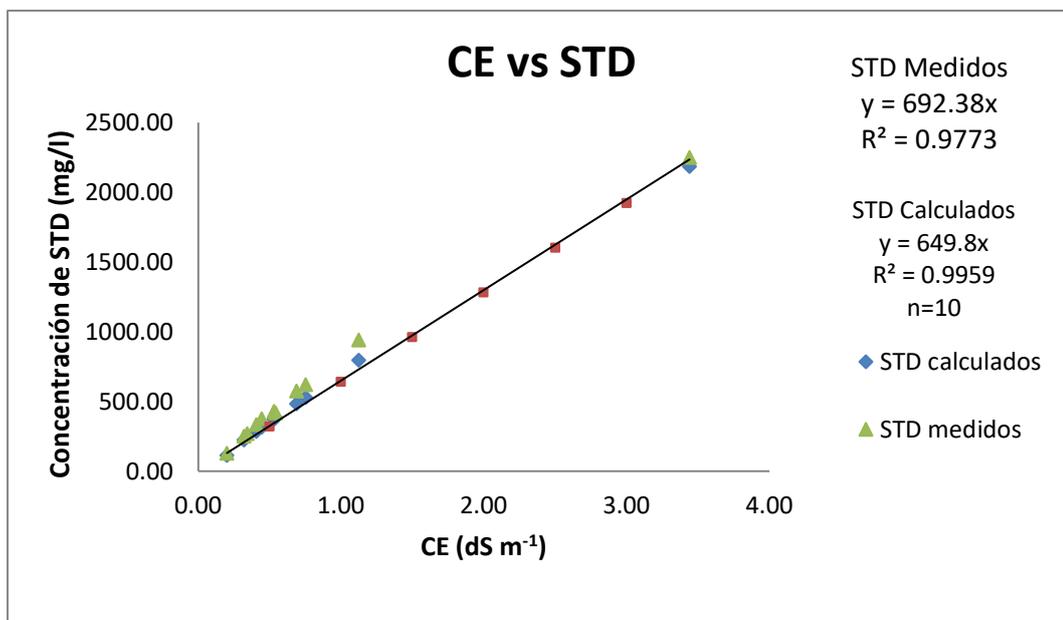
Se realizó también una comparación con los resultados obtenidos en los muestreo realizados en octubre de 2014 época intermedia de lluvias y en Mayo de 2015 época de lluvias en el proyecto de titulación “Calidad de agua y suelo en la cuenca del río Ambi, para uso agrícola en los campos experimentales de la ciudad del conocimiento Yachay mediante análisis físico-químico” de esta investigación, las muestras de agua en época intermedia de lluvias presentaron una pendiente de 9.8 con un coeficiente

de 0.997 y un error promedio de 1.18 % , mientras que las muestras de agua en época lluviosa presentaron una pendiente de 10.019 un coeficiente de 0.997 y un error promedio de 0.89% (Tamayo, 2016).

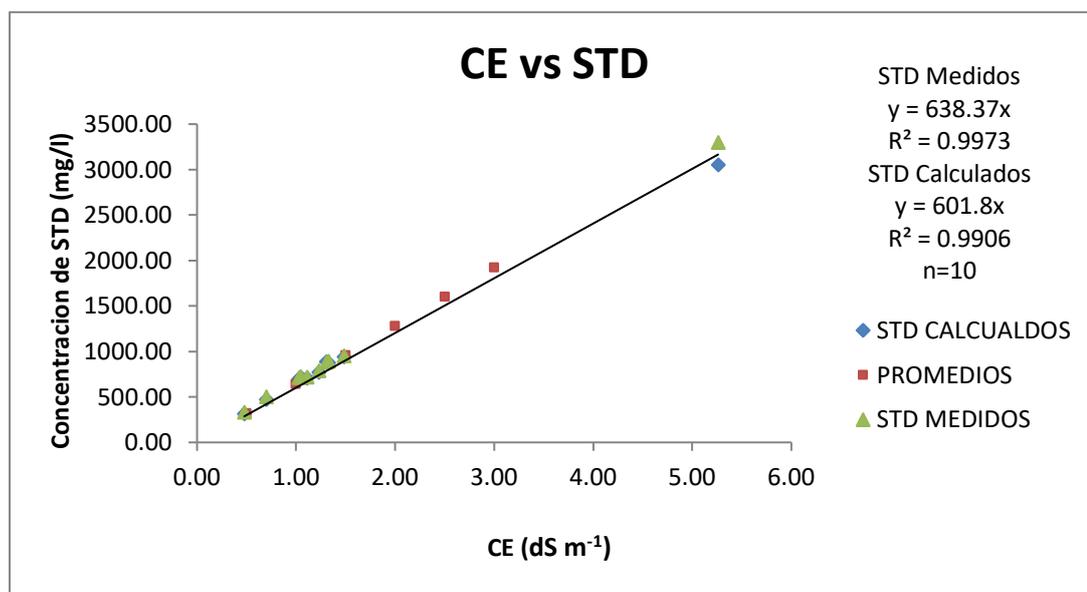
La conductividad eléctrica está directamente relacionada con la concentración de sales disueltas en el agua (STD), Richards *et al.* (1959) estableció que la relación funcional entre los STD y la CE están dados por la Ecuación (26) representando una recta ideal tomando como pendiente 640 la cual puede variar entre 550 y 750.

$$STD \text{ calculados} = 640 * CE \quad (26)$$

Para las muestras analizadas en mayo de 2016 se obtuvo para STD calculados una pendiente de 692.38 mientras que para los STD medidos una pendiente de 649.8, para el muestreo de agosto se obtuvo una pendiente de 638 y 601 respectivamente. En la Figura 13 y 14 se muestra la relación de CE y STD medidos y calculados para las muestras analizadas, los sólidos disueltos calculados son el resultado de la suma de los 8 iones considerados en mg/l.



**Figura 13. Relación entre la CE y la concentración de sólidos disueltos totales muestreo mayo 2016**



**Figura 14. : Relación entre la CE y la concentración de solidos disueltos totales muestreo agosto 2016.**

La segunda comprobación se la realizó en base a la concentración de Sólidos Totales Disueltos medidos y calculados, la cual debe estar en el rango recomendado por el Standard Methods según la Ecuación (27). La relación de SDT para el muestreo en época de lluvias mayo 2016 varió entre 1.03 y 1.19, mientras que para la época de sequía agosto 2016 vario entre 1.00 y 1.08

$$1.0 < \frac{SDT \text{ medidos}}{SDT \text{ calculados}} < 1.2 \quad (27)$$

La tercera comprobación se realizó entre la Conductividad Eléctrica medida y la calculada, el Standard Methods propone un rango recomendado para esta relación expresada en la Ecuación (28).

$$0.9 < \frac{CE \text{ calculada}}{CE \text{ medida}} < 1.1 \quad (28)$$

Para obtener la Conductividad Eléctrica calculada se necesitan los factores de conductividad de los iones más comunes presentados en el Standard Methods, (Tabla 22).

**Tabla 22.**  
**Factores de Conductividad para los iones comunes en las aguas**

Ion	Conductividad (25°C) µmhos/cm	
	meq/l	mg/l
Bicarbonatos	43,6	0,715
Calcio	52	2,6
Carbonatos	84,6	2,82
Cloruros	75,9	2,14
Magnesio	46,6	3,82
Nitratos	71	1,15
Potasio	72	1,84
Sodio	48,9	2,13
Sulfatos	73,9	1,54

**Fuente:** (APHA, 1999)

Para las muestras ensayadas se obtuvo la CE calculada a partir de los 8 iones más representativos cumpliéndose la relación con la CE medida propuesta por el Standard Methods, (Tabla 23).

Se realizó una cuarta comprobación indicada por el Standard Methods en el que la suma de aniones y cationes debe ser el 1 % de la CE medida debido a que esta representa la concentración de las sales disueltas en el agua, se sugiere un rango de aceptación de este parámetro descrito en la Ecuación (29), las muestras ensayadas tanto para el mes de mayo como agosto del 2016 cumplieron con esta relación, (Tabla 23)

$$100 \times \text{anion (o cation)} \text{ en } \frac{\text{meq}}{\text{L}} = (0.9 - 1.1) \text{ EC} \quad (29)$$

Finalmente se comprobó de acuerdo al Standard Methods la relación entre los STD calculados y la CE la misma que debe estar en la relación indicada en la Ecuación (30). Para las muestras analizadas se obtuvo para el mes de mayo una

relación entre 0.57 y 0.70 mientras que en el mes de agosto una relación entre 0.58 y 0.65. (Tabla 23)

$$\text{SDT} \frac{\text{calculados}}{\text{CE}} = 0.55-0.7 \quad (30)$$

**Tabla 23.**  
**Comprobación de exactitud de resultados mayo 2016 agosto 2016**

Comprobaciones de exactitud de resultados														
N.	Primera		Segunda		Tercera				Cuarta				Quinta	
	% error		STD med/STD calc		CE calculada/CE medida				100*Σcatión/CE		100*Σanión/CE		STD calculados / CE	
					CE Calculada		Relación							
	May-16	Ago-16	May-16	Ago-16	May-16	Ago-16	May-16	Ago-16	May-16	Ago-16	May-16	Ago-16	May-16	Ago-16
1	1.10	0.41	1.2	1.0	707	1453	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	0.9	0.70	0.63
2	0.19	0.84	1.2	1.0	1057	1341	0.9	1.0	0.9	1.0	0.9	0.9	0.70	0.68
3	1.25	1.03	1.2	1.0	564	1268	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.70	0.63
4	1.35	1.92	1.2	1.1	236	523	1.1	1.1	0.9	1.0	0.9	1.0	0.56	0.66
5	0.64	0.44	1.0	1.1	4582	6266	1.3	1.2	1.1	1.0	1.1	1.0	0.63	0.58
6	1.55	0.37	1.2	1.0	727	1057	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	0.70	0.64
7	0.82	0.78	1.1	1.0	488	1219	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.70	0.66
8	0.16	1.87	1.2	1.0	398	960	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.70	0.69
9	0.86	1.05	1.2	1.0	379	940	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.70	0.68
10	0.57	0.73	1.1	1.1	290	656	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.70	0.67

Como se observa en la Tabla 23, para la muestra cinco que corresponde a la quebrada de Tumbabiro no se cumple con la tercera comprobación ya que la relación entre la CE calculada y la CE medida es mayor a 1.1, esto se debe a que la quebrada de Tumbabiro no pertenece a la misma familia de las aguas muestreadas, como se analizó en el diagrama de Piper a diferencia de las demás muestras pertenece a la familia de aguas que tienen un alto contenido de cloruros.

#### 4.4. Modelación hidráulica y de calidad

##### 4.4.1. Coeficiente de rugosidad

El coeficiente de rugosidad es un factor que incide en la ecuación de Manning que es la fórmula utilizada en el software HEC-RAS para el cálculo de flujos uniformes por canales abiertos, dicho coeficiente es difícil de determinar ya que no existe un método exacto para la selección del mismo. El valor del coeficiente “n” es muy variable y depende de una cantidad de factores como la rugosidad de la superficie, vegetación, irregularidades del cauce, alineamiento del canal, depósitos y socavaciones, obstrucciones, tamaño y forma del canal, nivel y caudal, cambio estacional, material suspendido y transporte del fondo (Chow, Ven Te., 2004).

El río Ambi es un río de montaña, por las visitas de campo se pudo observar lechos pedregosos y bordes de tierra y maleza, por lo que basados en los valores recomendados por King, H.W (1954) y considerando los valores recomendados por el estudio “Conducción de agua por canales” realizado por la Facultad de Agronomía de la Universidad de la República se adoptó un valor de 0.035 como coeficiente de rugosidad.

Siguiendo la metodología de Cowan donde el coeficiente de rugosidad es calculado tomando en cuenta varios factores y combinando cada uno de ellos, se toman los valores propuestos por Ven Te Chow en su libro “Hidráulica de Canales”, los cuales se presentan en la Tabla 24. Dichos valores fueron escogidos de acuerdo a las condiciones del río Ambi. Los valores seleccionados se presentan en la Tabla 25. Con las rugosidades seleccionadas y aplicando la ecuación de Cowan se obtuvo un valor de 0.035 corroborando este valor con el coeficiente seleccionado anteriormente.

**Tabla 24.**  
**Coeficiente de rugosidad formula de Cowan**

Condiciones del Canal	Valores		
Material	Tierra	n0	0.02
	Roca		0.025
	Grava Fina		0.024
	Grava Gruesa		0.028

Condiciones del Canal	Valores		
Grado de irregularidad	Ligero	n1	0
	Menor		0.005
	Moderado		0.01
	Severo		0.02
Variaciones en la sección transversal del canal	Gradual	n2	0
	Ocasional		0.005
	Frecuente		0.010-0.015
Efecto relativo de obstáculos	Despreciable	n3	0
	Menor		0.010-0.015
	Apreciable		0.020-0.030
	Severo		0.04-0.006
Vegetación	Baja	n4	0.005-0.010
	Media		0.010-0.025
	Alta		0.025-0.05
	Muy Alta		0.05-0.1
Grado de sinuosidad	Menor	n5	1
	Apreciable		1.5
	Severo		1.3

**Tabla 25.**  
**Coefficiente de rugosidad Escogidos para el río Ambi**

Condiciones del Canal			Valores
Material	Tierra	n0	0.02
Grado de irregularidad	Menor	n1	0.005
Variaciones en la sección transversal del canal	Ocasional	n2	0.005
Efecto relativo de obstáculos	Despreciable	n3	0
Vegetación	Baja	n4	0.005-0.010
Grado de sinuosidad	Menor	n5	1

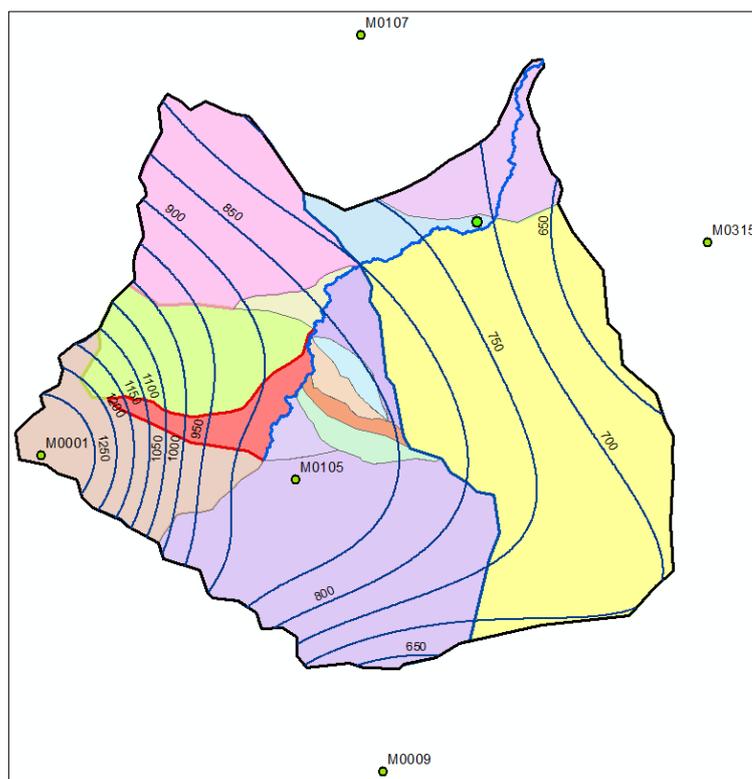
#### 4.4.2. Determinación de caudales hidráulicos

La modelación hidráulica y de calidad del río Ambi necesita de una adecuada información hidrológica, en el Ecuador se dispone únicamente de datos de precipitaciones y escasos datos de caudales registrados, por lo que se dificulta determinar la escorrentía y la producción hídrica de las cuencas. Para solucionar esta situación, en la práctica, se recurre a modelos empíricos y semi empíricos desarrollados en otros países. El inconveniente con estos modelos es que por sus

condiciones climáticas no son necesariamente aplicables al territorio ecuatoriano (Sandoval, W., Aguilera, E., 2014).

Por dichas razones, para el cálculo de caudales se adoptó la metodología desarrollada por Sandoval y Aguilera (2014) en donde se asume que la precipitación media es el principal parámetro a considerarse para evaluar la escorrentía de una cuenca y con esta realizar el cálculo de los caudales.

Dichas precipitaciones se calcularon con el método de las isoyetas determinadas a partir de las estaciones M001, M105, M107, M009 y M315. En la Figura 15 se presenta el mapa de isoyetas para la cuenca del río Ambi.



**Figura 15. Mapa de isoyetas Cuenca del río Ambi**

En la Tabla 26 se presenta de manera detallada el cálculo de la precipitación media de la cuenca del río Ambi, de la misma manera se procedió para el cálculo de las precipitaciones de la subcuenca del punto de control donde se encuentra ubicado

la estación hidrométrica y de las subcuencas que aportan caudal al cauce del río Ambi.

En la Tabla 27 se encuentra un resumen de los resultados de las precipitaciones medias obtenidas.

**Tabla 26.**  
**Precipitación media Cuenca del río Ambi, método Isoyetas**

Isoyeta	Isoyeta prom.	Área km <sup>2</sup>	Ponderador área	Precipitación ponderada
Límite-1250	1275	20.953	0.01854754	23.6481092
1250-1200	1225	16.062	0.01421804	17.4170955
1200-1150	1175	17.346	0.01535463	18.0416907
1150-1100	1125	17.82	0.01577421	17.7459905
1100-1050	1075	21.071	0.01865199	20.0508891
1050-1000	1025	27.046	0.02394104	24.5395691
1000-950	975	39.97	0.03538133	34.4967982
950-900	925	70.372	0.0622931	57.621114
900-850	875	197.8418	0.175129	153.237879
850-800	825	161.818	0.14324084	118.173691
800-750	775	169.072	0.14966206	115.988095
750-700	725	207.82	0.18396168	133.372217
700-650	675	133.459	0.11813753	79.7428334
650-Límite	625	29.041	0.02570701	16.0668821
Suma		1129.7	1	<b>830.142854</b>

**Tabla 27.**  
**Precipitaciones medias de las subcuena del rio Ambi**

Nombre Subcuena	Área (km <sup>2</sup> )	$\bar{P}(mm)$
Subcuena Pto control		903.03
Río Blanco	92.967	1132.21
Río Yanayacu	87.913	993.57
Río Alambi-Cariyacu	138.253	847.924
Río Tahuando	385.809	727.487
Río Jatunyacu	233.993	819.412
Río Pichavi	29.856	938.003
Quebrada Iluman	13.862	869.008
Quebrada Oscura	7.563	871.509
Quebrada Yanuyacu	8.271	873.936
Quebrada Jijón	10.398	875
Quebrada Artizón	8.586	875

Nombre Subcuenca	Área (km <sup>2</sup> )	$\bar{P}$ (mm)
Quebrada Colimbuela	10.376	862.63
Quebrada Timbibiche	22.728	832.403
Quebrada Coñaquí	25.762	763.959
Quebrada La Virgen	53.267	694.21

Al tener los caudales medios mensuales medidos de la estación H023 como lo indica la Tabla 28 y con la precipitación media calculada de la subcuenca correspondiente a dicho punto de control que fue de 902.98 mm, se calculó el coeficiente de escorrentía, el resultado de dichos cálculos se presentan resumidos en la Tabla 29.

**Tabla 28.**  
**Caudales medios mensuales estación H023**

NOMBRE ESTACION : AMBI DJ CARIYACU													CODIGO: H0023	
PERIODO: 1963 – 2000 /2014- 2015														
COORDENADAS														
LATITUD: 0G 22' 20.7" N					LONGITUD: 78G 12' 49.92"W					ELEVACION: 2015.00				
Caudales Medios Mensuales (m <sup>3</sup> /seg)														
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	MED	
MED	4.33	5.00	5.72	6.00	6.17	4.12	3.17	2.62	2.73	3.70	5.01	4.80	4.446	
MIN	0.74	1.22	0.84	1.50	2.38	0.80	0.36	0.23	0.30	0.17	0.30	0.74	0.79	
MAX	10.42	9.76	11.19	12.97	16.75	11.76	10.69	10.61	11.17	11.36	11.86	11.17	11.64	

Fuente: INAMHI

**Tabla 29.**  
**Coefficientes de escorrentía en el punto de medición de caudal**

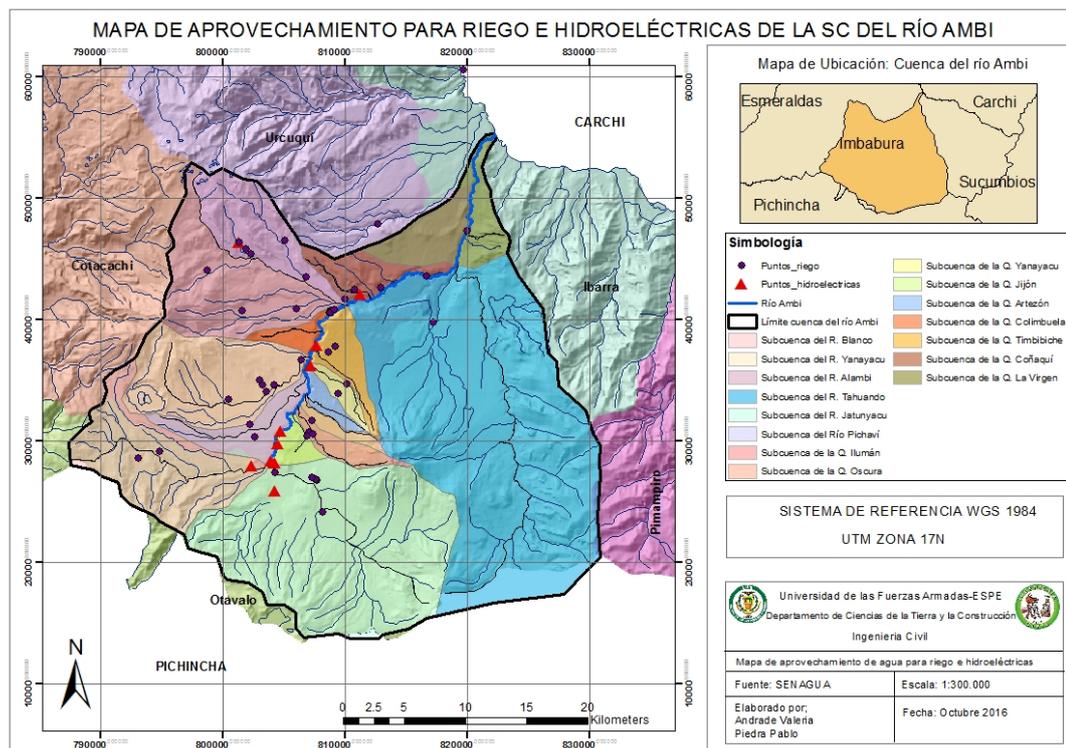
Parámetro	P. Media (mm)	Área (km <sup>2</sup> )	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	C
Caudal medio	902.984	664.989	4.446	<b>0.2335</b>
Caudal mínimo			0.79	<b>0.611</b>
Caudal máximo			11.64	<b>0.042</b>

Como se observa en la tabla anterior los coeficientes de escorrentía calculados son muy bajos, esto se debe a que dichos coeficientes no son los reales de la cuenca ya que son calculados a partir de los caudales medidos en la estación hidrométrica. Por lo tanto es preciso indicar que estas mediciones de caudales en los cauces naturales ya toman en cuenta los caudales derivados para diferentes usos o aprovechamientos (Cabrera, 2002).

Según los datos proporcionados por la SENAGUA, específicamente de la demarcación hidrográfica Mira, existen varios proyectos que derivan caudales en toda la subcuenca del río Ambi, dichos caudales pertenecen principalmente a canales de riego que al ser captados no regresan nuevamente al río afectando así su calidad.

En vista de que se requiere para la modelación de la calidad los caudales disponibles en el río, es correcto trabajar el modelo hidráulico con los caudales medidos y los coeficientes de escorrentía encontrados, los cuales ya consideran el desvío de caudales para diferentes aprovechamientos. A partir de estos coeficientes de escorrentía y con la precipitación media de cada subcuenca se calculó los caudales en cada abscisa donde se tiene descargas de las distintas subcuencas al río Ambi.

En la Figura 16, se muestra la ubicación de los puntos de desvío de caudal dentro de la subcuenca.



**Figura 16. Mapa de aprovechamiento para riego e hidroeléctricas de la SC del río Ambi**

El detalle de los puntos de aprovechamiento mostrados en el mapa se los presenta adjuntos en el Anexo 4.

Los resultados de los caudales hidráulicos medios, mínimos y máximos calculados se presentan en la Tabla 30.

**Tabla 30.**  
**Caudales calculados para el río Ambi**

No	Nombre Subcuenca	Area (km <sup>2</sup> )	$\bar{P}$ (mm)	Abscisa	Q med (m <sup>3</sup> /seg)	Q min (m <sup>3</sup> /seg)	Q max (m <sup>3</sup> /seg)
1	Río Blanco	92.967	1132.213	46+686.00	2.199	0.394	5.758
5	Río Yanayacu	233.993	819.412				
10	Río Alambi-Cariyacu	10.398	875.000	40+239.16	0.067	0.012	0.176
7	Río Tahuando	13.862	869.008	39+597.84	0.089	0.016	0.234
8	Río Jatunyacu	7.563	871.509	38+384.67	0.049	0.009	0.128
11	Río Pichavi	8.586	875.000	38+153.53	0.056	0.010	0.146
6	Quebrada Iluman	29.856	938.003	36+610.30	0.207	0.037	0.543
9	Quebrada Oscura	8.271	873.936	34+748.22	0.054	0.010	0.140
2	Quebrada Yanuyacu	87.913	993.570	33+838.55	0.647	0.116	1.693
13	Quebrada Jijón	22.728	832.403	32+521.06	0.140	0.025	0.367
12	Quebrada Artizón	10.376	862.630	30+378.70	0.066	0.012	0.174
3	Quebrada Colimbuela	138.253	847.924	25+825.78	0.868	0.156	2.273
14	Quebrada Timbiche	25.762	763.959	23+411.68	0.146	0.026	0.382
4	Quebrada Coñaquí	385.809	727.487	14+104.74	2.078	0.373	5.441
15	Quebrada La Virgen	53.267	694.210	11+416.58	0.274	0.049	0.717
<b>Q total</b>					<b>6.940</b>	<b>1.244</b>	<b>18.170</b>

Adjunto en el Anexo 5, se presentan los datos hidráulicos completos obtenidos del programa HEC-RAS para caudales mínimo, medio y máximo del río Ambi, tales como caudal, pendiente del cauce, velocidad, número de Froude, etc., en el año 2016.

#### 4.4.3. Caudales sanitarios

Los caudales sanitarios con los que se modeló la calidad del agua del río en el programa HEC-RAS, partieron de la determinación de la población correspondiente a cada subcuenca.

En la Tabla 31 se muestra detallada la información para la determinación de la población en cada subcuenca considerada.

**Tabla 31.**  
**Población total 2010 por subcuencas de la cuenca del río Ambi.**

Subcuenca	Area SC (ha)	Parroquia	Area (ha)	URBANO			RURAL			Pob Total (hab)
				Area en la SC (ha)	Dens (hab /ha)	Pob (hab)	Area en la SC (ha)	Dens (hab /ha)	Pob (hab)	
R. Blanco	9296.7	San José de Quichinche	8529				7249.7	1.0	7205	12153
		Plaza Gutierrez	8013				400.7	0.1	25	
		Quiroga	6830				1024.5	0.9	968	
		Otavallo	8385	628.9	6.3	3956				
R. Yanayacu	8791.3	Cotacachi	6995	5596.0	2.5	13710				15000
		Imantag	21109				1055.5	0.2	247	
		Plaza Gutierrez	8013				1202.0	0.1	74	
		Quiroga	6830				1024.5	0.9	968	
R. Alambi-Cariyacu	13825	Imantag	21109				9499.1	0.2	2224	4032
		San Blas	7299				4379.4	0.4	1809	
R. Tahuando	38581	Ibarra	24202	16941	5.8	97752				135978
		San Antonio	2709				2709.0	6.5	17522	
		La Esperanza	3417				3417.0	2.2	7364	
		Angochagua	11833				11833	0.3	3266	
		Imbaya	1201				1201.0	1.1	1279	
		Chaltura	1391				1391.0	2.3	3144	
		Natabuela	1330				1330.0	4.3	5653	
R. Jatunyacu	23399	Otavallo	8385	6708.0	6.3	42193				75184
		Peguche	859				601.3	5.7	3415	
		Eugenio Espejo	2126				2126.0	3.5	7356	
		Gonzalez Suarez	4625				4625.0	1.2	5629	
		San Pablo	6482				6482.0	1.5	9898	
		San José de Quichinche	8529				1279.4	1.0	1271	
		San Rafael	1751				1751.0	3.1	5421	
R. Pichaví	2985.6	Quiroga	6830				1366.0	0.9	1291	7355
		Otavallo	8385	419.3	6.3	2637				
		Cotacachi	6995	1399.0	2.5	3428				
Q. Ilumán	1386.2	Ilumán	1993				1395.1	4.3	6009	6009
Q. Oscura	756.3	Ilumán	1993				398.6	4.3	1717	3238
		San Roque	1679				251.9	6.0	1521	
Q. Yanayacu	827.1	Atuntaqui	2622	262.2	8.9	2330				5879
		San Roque	1679				587.7	6.0	3549	
Q. Jijón	1039.8	Otavallo	8385	628.9	6.3	3956				6278

Subcuenca	Area SC (ha)	Parroquia	Area (ha)	URBANO			RURAL			Pob Total (hab)
				Area en la SC (ha)	Dens (hab /ha)	Pob (hab)	Area en la SC (ha)	Dens (hab /ha)	Pob (hab)	
		Ilumán	1993				199.3	4.3	858	
		Peguche	859				257.7	5.7	1464	
Q. Artezón	858.6	San Roque	1679				839.5	6.0	5071	5071
Q. Colimbuela	1037.6	Imantag	21109				1055.5	0.2	247	247
Q. Timbibiche	2272.8	Atuntaqui	2622	2359.8	8.9	20969				20969
Q. Coñaquí	2576.2	Urcuquí	6176	1544.0	0.8	1302				1754
		San Blas	7299				1094.9	0.4	452	
Q. La Virgen	5326.7	Ibarra	24202	2420.2	5.8	13965				16048
		Urcuquí	6176	2161.6	0.8	1822				
		Salinas	4261				639.2	0.4	261.4	

Las poblaciones proyectadas con las tasas de crecimiento indicadas anteriormente, se muestran a continuación en la Tabla 32.

**Tabla 32.**  
**Poblaciones proyectadas por subcuencas de la cuenca del río Ambi.**

Subcuenca	Población 2016	Población 2020	Población 2030	Población 2040
R. Blanco	13670	14786	17988	21885
R. Yanayacu	16382	17374	20123	23308
R. Alambi-Cariyacu	4192	4302	4590	4898
R. Tahuando	153314	166082	202851	247759
R. Jatunyacu	84570	91469	111282	135386
R. Pichaví	8153	8732	10365	12305
Q. Ilumán	6735	7267	8790	10631
Q. Oscura	3629	3916	4737	5729
Q. Yanayacu	6676	7266	8979	11097
Q. Jijón	7061	7638	9292	11305
Q. Artezón	5653	6079	7287	8736
Q. Colimbuela	257	264	281	300
Q. Timbibiche	23810	25914	32026	39578
Q. Coñaquí	1931	2060	2419	2840
Q. La Virgen	17882	19220	23019	27569

Las dotaciones de agua consideradas para el cálculo de los caudales sanitarios varían según la población de la parroquia y según su condición de rural o urbana.

Para las parroquias de la provincia de Imbabura cuyas poblaciones son en la mayoría rurales, las dotaciones de agua varían entre los 120 y 200 l/hab/día.

Para la parroquia más importante, Ibarra, la dotación es de aproximadamente 170 l/hab/día (GAD, 2010), lo que da la referencia para considerar las dotaciones en las otras parroquias que forman parte de la subcuenca del Ambi. Debido a la poca información y en base a lo señalado, las dotaciones para la presente investigación son las que se muestran en la Tabla 33.

**Tabla 33.**  
**Dotaciones consideradas por subcuencas**

<b>Subcuenca</b>	<b>Dotación (l/hab/día)</b>
Río Blanco	140
Río Yanayacu	140
Río Alambi-Cariyacu	120
Río Tahuando	150
Río Jatunyacu	150
Río Pichaví	140
Quebrada Ilumán	120
Quebrada Oscura	120
Quebrada Yanayacu	120
Quebrada Jijón	140
Quebrada Artezón	120
Quebrada Colimbuela	120
Quebrada Timbibiche	150
Quebrada Coñaquí	140
Quebrada La Virgen	140

Estas dotaciones son menores a las recomendadas en el código ecuatoriano para el diseño de obras sanitarias, debido a que en las zonas rurales dentro de la subcuenca la dotación del agua no es siempre continua y la oferta de caudal para dichas zonas no es tan alta como para utilizar los valores recomendados en el código. Estas dotaciones tomadas para el presente proyecto consideran además las pérdidas de caudal que se da en todo sistema de abastecimiento de agua y por ende la dotación neta para cada habitante no se ve alterada en los valores considerados.

Con los valores mostrados de dotación y poblaciones proyectadas, los caudales sanitarios en l/s por subcuencas son los presentados en la Tabla 34.

**Tabla 34.**  
**Caudales sanitarios proyectados por subcuencas**

Subcuenca	Caudal 2016	Caudal 2020	Caudal 2030	Caudal 2040
R. Blanco	16.61	17.97	21.86	26.60
R. Yanayacu	17.06	18.10	20.96	24.28
R. Alambi-Cariyacu	4.37	4.48	4.78	5.10
R. Tahuando	199.63	216.25	264.13	322.60
R. Jatunyacu	110.12	119.10	144.90	176.28
R. Pichaví	9.91	10.61	12.60	14.95
Q. Ilumán	7.02	7.57	9.16	11.07
Q. Oscura	3.78	4.08	4.93	5.97
Q. Yanayacu	6.95	7.57	9.35	11.56
Q. Jijón	8.58	9.28	11.29	13.74
Q. Artezón	5.89	6.33	7.59	9.10
Q. Colimbuela	0.27	0.27	0.29	0.31
Q. Timbiche	31.00	33.74	41.70	51.53
Q. Coñaquí	2.35	2.50	2.94	3.45
Q. La Virgen	21.73	23.36	27.97	33.50

Tomando en cuenta los desvíos de caudal señalados anteriormente que existen en toda la cuenca del Ambi, fue necesario calcular que cantidad de caudal sanitario ya no llega al río Ambi producto de los proyectos de aprovechamiento en cada subcuenca y que tienen un impacto en la calidad del cuerpo de agua.

Como no se puede saber exactamente la cantidad de caudal sanitario que se desvía en cada concesión, se lo determinó de manera aproximada obteniendo la relación existente entre caudal hidráulico (mínimo, medio y máximo) y caudal sanitario calculado para cada una de las 15 subcuencas que forman la cuenca del río Ambi. El valor de dicha relación se multiplicó por el caudal concesionado total en cada subcuenca y se obtuvo el caudal sanitario que se desvía en cada una de ellas. El cálculo de dichos caudales se los presenta a continuación en la Tabla 35.

**Tabla 35.**  
**Caudales sanitarios desviados en la SC del río Ambi por proyectos de riego a partir de los caudales hidráulicos**

Nombre Subcuenca	Qh mín (l/s)	Qh medio (l/s)	Qh máx (l/s)	Qs (l/s)	Qs/Q h mín	Qs/Q h med	Qs/Q h máx	Q con (l/s)	Qs mín desviado (l/s)	Qs med desviado (l/s)	Qs máx desviado (l/s)
R. Blanco	140	779	2041	16.6	0.119	0.021	0.008	90.5	10.76	1.93	0.74
R. Yanayacu	116	647	1694	17.1	0.147	0.026	0.010	572.6	84.27	15.11	5.77
R. Alambi	156	868	2273	4.4	0.028	0.005	0.002	1880.01	52.76	9.46	3.61
R. Tahuando	373	2078	5442	199.6	0.536	0.096	0.037	88.6	47.47	8.51	3.25
R. Jatunyacu	255	1420	3717	110.1	0.433	0.078	0.030	2362.04	1021.94	183.20	69.97
R. Pichavi	37	207	543	9.9	0.267	0.048	0.018	93.7	24.97	4.48	1.71
Q. Iluman	16	89	234	7.0	0.439	0.079	0.030	198	86.87	15.57	5.95
Q. Oscura	9	49	128	3.8	0.432	0.077	0.030	0	0.00	0.00	0.00
Q. Yanuyacu	10	54	140	7.0	0.725	0.130	0.050	156.5	113.42	20.33	7.77
Q. Jijón	12	67	176	8.6	0.711	0.127	0.049	52	36.95	6.62	2.53
Q. Artizón	10	56	146	5.9	0.591	0.106	0.040	0	0.00	0.00	0.00
Q. Colimbuela	12	66	174	0.3	0.023	0.004	0.002	764.66	17.22	3.09	1.18
Q. Timbiche	25	140	367	31.0	1.235	0.221	0.085	80	98.76	17.70	6.76
Q. Coñaquí	26	146	382	2.3	0.090	0.016	0.006	644.4	57.89	10.38	3.96
Q. La Virgen	49	274	717	21.7	0.443	0.079	0.030	1239.6	0.00	98.38	0.00

Qh: caudal hidráulico; Qs: caudal sanitario; Qcon: caudal concesionado por la SENAGUA

Sin embargo los caudales mostrados en la tabla anterior no fueron con los que se trabajaron en el modelo de calidad de HEC-RAS, sino que se los afectó por un factor de uso o simultaneidad considerando que no todos los proyectos de aprovechamiento toman el caudal todo el día, ni todos los días. Finalmente, se restó este último caudal afectado por dicho coeficiente del caudal sanitario total de la subcuenca, para obtener así el caudal que finalmente se desvía en cada subcuenca considerando todos los aprovechamientos existentes en cada una de ellas. Con todos estos cálculos se pretendió crear un modelo de calidad lo más exacto posible.

Los cálculos detallados de los caudales sanitarios con los que se modeló en el programa HEC-RAS se presentan a continuación en la Tabla 36.

**Tabla 36.**  
**Caudales sanitarios restados en el modelo de HEC-RAS**

Nombre Subcuenca	Qs (l/s)	Coficiente de uso Q mín	Coficiente de uso Q med	Coficiente de uso Q máx	Q mín restado (l/s)	Q med restado (l/s)	Q máx restado (l/s)
R. Blanco	16.6	1.00	1.00	1.00	<b>10.76</b>	<b>1.93</b>	<b>0.74</b>
R. Yanayacu	17.1	0.13	0.50	1.00	<b>10.96</b>	<b>7.55</b>	<b>5.77</b>
R. Alambi	4.4	0.05	0.30	0.30	<b>2.64</b>	<b>2.84</b>	<b>1.08</b>
R. Tahuando	199.6	0.50	1.00	1.00	<b>23.74</b>	<b>8.51</b>	<b>3.25</b>
R. Jatunyacu	110.1	0.07	0.40	1.00	<b>71.54</b>	<b>73.28</b>	<b>69.97</b>
R. Pichavi	9.9	0.20	0.70	1.00	<b>4.99</b>	<b>3.13</b>	<b>1.71</b>
Q. Iluman	7.0	0.06	0.20	0.50	<b>5.21</b>	<b>3.11</b>	<b>2.97</b>
Q. Oscura	3.8	1.00	1.00	1.00	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>
Q. Yanuyacu	7.0	0.04	0.20	0.50	<b>4.54</b>	<b>4.07</b>	<b>3.88</b>
Q. Jijón	8.6	0.10	0.50	1.00	<b>3.69</b>	<b>3.31</b>	<b>2.53</b>
Q. Artizón	5.9	1.00	1.00	1.00	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>
Q. Colimbuela	0.3	0.01	0.10	0.10	<b>0.17</b>	<b>0.31</b>	<b>0.12</b>
Q. Timbiche	31.0	0.20	0.70	1.00	<b>19.75</b>	<b>12.39</b>	<b>6.76</b>
Q. Coñaquí	2.3	0.02	0.20	0.10	<b>1.16</b>	<b>2.08</b>	<b>0.40</b>
Q. La Virgen	21.7	0.20	0.20	0.20	<b>0.00</b>	<b>19.68</b>	<b>0.00</b>

#### 4.4.4. Concentraciones de parámetros de calidad

Los valores de concentración en mg/l de cada parámetro que modela el módulo de calidad de HEC-RAS, son constantes para todos los años en cada subcuenca. Esto es debido a que dependen de la población y el caudal que crecen en una misma relación respecto a años anteriores. El programa toma la concentración y con el caudal sanitario variable en todos los años calcula la carga total que llega al río. Las concentraciones obtenidas se presentan en la Tabla 37.

**Tabla 37.**  
**Concentraciones de los parámetros de calidad**

Nombre Subcuenca	DBO (mg/l)	N-NO <sub>3</sub> (mg/l)	CF (NMP/100ml)	P-PO <sub>3</sub> (mg/l)
R. Blanco	499.99	50.00	2.00E+07	20.00
R. Yanayacu	583.33	58.33	2.33E+07	23.33
R. Alambi	583.30	58.33	2.33E+07	23.33
R. Tahuando	466.67	46.67	1.87E+07	18.67
R. Jatunyacu	466.67	46.67	1.87E+07	18.67
R. Pichavi	500.02	50.00	2.00E+07	20.00

<b>Nombre Subcuenca</b>	<b>DBO (mg/l)</b>	<b>N- NO<sub>3</sub> (mg/l)</b>	<b>CF (NMP/100ml)</b>	<b>P- PO<sub>3</sub> (mg/l)</b>
Q. Iluman	583.33	58.33	2.33E+07	23.33
Q. Oscura	583.28	58.33	2.33E+07	23.33
Q. Yanuyacu	583.35	58.34	2.33E+07	23.33
Q. Jijón	499.97	50.00	2.00E+07	20.00
Q. Artizón	583.29	58.33	2.33E+07	23.33
Q. Colimbuela	583.62	58.36	2.33E+07	23.34
Q. Timbibiche	466.67	46.67	1.87E+07	18.67
Q. Coñaquí	499.93	49.99	2.00E+07	20.00
Q. La Virgen	499.99	50.00	2.00E+07	20.00

Los valores de la Tabla 37, son los que finalmente ingresan en el programa para la modelación de la calidad y representan únicamente a las cargas aportadas por la población. A parte de esto en nitratos y fosfatos se consideró el aporte del suelo y de las concentraciones existentes en el agua natural del río.

#### **4.4.5. Resultados de la calidad actual del río Ambi**

Los resultados de los parámetros de calidad fueron modelados y analizados para caudales mínimos, medios y máximos del río. Dichos resultados fueron comparados con la norma ambiental (TULSMA 2015), que rige la calidad del agua para riego agrícola, recreación y preservación de la vida acuática y silvestre.

El análisis de los resultados para caudal medio es el más representativo, ya que se buscó modelar la calidad promedio presente en el río a lo largo de todo el año. El caudal medio es el punto de comparación de los resultados obtenidos por el modelo del programa y los datos medidos en laboratorio ubicados a lo largo del cauce del río Ambi, que fueron muestreados en los meses de mayo y agosto con caudales de campo cercanos al caudal medio.

Factores como el cambio climático y eventos como El Niño y La Niña pudieron haber alterado el comportamiento de la precipitación y temperatura notándose esto en el muestreo de campo realizado (Ruiz, J., De Jesús, O., 2012). Es decir que al momento de tomar las muestras en las épocas secas y de lluvia, los caudales no eran necesariamente el mínimo y máximo respectivamente con los que se modeló en el programa.

El caudal mínimo fue analizado debido a que por la disminución de caudal la composición de los parámetros orgánicos e inorgánicos en el agua se encuentran concentrados, resultando la condición más crítica del río en cuanto a su calidad (Carrera *et al.*, 2015).

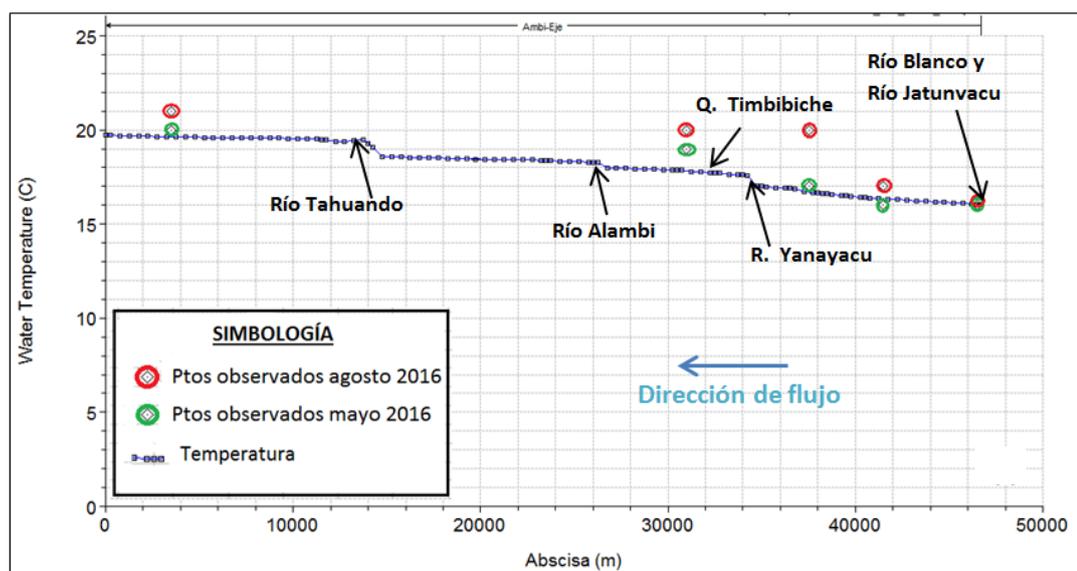
Por el contrario, el análisis con caudal máximo resultó el más favorable del río, debido a las bajas concentraciones de los parámetros por la dilución de los caudales sanitarios en los caudales hidráulicos del río (Rueda, 2010).

#### **4.4.5.1. Temperatura**

La temperatura es un factor abiótico que regula procesos vitales para los organismos vivos, así como también afecta las propiedades químicas y físicas de otros factores abióticos en un ecosistema. En consecuencia, la temperatura ejerce una marcada influencia sobre la reproducción, crecimiento y el status fisiológico de todas las entidades vivas. Los microorganismos como grupo, particularmente el grupo de las bacterias, demuestran una capacidad extraordinaria para vivir y reproducirse a lo largo de un amplio rango de temperaturas, desde temperaturas bajo 0°C hasta temperaturas que alcanzan los 113°C (UPRM, 2016).

El río Ambi al estar ubicado en la sierra presentó temperaturas medidas en campo que varían entre los 16°C y 22°C. Para la determinación de la temperatura del agua el modelo considera los datos meteorológicos de la zona tales como la humedad, la temperatura ambiental, la velocidad del viento, radiación, nubosidad, etc. En la Figura 17, 18 y 19 se muestran los resultados obtenidos en el modelo, tanto para caudales mínimos, medio y máximo respectivamente.





**Figura 19. Gráfico de temperatura HEC-RAS para caudal máximo**

El río Ambi presentó variación en la temperatura según el caudal analizado. Los ríos pueden presentar variaciones de temperatura debido a diferentes factores como: altitud, latitud, profundidad del cauce, hora del día, temperatura del ambiente, circulación del aire, nubosidad y fluctuaciones anuales relacionadas con la época de invierno o de estiaje (Carrillo, M., Urgiles, P., 2016) .

Según los resultados obtenidos el modelo calculado para el caudal mínimo Figura 17 fue el que presentó un mayor aumento de temperatura en el río, para este modelo se tuvo variaciones desde los 16 a los 21.6°C, y al compararlos con los puntos observados en campo la temperatura es similar al muestreo realizado en agosto correspondiente a épocas de menores precipitaciones , por el contrario para el modelo realizado para el caudal máximo debido al incremento de caudal se observó una disminución en la temperatura, siendo la temperatura máxima en estas condiciones de 19.7 °C, los valores determinados en el modelo para este caudal fueron cercanos a los medidos en mayo de 2016 correspondiente a época de lluvias. El caudal medio es el más representativo durante el año, en la Figura 18 se observa que las temperaturas fluctúan entre los 16 y los 20.5 °C.

La normativa TULSMA 2015 no condiciona un rango de temperatura óptimo para uso agrícola o preservación de la vida acuática, sin embargo se sabe que la

temperatura desempeña un rol fundamental al regular procesos vitales en el funcionamiento de ecosistemas y afectar propiedades físico-químicas del medio acuoso. Según Rodier (1998), temperaturas superiores a los 15°C favorece el desarrollo de los microorganismos, mientras que elevadas temperaturas resultan nocivas para peces favorece la mortalidad de ciertas especies y el desarrollo de otras. En el río Ambi en el modelo de caudal máximo en donde disminuye la temperatura se tiene un rango superior a los 15°C que favorece el desarrollo de microorganismos, mientras que para el caudal mínimo el incremento de temperatura no representa riesgo, ya que su temperatura máxima de 21.7°C cercano a la temperatura ambiente, no es impedimento para el desarrollo de la vida de especies que habitan en el medio. En la normativa se señala que para realizar descargas en cuerpos de agua dulce, la temperatura del agua debe estar en un rango de  $\pm 3^{\circ}\text{C}$  de las condiciones naturales del cuerpo de agua.

#### **4.4.5.2.Oxígeno disuelto**

El oxígeno disuelto en el agua es vital para la existencia de la mayoría de los organismos acuáticos, es un componente clave en la respiración y es un indicador importante de la calidad del agua. En un cuerpo de agua se produce y a la vez se consume oxígeno. La producción de oxígeno está relacionada con la fotosíntesis, mientras el consumo dependerá de la respiración, descomposición de sustancias orgánicas y otras reacciones químicas. La concentración total de oxígeno disuelto (OD) dependerá del balance entre todos estos fenómenos (Goyenola , G. , 2007).

Hay muchos factores que afectan la concentración del oxígeno disuelto en un ambiente acuático, entre estos la temperatura, flujo de la corriente, presión del aire, plantas acuáticas, materia orgánica en descomposición y actividad humana (Verniere, 2007).

Las aguas superficiales limpias suelen estar saturadas de oxígeno, el oxígeno de saturación dependen de la temperatura y la altitud (Echarri, 2007) .

El modelo HEC-RAS supone que el río cuenta con el oxígeno de saturación antes de las descargas sanitarias, mientras que para las aguas residuales se considera un

oxígeno disuelto nulo, debido a que dichas aguas están compuestas por materia orgánica biodegradable que los microorganismos la utilizan como alimento (Fernández, J., Curt, M.D., 2016).

Una de las consideraciones fundamentales del modelo para el OD y el DBO<sub>5</sub> es el coeficiente de re aireación, parámetro fundamental en los modelos de calidad del agua, el programa HEC-RAS por defecto utiliza un coeficiente de re aireación del agua de 5, debido a que dicho valor se propuso para la representación de ríos en los Estados Unidos, que al ser en su mayoría cuerpos de agua anchos y planos el aire prácticamente solo es consumido por la materia orgánica presente en dichos cuerpos (USACE, 2010).

Los ríos de montaña presentan una gran capacidad de autodepuración, debido a las altas tasas de re aireación ocasionadas por la gran turbulencia del flujo (Holguin, J., Camacho, A., 2003)

Para el caso del Ecuador se ha comprobado que el agua de los ríos de montaña, como el río Ambi, presentan un coeficiente de re aireación aproximado de 100, lo que significa que el oxígeno disuelto en el agua que es consumido por los microorganismos, se recupera por las altas pendientes y resaltos hidráulicos que forman los ríos de montaña (Fitchner Hidroestudios, 2014).

En la Figura 20, 21 y 22 se presentan los resultados obtenidos del modelo tanto para caudal mínimo medio y máximo respectivamente.

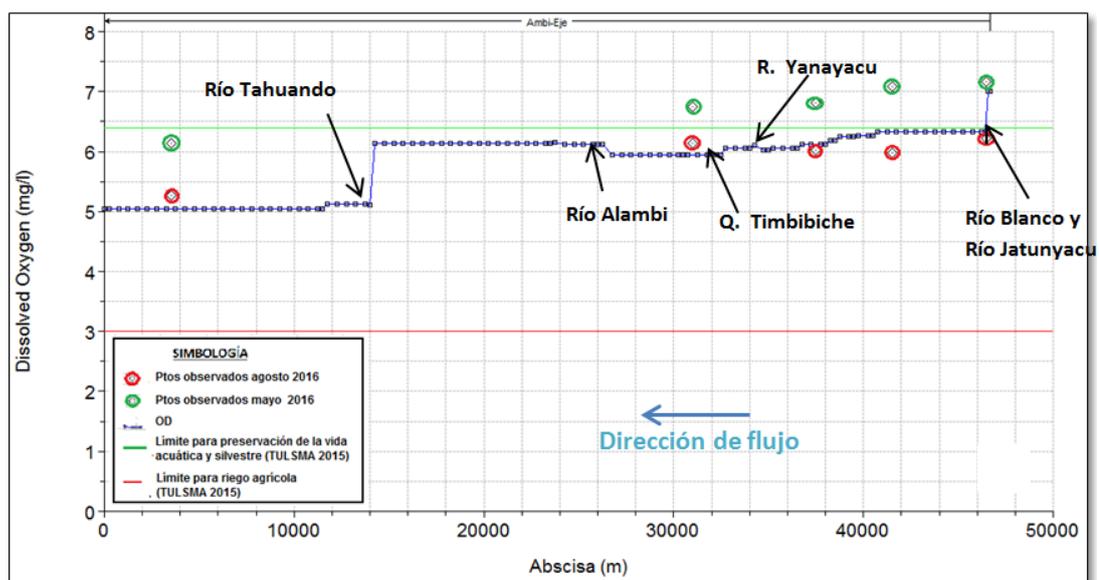


Figura 20. Gráfico de Oxígeno Disuelto HEC-RAS para caudal mínimo

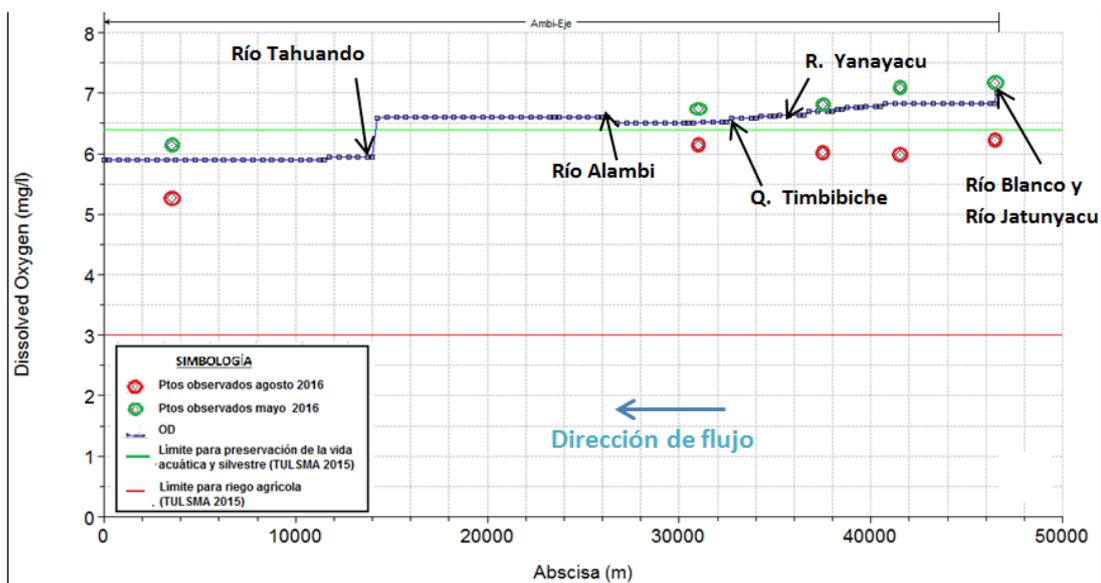
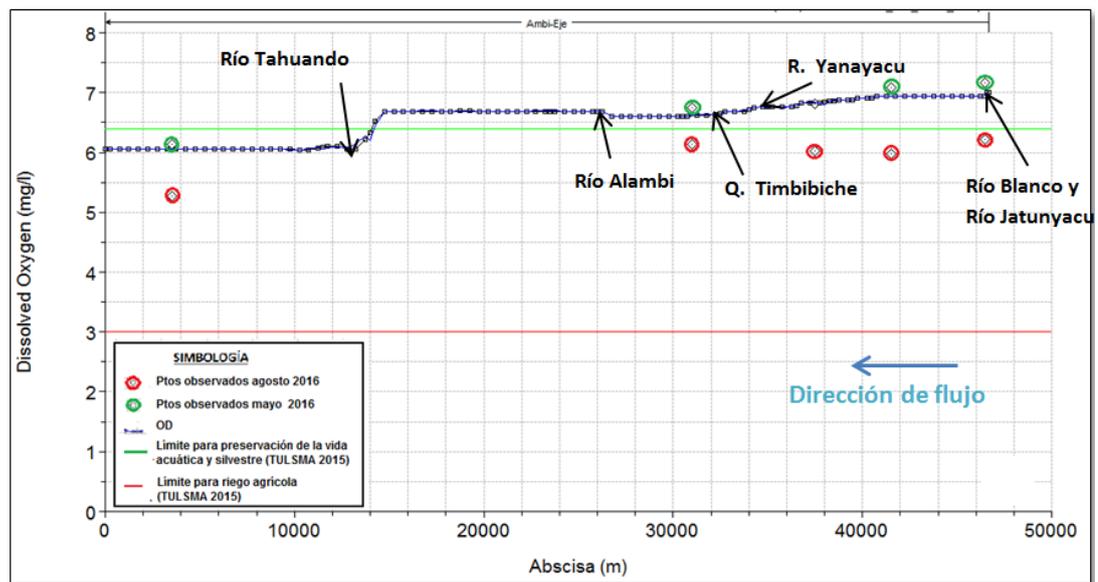


Figura 21. Gráfico de Oxígeno Disuelto HEC-RAS para caudal medio



**Figura 22. Gráfico de Oxígeno Disuelto HEC-RAS para caudal máximo**

Debido a que la velocidad de las reacciones bioquímicas que consumen oxígeno aumenta con la temperatura, los niveles de oxígeno disuelto tienden a ser más críticos en las épocas estivales. El problema se agrava en los meses de verano, debido a que el caudal de los cursos de agua es generalmente menor, razón por la cual la cantidad total de oxígeno disponible es también menor (Metcalf & Eddy, 1998).

En la gráfica se observa que el oxígeno disuelto disminuye a medida que disminuye el caudal, así, para el caudal mínimo se tienen los menores valores de oxígeno disuelto en el río, Se observa también que los niveles de oxígeno disuelto son mayores al inicio del río donde se tiene una mayor altitud y va disminuyendo su cantidad aguas abajo, esto se debe a que el oxígeno disuelto aumenta a medida que la presión tanto atmosférica como hidrostática aumenta, El agua a altitudes más bajas puede contener más oxígeno disuelto que el agua en altitudes más altas (Wetzel, R. G., 2001).

En los modelos tanto para el caudal medio, mínimo y máximo se observó un mayor porcentaje de disminución de oxígeno disuelto después de la descarga del río

Tahuando en donde se incorpora gran cantidad de materia orgánica que consume el oxígeno disuelto en el río (Verniere, 2007).

Según la normativa TULSMA 2015 el OD es un parámetro importante a considerar en la calidad del agua dependiendo del uso que se le dé a este recurso, para conservación de la vida acuática la normativa exige un porcentaje de oxígeno de saturación mayor al 80 % es decir de 6.4 mg/l si se considera un oxígeno de saturación promedio del río de 8 mientras que para uso agrícola se requiere como mínimo un OD de 3 mg/l (MAE, 2015).

Para el uso agrícola en ningún modelo se tiene restricción ya que para los tres caudales considerados se tiene un nivel de OD mayor a los 3mg/l, no así para la preservación de la vida acuática y silvestre en la que si se tiene restricciones.

Para el modelo con el caudal medio se tiene una variación de OD de 6.83 a 5.89 mg/l con un valor promedio de 6.44 mg/l para este caso según la normativa TULSMA no existe restricción para preservación de la vida acuática en el río a excepción del último tramo desde la descarga del río Tahuando en donde se ve una disminución considerable de OD, de igual manera ocurre en el modelo con el caudal máximo en donde se tiene un mayor porcentaje de OD en el río con valores que van desde los 6 a los 7 mg/l teniendo de igual forma el último tramo del río niveles de OD inferiores a los permitidos por la normativa.

El caudal mínimo es el más crítico, en este modelo tuvo una variación de OD desde los 6.3 a los 5 mg/l, para este caudal en todo el río se tiene un nivel de OD menor al aceptado por la normativa, pero se debe tomar en cuenta que este nivel de caudal es poco probable en el año.

#### **4.4.5.3.Demanda Bioquímica de Oxígeno a los cinco días (DBO<sub>5</sub>)**

La aplicación de la DBO<sub>5</sub>, permitió calcular los efectos de las descargas de los efluentes domésticos e industriales de las poblaciones pertenecientes a la cuenca, sobre la calidad de las aguas del río Ambi. La concentración de DBO<sub>5</sub> se ve afectada por diversos factores como la temperatura, las clases de microorganismos presentes, por la cantidad y tipo de elementos nutritivos presentes (Freire, 2009).

Según Hidalgo *et al.*, (2003), el agua natural en un cuerpo superficial considerado exento de aportes sanitarios, tiene un valor de  $DBO_5$  de aproximadamente 5 mg/l, este valor fue tomado de referencia en la modelación para poder representar el efecto de las descargas de aguas servidas en cada subcuenca.

Al igual que en el oxígeno disuelto, debido a las características del río Ambi se utilizó un coeficiente de re aireación para el modelo de 100. En la Figura 23, 24 y 25, se muestran los resultados obtenidos en el modelo, tanto para caudal mínimo, medio y máximo respectivamente.

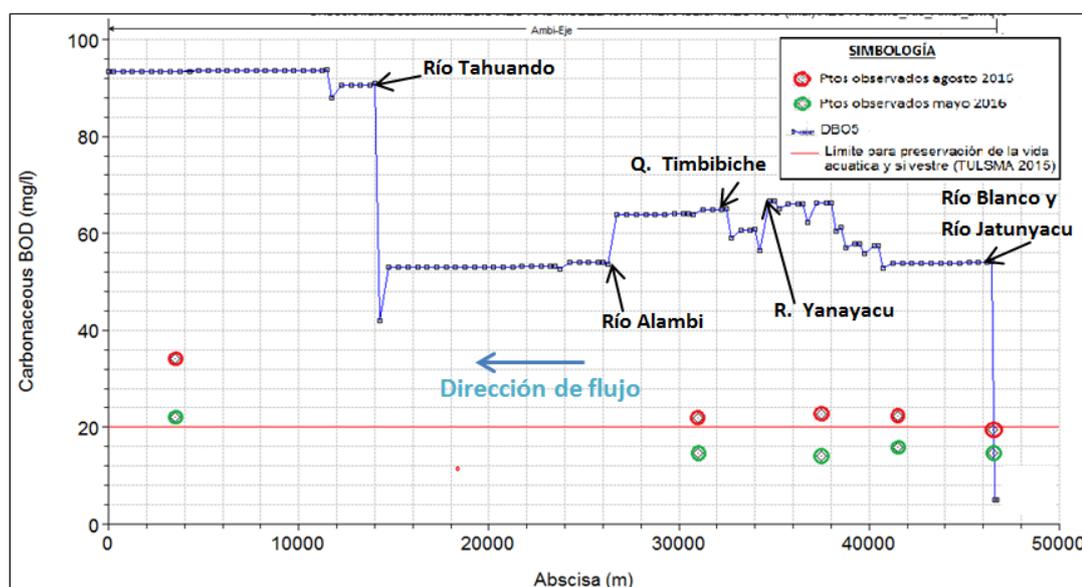


Figura 23. Gráfico de  $DBO_5$  HEC-RAS para caudal mínimo

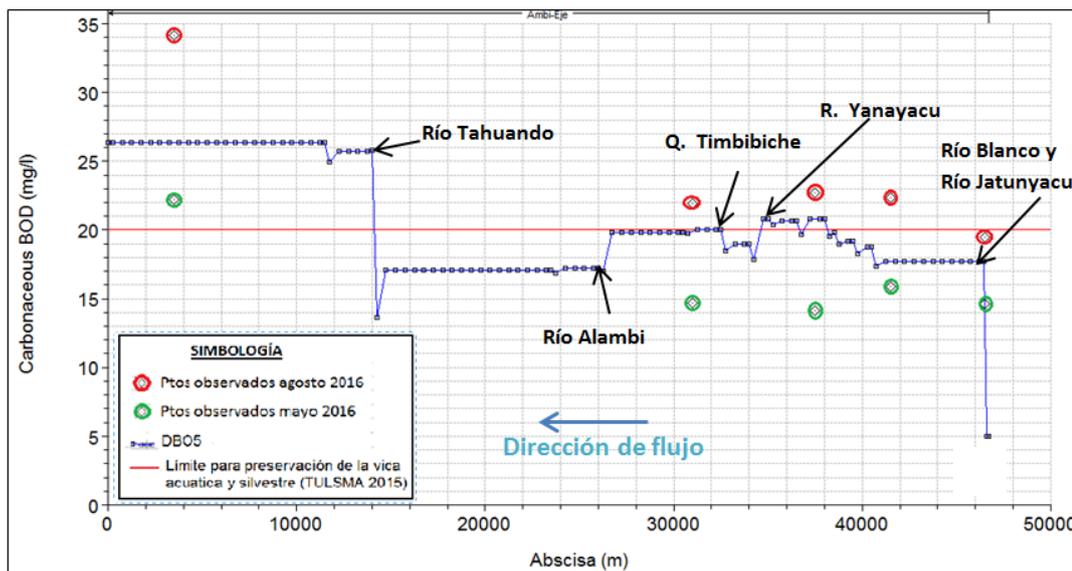


Figura 24. Gráfico de DBO<sub>5</sub> HEC-RAS para caudal medio

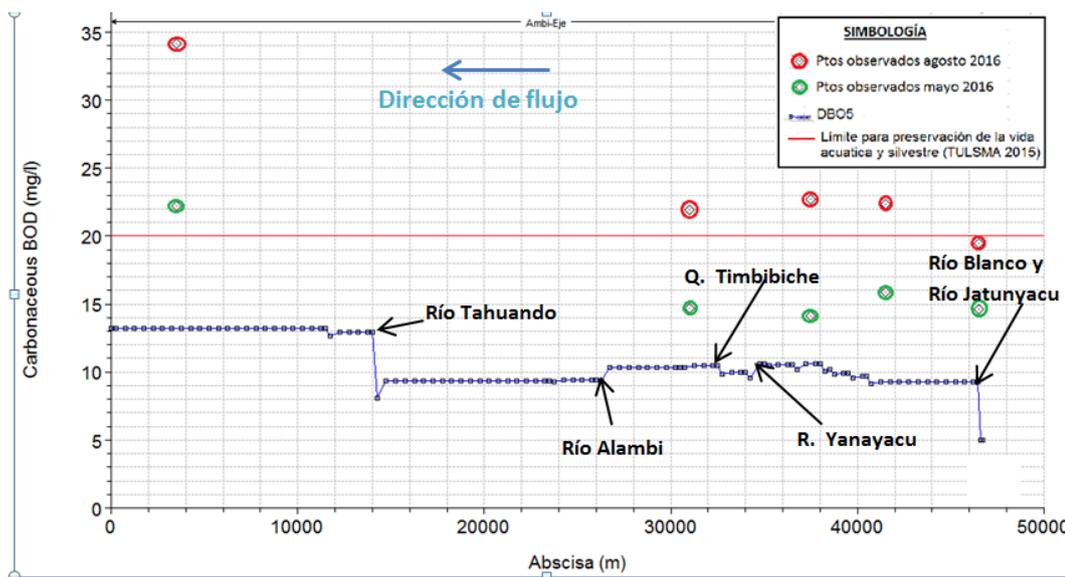


Figura 25. Gráfico de DBO<sub>5</sub> HEC-RAS para caudal máximo

Los resultados de este parámetro como se observa en la gráfica, muestra que a medida que aumenta el caudal va disminuyendo las concentraciones de DBO<sub>5</sub>, debido a que la presencia de materia orgánica en el río se ve afectada por el caudal hidráulico, disminuyendo su contenido ante el incremento del volumen del caudal,

así en épocas de lluvias, se disminuye la contaminación del río reduciendo los niveles de contenido orgánico del agua (Rivas, V., Chuquilin, E. , 2012) .

Los resultados obtenidos en el modelo computacional representan valores teóricos suponiendo que la carga contaminante producida por toda la población de la cuenca llega al río Ambi como caudales sanitarios, se consideró también un ajuste a estos caudales debido a que por la concesión de caudales dadas por la SENAGUA para riego agrícola en quebradas, acequias y ríos afluentes al Ambi se desvía parte del caudal sanitario, lo que conlleva a una menor contaminación y reducción de contenido de materia orgánica en el río.

En el modelo se refleja también la actividad industrial existente en las márgenes del río, entre la que destaca las del cantón Cotacachi y su industria del cuero que utiliza el recurso hídrico para los procesos de tenería, contaminando al agua con residuos orgánicos e inorgánicos (A. B. L. Antonio, 2014).

Los mayores aportes de carga orgánica ( $DBO_5$ ) al río Ambi, se deben a las descargas de los ríos Blanco, Yanayacu, Pichaví , Tahuando, y la quebrada Timbibiche que desfogon los caudales sanitarios de las principales ciudades como Otavalo, Cotacachi e Ibarra, como se aprecia en el modelo se determinó un aumento de las concentraciones en las abscisas en donde llegan las descargas antes señaladas al río Ambi, siendo la más representativa en la abscisa 14000 la descarga del río Tahuando, el mismo que recibe las aguas sanitarias de la ciudad de Ibarra aumentando considerablemente el nivel de materia orgánica en el tramo final del río Ambi.

En la Figura 24 se observa que los resultados obtenidos en el modelo para el caudal medio se encuentran en promedio entre los valores tomados en laboratorio tanto en el muestreo de mayo y agosto de 2016, donde se tiene también un incremento de  $DBO_5$  para agosto debido a que el nivel de caudal en este muestreo fue menor, para este modelo se obtuvo rangos de  $DBO_5$  que varían entre los 13.66 y los 26.37 mg/l.

La norma ambiental TULSMA 2015, establece un límite de  $DBO_5$  de 20 mg/l para el uso del agua de un río en preservación de la vida acuática y silvestre, no así

para su uso en riego agrícola y recreación en donde no condiciona este parámetro (MAE, 2015).

La calidad del río en promedio para el modelo considerando el caudal medio es de 20.37 mg/l lo que indica que según la normativa TULSMA 2015 la concentración de DBO estuvo en el límite para preservación de la vida acuática y silvestre, como se observa en la Figura 24 a partir de la descarga del río Tahuando, el río Ambi ya no cumple con los límites establecidos con porcentaje promedio de excedencia respecto a la norma ambiental de 31 % llegando a un nivel máximo de DBO<sub>5</sub> en el final del río Ambi de 26.37 mg/l.

Debido a la disminución de caudal y tal como lo muestra la Figura 23 la concentración de DBO<sub>5</sub> en el modelo para el caudal mínimo es el más crítico, estos niveles son muy superiores a los valores de laboratorio tomados en el mes de agosto de 2016 que según las precipitaciones del INAMHI corresponde a épocas de sequía, esta diferencia se debe a que el caudal considerado en el modelo es el mínimo promedio obtenido de los registros de caudales medidos del INAMHI desde 1963 al año 2000 y del año 2014 al primer semestre del año 2015.

Para caudal mínimo en el río, los niveles de DBO<sub>5</sub> varían entre los 53 y 94 mg/l. Estos valores comparados con la norma ambiental están muy por encima del límite permisible, tal como se aprecia en la Figura 23, sin embargo, esta condición de caudal mínimo en el río no se presenta frecuentemente incluso en los meses de menor precipitación según lo indicado en los caudales medidos por el INAMHI (est. DJ Cariyacu H0023).

El único modelo en el que los niveles de concentración de DBO<sub>5</sub> cumplen con la normativa son considerando el caudal máximo Figura 25, para el cual los valores están entre 10 y 14 mg/l. Sin embargo, este caudal se presenta en el río muy ocasionalmente en época de lluvias y no es un escenario que refleje la calidad promedio del río Ambi a lo largo de todo el año.

#### 4.4.5.4. Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La DQO es otro de los parámetros más importantes en la caracterización de las aguas residuales, mide la cantidad de oxígeno que se requiere para oxidar químicamente el material orgánico (Cisterna *et al.*, 2013).

La norma ambiental en referencia, establece un límite máximo de concentración de este parámetro de 40 mg/l para preservación de la vida acuática y silvestre. La misma, no señala ningún límite para uso en riego agrícola ni para fines de recreación mediante contacto primario o secundario, por lo que se entiende que para estas actividades al cumplir con el límite señalado para la DBO<sub>5</sub>, el agua del río cumplirá también para la DQO.

La relación existente entre la DBO<sub>5</sub> y la DQO, es también un parámetro de la contaminación en un río, para el presente estudio se tienen valores de dicha relación DBO: DQO entre 0.4 y 0.7 entonces se tiene vertidos de naturaleza urbana, o clasificables como urbanos y tanto más biodegradables, conforme esa relación sea mayor estas aguas residuales, puede ser tratadas mediante tratamientos biológicos. Si esta relación es menor a 0.2, entonces hablamos de unos vertidos de naturaleza industrial, poco biodegradables y son convenientes los tratamientos físico-químicos (Heng Lee, A., Nikraz, H., 2015).

El programa HEC-RAS modela a este parámetro a partir del modelo de la DBO<sub>5</sub>, en este punto se consideró las relaciones existentes entre los dos parámetros y se obtuvo el promedio, dando como resultado una relación promedio de DQO:DBO de 1.788. Dicho valor se multiplica por las concentraciones de la DBO<sub>5</sub> en cada descarga para obtener las concentraciones de la DQO, el programa luego según los caudales calcula la concentración final en el río.

En la Figura 26, 27 y 28 se presentan los niveles de DQO para caudal mínimo, medio y máximo respectivamente.

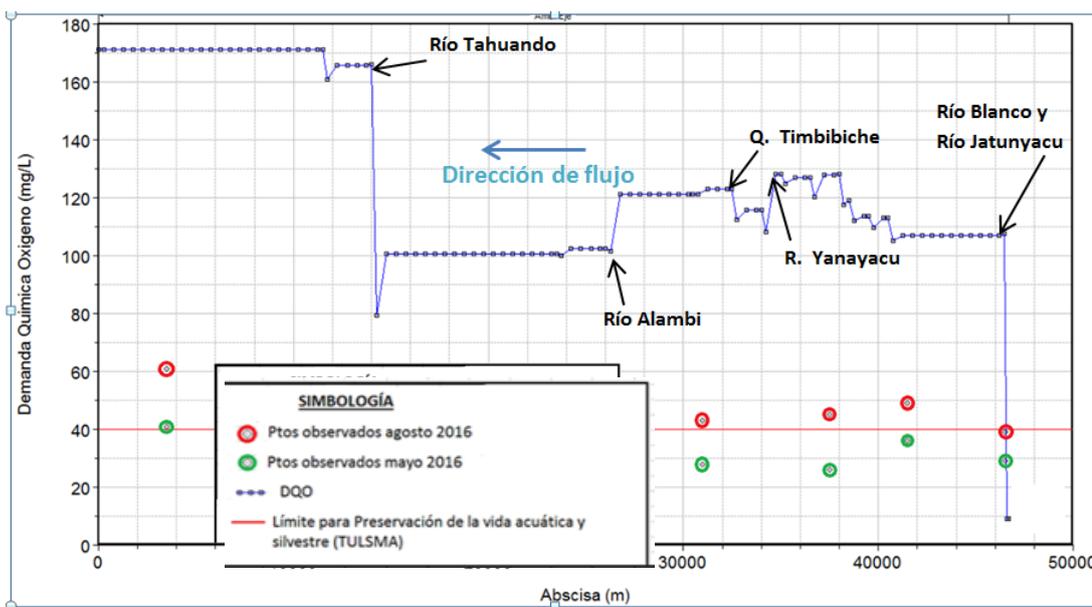


Figura 26. Gráfico de DQO HEC-RAS para caudal mínimo

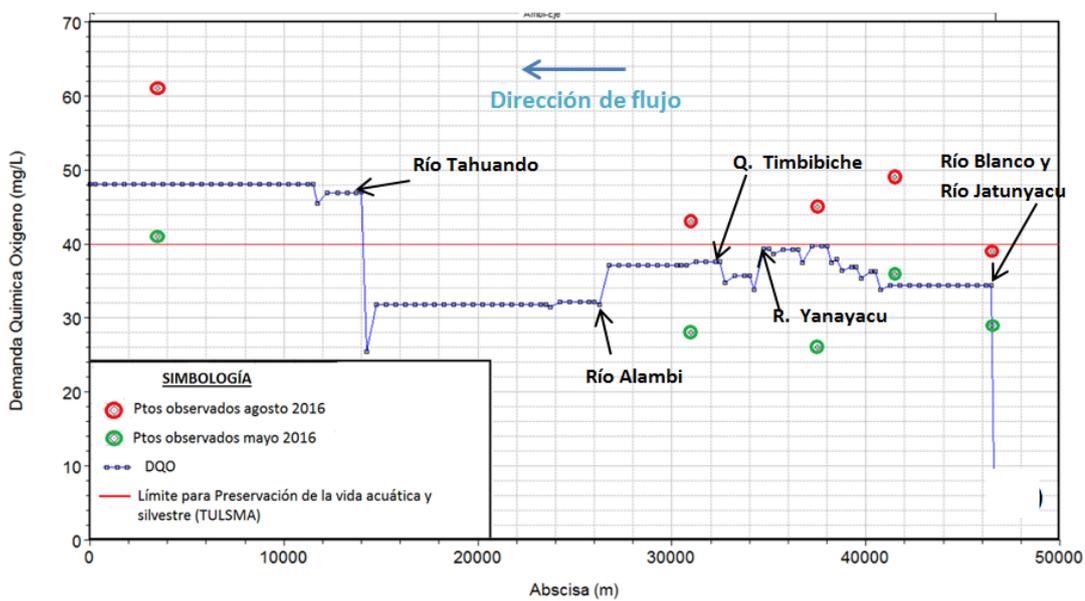
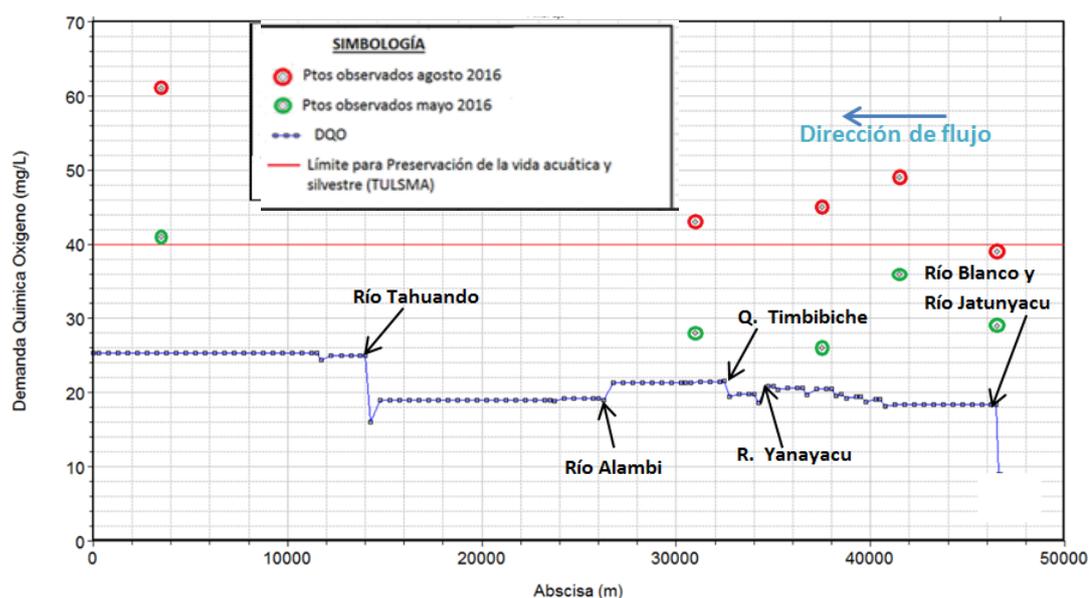


Figura 27. Gráfico de DQO HEC-RAS para caudal medio



**Figura 28. Gráfico de DQO HEC-RAS para caudal máximo**

Se observó que para caudal mínimo la concentración de DQO sobrepasa el límite establecido en la normativa, entonces el agua del río Ambi para épocas de sequía no es apta para ninguna actividad ya que pondría en riesgo la calidad de los cultivos y la salud de las personas y animales que directa o indirectamente ocupen esta agua.

Para caudal medio la concentración de DQO del río Ambi no es impedimento para ningún uso hasta antes de la desembocadura del río Tahuando, donde la calidad empeora por la desembocadura del caudal sanitario de Ibarra, alcanzado aproximadamente los 48 mg/l. Sin embargo la calidad a lo largo de todo el río se encuentra apenas por debajo del límite, por lo que cualquier descarga sanitaria o industrial no considerada en el modelo haría que la calidad ya no cumpla. En conclusión para caudal medio no sería aconsejable captar el agua ni que los seres humanos o animales se expongan al contacto con el río.

El caudal máximo es el único que garantiza la baja concentración de este parámetro y dio un escenario favorable para el uso sin presentar problemas, sin embargo, dicho escenario del río se presenta tan solo en meses de altas precipitaciones y no representa la calidad promedio del río en todo el año.

#### 4.4.5.5. Coliformes fecales

Los coliformes fecales son microorganismos con una estructura parecida a la de una bacteria común denominada *Escherichia coli* y se transmiten normalmente en el intestino del hombre y en el de otros animales. Las causas fundamentales de la contaminación bacteriana de las aguas continentales derivan de la actividad agrícola, el alto grado de urbanización y una actividad industrial que no cumpla con las regulaciones ambientales vigentes. Por lo tanto, en las inmediaciones de las grandes ciudades y en las áreas más industrializadas, los problemas de contaminación tienden a ser más agudos. Frecuentemente, las áreas más industrializadas son también las más densamente pobladas, factor que agrava el problema (Mora, J., Calvo, G., 2010).

El riesgo de contaminación tanto a nivel humano como ambiental hace necesario el control de la presencia de microorganismos en el agua. Determinar el tipo de microorganismos presentes y su concentración proporciona herramientas indispensables para conocer la calidad del agua y para la toma de decisiones en relación al control de vertidos, tratamiento de aguas y conservación de ecosistemas (CYTED, 2001).

Para el modelo se consideró que la concentración de coliformes fecales en el agua natural exenta de la afectación de las descargas sanitarias fue de 100 NMP/100 ml (Fitchner Hidroestudios, 2014).

Los valores de concentración de los puntos muestreados tanto en mayo como en agosto y ensayados en laboratorio fueron medidos en unidades de UFC/100ml, el programa calcula en NMP/100ml, por esta razón los valores medidos no aparecen en las gráficas, sin embargo sirvieron para comprobar el aumento o disminución de la concentración fecal a lo largo de río según el caudal analizado.

La norma establece un límite de 1000 NMP/100ml en el agua para uso en riego agrícola y uso pecuario, 200 NMP/100ml para su uso en recreación con contacto primario.

En la Figura 29,30 y 31 se presentan las concentraciones de coliformes fecales para caudal mínimo, medio y máximo respectivamente.

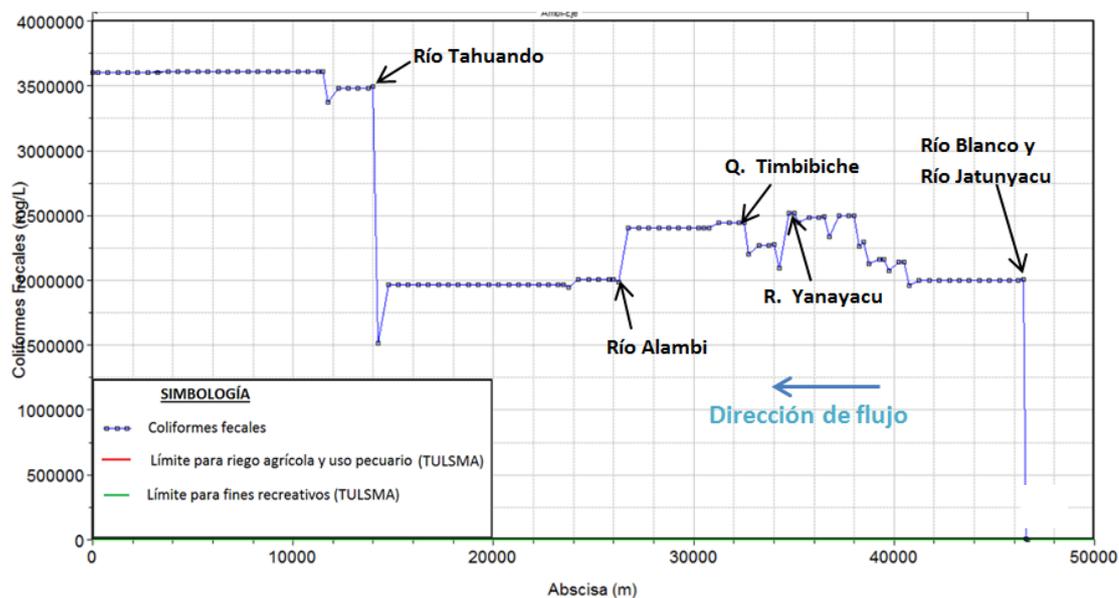


Figura 29. Gráfico de Coliformes Fecales HEC-RAS para caudal mínimo

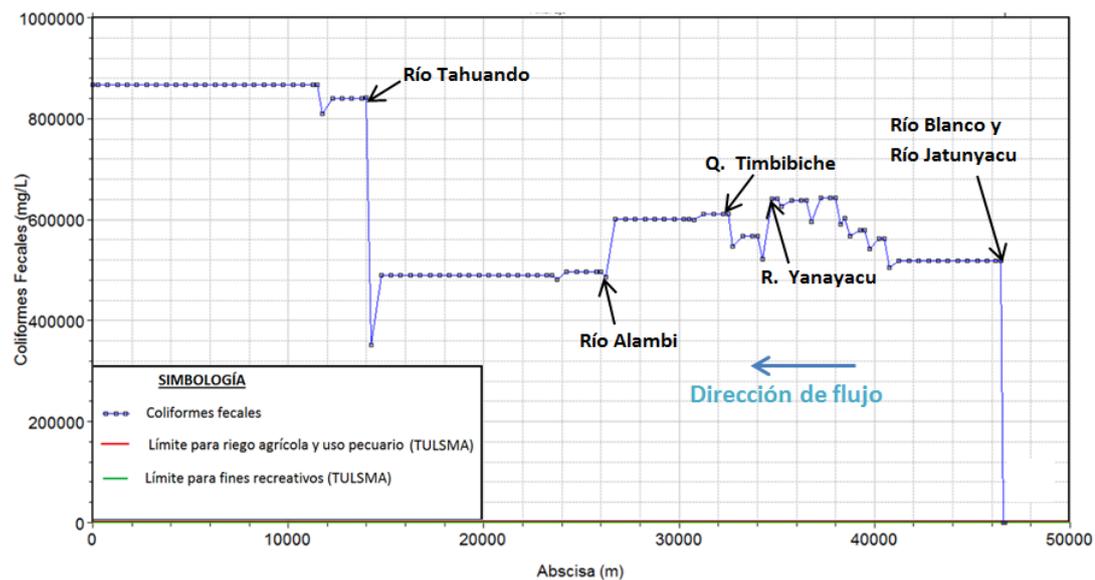
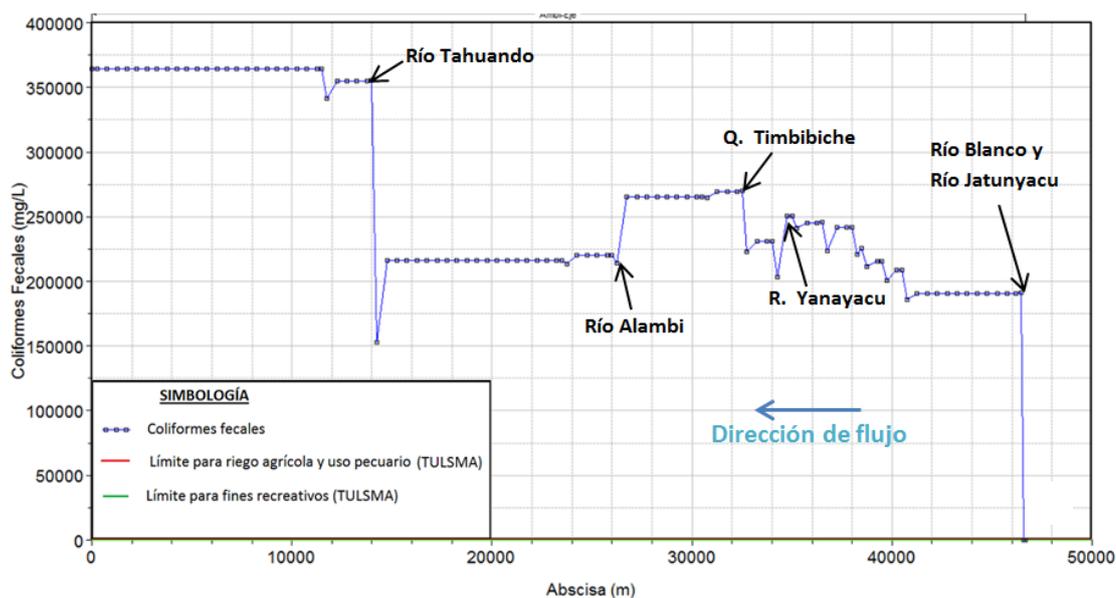


Figura 30. Gráfico de Coliformes Fecales HEC-RAS para caudal medio



**Figura 31. Gráfico de Coliformes Fecales HEC-RAS para caudal máximo**

Este parámetro sin duda es el más crítico y limitante de los usos del agua del río Ambi, ya que los valores permitidos por la norma son iguales a los establecidos para agua de consumo humano, es decir, que para que se cumpla este parámetro el agua debe ser totalmente potable.

Se observó que para caudales mínimo, medio y máximo los niveles de concentración son muy elevados y esto se debe principalmente a las descargas de las grandes poblaciones que desembocan sus aguas servidas al río Ambi (Almeida, 2014).

El escenario más favorable es para caudal máximo debido a que las precipitaciones son mayores y disminuyen la concentración de las bacterias en el agua, lo contrario sucede para caudal mínimo que presenta valores críticos de concentración debido a la baja precipitación que no ayuda a la disolución de la población bacteriana presente en el agua (CYTED, 2001).

El valor que se podría considerar promedio en todo el año es de aproximadamente 600.000 NMP/100ml, lo que significaría que para poder darle uso en actividades como riego y recreación se debería remover la concentración de coliformes fecales en un 99.9%.

#### 4.4.5.6.Nitratos

El ion nitrato es un anión inorgánico de origen natural que forma parte del ciclo del nitrógeno en donde los desechos que contienen nitrógeno orgánico se descomponen en el suelo o en el agua por acción de los microorganismos para formar amoníaco el cual se oxida para formar iones nitritos y estos a su vez formar nitratos (Albert, L. , 2004)

Existen dos tipos de contaminación por nitratos claramente definidos, la primera es la contaminación puntual ligada generalmente a actividades de origen industrial y urbano vertidos de aguas residuales, y por otra, una contaminación difusa, originada fundamentalmente por las actividades agrícolas. Esta contaminación se produce, principalmente, por un exceso en la fertilización de los cultivos y por la inadecuada gestión de los residuos procedentes de las explotaciones ganaderas (Martinez A. , 1992).

El contenido de nitratos en el agua residual proviene de la oxidación del nitrógeno amonio presente en el agua, la cantidad de nitratos que produce un habitante por día es de alrededor de 5g por lo que la consideración de la contaminación puntual es tan importante como la contaminación difusa (Fitchner Hidroestudios, 2014).

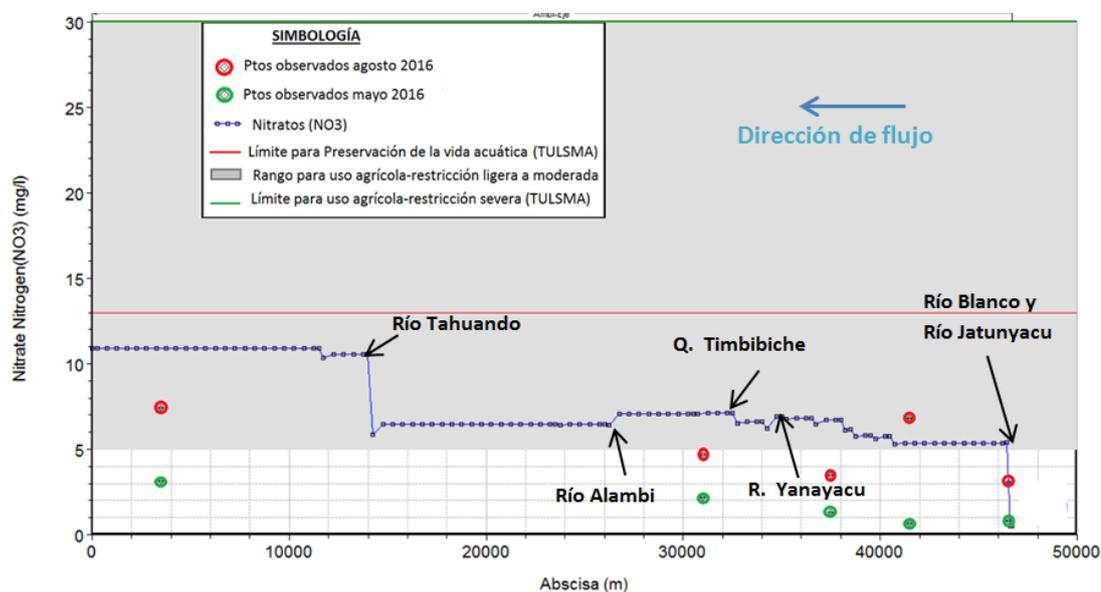
El modelo en HEC-RAS no considera la contaminación difusa, la misma que cada vez obtiene mayor protagonismo en la degradación de los recursos hídricos y es una fuente relevante de nitratos en el agua. Para corregir la carga contaminante en el modelo se tomó en cuenta los valores obtenidos en laboratorio de los muestreos realizados para poder calibrar las concentraciones obtenidas en el programa.

La norma ecuatoriana TULSMA 2015 establece límites en la concentración de contenidos de nitratos, para preservación de la vida acuática establece como límite 13 mg/l, mientras que para uso agrícola la normativa considera una restricción de ligera a moderada para concentraciones entre 5 y 30 mg/l mientras que se considera un daño severo en aguas con concentraciones superiores a los 30 mg/l. Finalmente, para uso pecuario el límite es de 50 mg/l. (MAE, 2015).

La concentración de nitratos en aguas superficiales normalmente es baja (0-18 mg/l), pero puede llegar a alcanzar elevados niveles como consecuencia de las prácticas agrícolas o residuos urbanos y ganaderos o por la aportación de aguas subterráneas ricas en nitratos (Fundación Ibérica para la Seguridad Alimentaria, 2001).

La contaminación por nitratos en aguas superficiales, puede afectar al medio natural, produciendo el fenómeno denominado eutrofización de las aguas. La acumulación de excesos de nitratos en éstas, como elemento fertilizante, provoca un crecimiento desmesurado de algas y plantas acuáticas, cuya descomposición da lugar a un excesivo consumo del oxígeno disuelto en el agua, que trae consigo un aumento de los procesos de descomposición anaeróbica y así un incremento de la turbidez de la misma (Fernandez, M., Soria, A., 2011).

En la Figura 32, 33 y 34 se presentan las concentraciones de nitratos para caudal mínimo, medio y máximo respectivamente.



**Figura 32. Gráfico de NO<sub>3</sub> HEC-RAS para caudal mínimo**

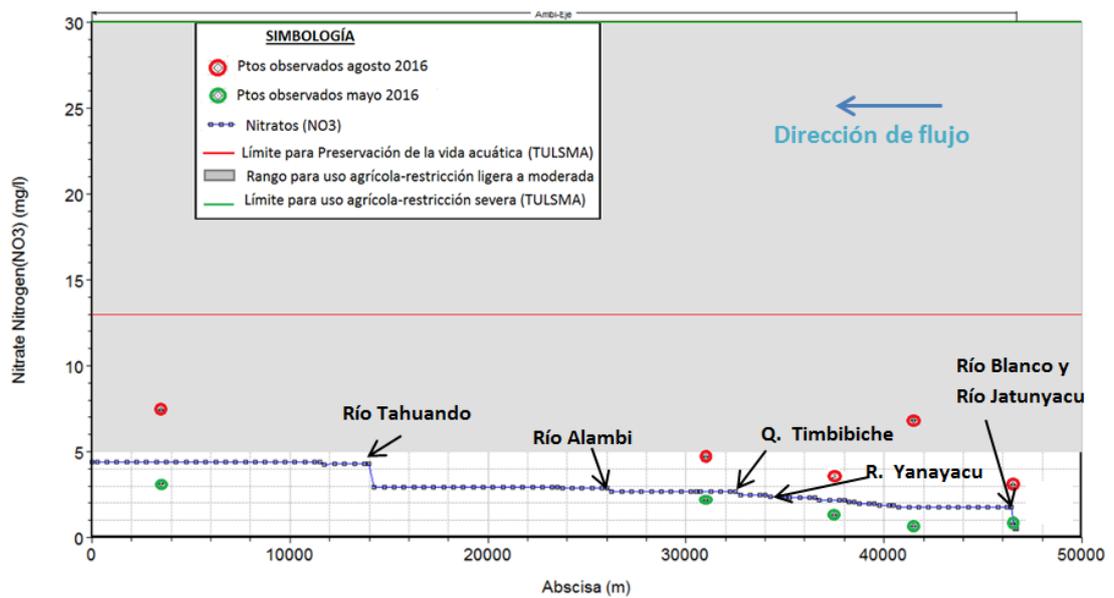


Figura 33. Gráfico de NO<sub>3</sub> HEC-RAS para caudal medio

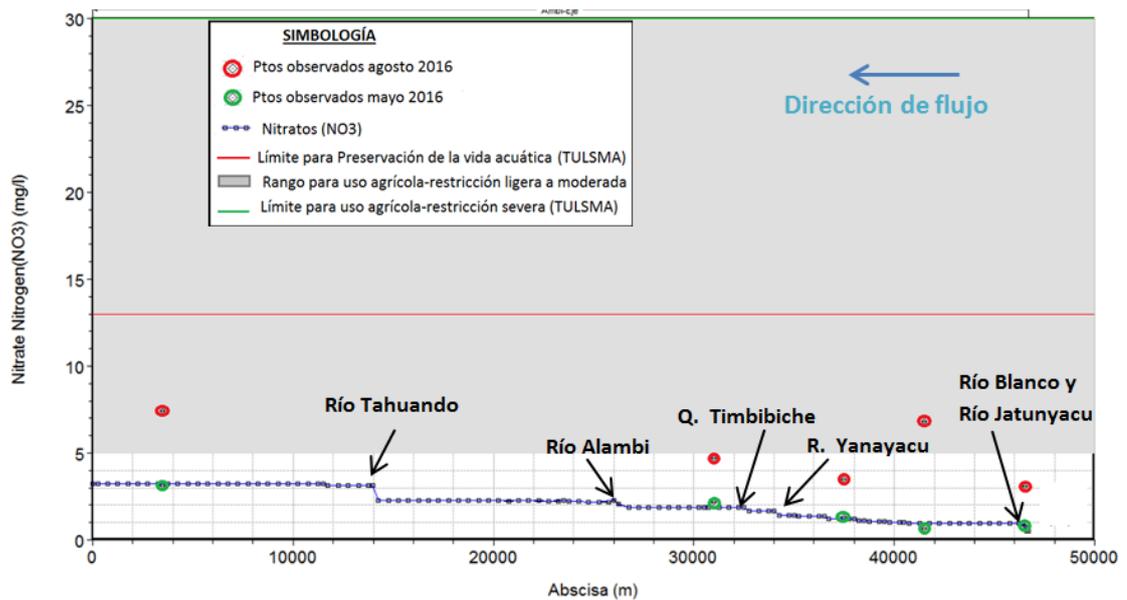


Figura 34. Gráfico de NO<sub>3</sub> HEC-RAS para caudal máximo

Los resultados mostraron que las mayores concentraciones de nitratos en el agua correspondieron al caudal mínimo, escenario que podría considerarse como el más desfavorable, sin embargo en el caso del río Ambi aun con este caudal las concentraciones no exceden los límites permisibles dados en la norma. Algunos cultivos intolerantes a absorber nitratos podrían verse afectados, es por esto que se da

una restricción ligera de uso del agua del río Ambi para riego cuando el caudal en el río es mínimo, situación que no se presenta normalmente en todo el año.

Para caudales medio y máximo no se presentó ningún inconveniente en la concentración de nitratos, permitiéndose su uso en toda actividad. La agro industria y la población creciente en la zona puede provocar el aumento de nitratos en el agua deteriorando la calidad que se encuentra en los mantos freáticos, y al ser extraída tanto para consumo agrícola y ganadero, va a resultar perjudicial (Martínez, F., Ojeda, D., Hernández, O., Martínez, J., De la O, G. , 2011).

#### **4.4.5.7.Fosfatos**

Los compuestos del fósforo son nutrientes de las plantas y conducen al crecimiento de algas en las aguas superficiales. Dependiendo de la concentración de fosfato existente en el agua, puede producirse la eutrofización. Tan sólo 1 g de fosfato-fósforo ( $\text{PO}_4\text{-P}$ ) provoca el crecimiento de hasta 100 g de algas. Cuando estas algas mueren, los procesos de descomposición dan como resultado una demanda de oxígeno de alrededor de 150 g. Los compuestos de fosfato que se encuentran en las aguas residuales o se vierten directamente a las aguas superficiales provienen de fertilizantes eliminados del suelo por el agua o viento, excreciones humanas y animales, detergentes y productos de limpieza (Putz, 2008).

Un examen de diversos estudios manifiesta que la relación  $\text{P/DBO}_5$  varía del 3,2% al 6,6 %, en el caso de aguas residuales con predominio de urbanas (ARU). Se estima que por lo menos el 85 % del fósforo vertido y aportado al medio ambiente procede de la red de colectores de las ARU, suponiendo un nivel de vida adecuado con instalaciones sanitarias completas. Esta fracción proviene de los desechos humanos y de los detergentes. La agricultura es la causante del 15% restante, siendo su influencia relativamente pequeña, debido a que, al contrario que en el caso de los nitratos, el fósforo se absorbe y se almacena bien en el suelo. En el agua, los fosfatos pueden representar del 15 % al 35% de los fósforo total (Ronzano, E., Dapena, J.L., 2010).

Se consideró para el presente modelo una carga aportante de 2g por habitante y por día de fosfatos, correspondiente a un 50% de la carga aportante de fósforo total por cada habitante según lo señalado en Ronzano y Dapena (2010).

Al igual que para los nitratos, los aportes de fosfatos al río Ambi, se debieron a contribuciones puntuales debido a las aguas servidas y a contribuciones difusas provenientes de los fertilizantes en el suelo. Para considerar ambas fuentes de aporte de fosfatos, se utilizó los datos obtenidos en laboratorio para ajustar el modelo ya que el programa no considera la contaminación difusa, sino solo la puntual.

La norma ambiental ecuatoriana TULSMA, no establece ningún límite mínimo o máximo de fósforo orgánico o fosfatos presentes en un río, es decir no limita el uso del agua para ninguna actividad. Sin embargo, altas concentraciones de este nutriente puede ocasionar severos problemas ambientales comenzando por ayudar a la eutrofización de las aguas del río produciendo la muerte de peces y demás flora y fauna acuática (Illana, 2014).

En la Figura 24 se presenta la concentración de fosfatos para caudal mínimo, medio y máximo respectivamente.

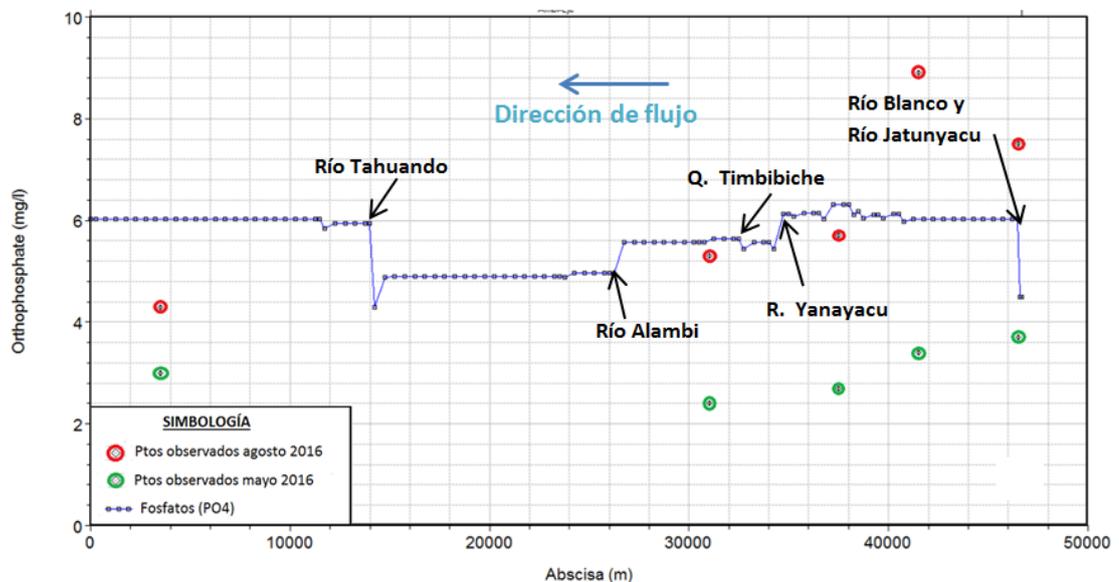


Figura 35. Gráfico de PO<sub>4</sub> HEC-RAS para caudal mínimo

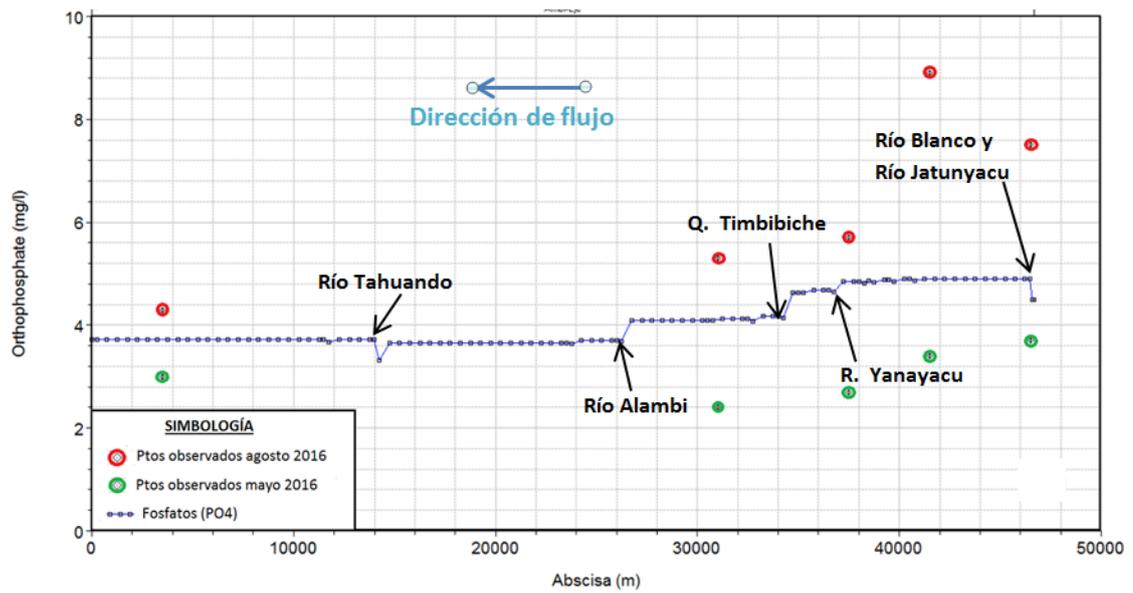


Figura 36. Gráfico de PO<sub>4</sub> HEC-RAS para caudal medio

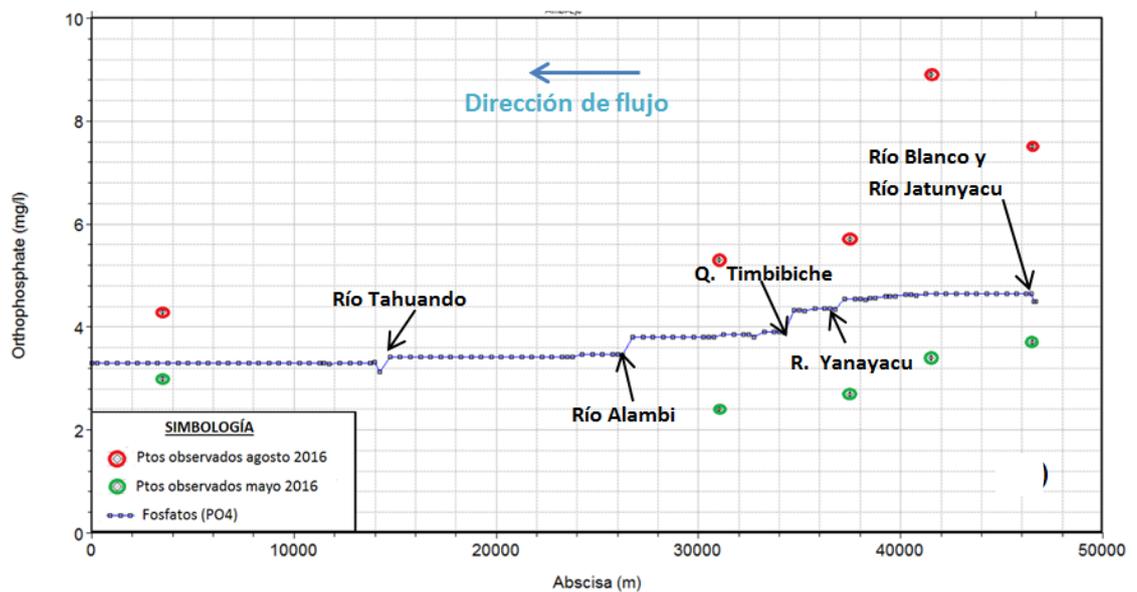


Figura 37. Gráfico de PO<sub>4</sub> HEC-RAS para caudal máximo

Conforme el agua sigue su recorrido en el río, la concentración de fosfatos se comportó de manera contraria a la de los otros parámetros, es decir se observó un leve decrecimiento en los niveles de fosfato, esto se debió probablemente a que según Ronzano y Dapena (2010), existe una compensación entre la cantidad de fosfatos que absorbe el suelo y el aporte de fosfatos proveniente de las quebradas que

traen los aportes puntuales y difusos que desembocan en el río Ambi. Sin embargo, existe una relación inversa entre el caudal y la concentración de fosfatos. Para caudal mínimo los fosfatos presentan niveles de concentración más altos y para caudal máximo los más bajos.

De acuerdo a los límites establecidos por Sharpley y Withers (1994), las aguas con concentraciones de fósforo disuelto mayores a 0.05 mg/l presentan problemas de eutrofización lo cual puede provocar crecimiento excesivo de algas y materia orgánica que no se descompone totalmente y provoca emanaciones de gas carbónico, sulfuro y sales amoniacales. El incremento de fósforo se debe a la agricultura intensiva, producción de ganado y a los lodos provenientes de las aguas residuales. Altas concentraciones de este parámetro indican contaminación de aguas por descargas urbanas e industriales (Carrera, D., Ortega, H., Ramírez, J., Ramírez, C., Trejo, C., Becerril, A., 2011).

#### **4.4.6. Predicción de la calidad futura del río Ambi**

Una vez realizado el modelo de calidad para el año 2016 y comprobado que los resultados del mismo se ajustaron a los datos obtenidos en laboratorio, el programa HEC-RAS permitió predecir la calidad futura del río considerando el aumento de la población y por lo tanto el caudal sanitario. El modelo considera el mismo caudal hidráulico y no considera ninguna concesión o tratamiento futuro que se pueda presentar a lo largo del río Ambi y de sus afluentes.

El objetivo de predecir la situación futura del río fue observar el incremento de las concentraciones de los parámetros analizados y verificar su cumplimiento frente a lo establecido en la norma ambiental, con esto, se pudo recomendar un plan de manejo en la cuenca y específicamente un tratamiento del agua del río Ambi para aprovechar el recurso en actividades especialmente agrícolas y en la preservación del medio ambiente.

En la Tabla 38, se presenta un resumen de los resultados de los valores de los parámetros analizados en HEC-RAS para los años 2020, 2030 y 2040.

**Tabla 38.**  
**Predicción de las concentraciones futuras del río Ambi**

Año	Parámetro	Temp °C	OD (mg/l)	DBO (mg/l)	DQO (mg/l)	CF (NMP/100ml)	NO <sub>3</sub> (mg/l)	PO <sub>4</sub> (mg/l)	
2016	Qmin	v. min	16.15	5.05	52.67	99.9	1948157	5.29	4.30
		v.max	21.67	6.33	93.68	171.1	3607404	10.90	6.31
		v.prom	20.5	5.83	67.82	127.9	2562952	7.64	5.65
	Q med	v. min	16.02	5.90	16.86	31.51	481539	1.74	3.31
		v.max	20.49	6.83	26.38	48.05	866351	4.40	4.90
		v.prom	18.73	6.43	20.65	38.58	635687	3.01	4.10
	Q max	v. min	16.01	6.04	9.54	18.11	185794	0.96	3.14
		v.max	19.7	6.94	13.97	25.39	364529	3.22	4.65
		v.prom	18.05	6.55	11.48	21.2	263727	2.11	3.80
2020	Qmin	v. min	16.26	4.94	60.87	115.7	2283151	6.21	4.52
		v.max	21.66	6.20	102.42	187.4	3963486	11.74	6.60
		v.prom	20.48	5.71	76.86	145.3	2931686	8.52	5.95
	Q med	v. min	16.05	5.88	17.63	33.04	515101	1.78	3.33
		v.max	20.5	6.82	27.81	50.75	927032	4.55	4.92
		v.prom	18.74	6.42	21.56	40.35	674715	3.10	4.13
	Q max	v. min	16.03	5.64	10.33	19.69	217979	1.05	3.16
		v.max	19.7	6.93	14.86	27.03	400564	3.30	4.67
		v.prom	18.06	6.54	12.29	22.76	296836	2.19	3.82
2030	Qmin	v. min	16.22	4.65	83.54	159.3	3209827	8.16	5.12
		v.max	21.65	5.85	126.03	231.5	4926580	14.02	7.47
		v.prom	20.43	5.39	101.43	192.7	3935387	10.94	6.75
	Q med	v. min	16.05	5.80	22.30	42.04	705454	2.37	3.44
		v.max	20.49	6.74	33.59	61.52	1162224	5.10	5.11
		v.prom	18.72	6.35	27.20	51.21	904400	3.66	4.31
	Q max	v. min	16.02	6.01	12.68	24.1	314032	1.28	3.21
		v.max	19.7	6.89	17.48	31.89	507031	3.55	4.75
		v.prom	18.05	6.51	14.70	27.38	395032	2.43	3.90
2040	Qmin	v. min	16.24	4.34	107.27	205	4179751	9.96	5.77
		v.max	21.62	5.48	150.73	277.5	5933279	16.40	8.37
		v.prom	20.36	5.06	127.16	242.4	4986534	13.46	7.60
	Q med	v. min	16.05	5.72	27.84	52.73	931712	3.06	3.58
		v.max	20.47	6.64	40.50	74.43	1443349	5.76	5.35
		v.prom	18.71	6.26	33.85	64.03	1175698	4.31	4.53
	Q max	v. min	16.02	5.97	15.31	28.6	419884	1.56	3.26
		v.max	19.7	6.85	20.56	37.6	632254	3.85	4.84
		v.prom	18.05	6.47	17.53	32.81	510165	2.70	3.99

Los valores de los parámetros especialmente los orgánicos condicionan la calidad del río en el futuro, ya que sus niveles de concentración empiezan a superar

los límites de la norma desde el año 2020 considerando el caudal medio del río. La DBO<sub>5</sub>, DQO y coliformes fecales fueron los parámetros de mayor afectación debido a que provienen de los caudales sanitarios que aumentan considerablemente por el crecimiento poblacional.

Por otra parte los parámetros inorgánicos no presentaron aumentos significativos ya que no solo dependen de la población sino también de su contenido en el suelo y de la contaminación difusa. Estos parámetros con el caudal medio no condicionan el uso del agua en ninguna actividad en ningún año hasta el 2040, sin embargo, se recalca el problema de la eutrofización producida por el contenido de fosfatos lo cual puede ser peligroso para los suelos y algunos cultivos. Para caudales mínimos del río la restricción de los usos se va tornando cada vez más severa, por lo que a partir del año 2030 se debe empezar a disminuir las concentraciones especialmente en épocas de precipitaciones bajas.

La temperatura del río está condicionada por carga orgánica y factores climáticos que el programa no predice, debido a esto los valores de temperatura predichos no se consideraron reales, sin embargo no es un parámetro que limite el uso del agua.

#### **4.5. Modelación Hidrológica con HEC-HMS**

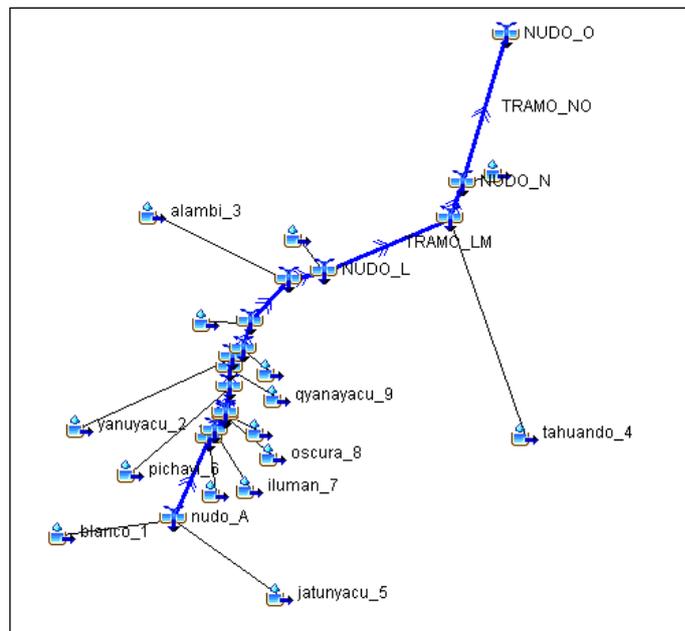
##### **4.5.1. Morfometría de las subcuencas**

###### **4.5.1.1. Modelo físico**

El modelo de la cuenca representa a la cuenca física, en donde se pudo desarrollar el modelo incluyendo y conectando todos los elementos hidrológicos que conforman la Cuenca del río Ambi, cada uno de estos elementos usan modelos matemáticos que permitieron describir y modelar los procesos físicos que se producen en la cuenca. (Nania, 2007).

Es importante que una vez creados los elementos hidrológicos como las subcuencas los nudos y los cauces estos sean conectados debidamente, así las subcuencas fueron conectadas a los nudos en donde descargan su caudal en el cauce

principal del río Ambi, los nudos fueron conectados con el tramo o cauce aguas abajo y a su vez los cauces fueron conectados con el nudo siguiente aguas abajo, quedando así definido el modelo físico de la cuenca tal como se muestra en la Figura 38.



**Figura 38. Modelo físico de la cuenca del río Ambi en HEC-HMS**

#### 4.5.1.2. Tiempo de concentración

Para analizar la respuesta de la cuenca, en forma de caudales, ante una precipitación determinada el parámetro más significativo es el tiempo de concentración, este parámetro representa el tiempo que tardaría una gota de agua, caída en el punto de la cuenca hidrológicamente más alejado de la sección de salida, en recorrer el camino que la separaría de la mencionada sección, Para su cálculo se utilizan datos morfológicos y de relieve, como son la diferencia máxima de cotas y la longitud del cauce principal que drena la cuenca (Robedro, 2014).

La determinación del tiempo de concentración se realiza con ayuda de tablas o ecuaciones empíricas, al ser las formulas empíricas existe una variación entre autores de las mismas por lo que para el cálculo de su valor se determinó un valor promedio entre las ecuaciones propuestas por Kirpich, California y Ven Te Chow, los mismos que se detallan en la Tabla 39.

**Tabla 39.**  
**Tiempo de concentración (Tc) subcuencas río Ambi**

Nombre Subcuenca	Long Cauce (Km)	Cota Max	Cota Min	California		Ven Te Chow		Kirpic h	Prom Tc
				H	Tc	% Yr	Tc		
Río Blanco	19.37	3445.41	2466.4	979.00	125.5	5.05	159.4	143.88	<b>142.95</b>
Río Yanayacu	18.47	4099.28	2211.	1888.2	92.26	10.2	123.4	105.76	<b>107.16</b>
Río Alambi-Cariyacu	19.24	3975.44	2047.2	1928.2	95.94	10.0	127.5	109.98	<b>111.15</b>
Río Tahuando	39.43	3772.85	1746.4	2026.4	215.5	5.14	249.8	247.06	<b>237.49</b>
Río Jatunyacu	21.08	3467.89	2466.4	1001.4	137.1	4.75	171.6	157.21	<b>155.32</b>
Río Pichavi	15.89	3018.64	2271.0	747.64	110.7	4.70	143.7	126.98	<b>127.15</b>
Quebrada Iluman	10.27	4343.81	2324.4	2019.3	45.62	19.6	68.75	52.29	<b>55.55</b>
Quebrada Oscura	7.77	3717.74	2304.7	1413.0	37.94	18.1	58.98	43.49	<b>46.80</b>
Quebrada Yanuyacu	7.95	3070.77	2230.7	840.00	47.59	10.5	71.21	54.55	<b>57.78</b>
Quebrada Jijón	4.18	2571.77	2334.8	236.90	36.82	5.67	57.53	42.21	<b>45.52</b>
Quebrada Artizón	6.01	3152.78	2301.0	851.78	34.29	14.1	54.23	39.31	<b>42.61</b>
Quebrada Colimbuela	5.32	2621.08	2134.7	486.35	36.95	9.14	57.71	42.36	<b>45.67</b>
Quebrada Timbibiche	8.71	3381.89	2181.8	1200.0	46.11	13.7	69.37	52.86	<b>56.12</b>
Quebrada Coñaquí	7.54	2554.58	1964.4	590.17	51.27	7.83	75.76	58.78	<b>61.94</b>
Quebrada La Virgen	3.53	2618.14	1686.2	931.91	17.91	26.3	31.61	20.54	<b>23.35</b>
Cuenca río Ambi	68.49	3481.48	1480.0	2001.4	409.7	2.92	426.2	469.73	<b>435.25</b>

## 4.5.2. Información acerca de la precipitación histórica o de diseño

### 4.5.2.1. Curvas IDF

Las curvas IDF son aquellas que resultan de unir los puntos representativos de la intensidad media en intervalos de diferente duración y correspondiente todos ellos a un mismo período de retorno (Témez, 1978). El Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología proporciona ecuaciones para el cálculo de estas curvas para una serie de estaciones meteorológicas alrededor del país, en el año 2015 se realizó una actualización del estudio de lluvias intensas publicado en 1999, dicho estudio incorpora nuevas estaciones meteorológicas y aumenta la serie de datos de los pluviógrafo con los que fueron elaborados las ecuaciones. (INAMHI, 2015).

De la zona del estudio INAMHI cuenta con la información de la ecuación para las estaciones M105 y M107, la estación M105 (Otavalo) cuenta con serie de datos de

1977 al 2010, mientras que los datos de la estación M107 son de 1979-2010, según la Organización Meteorológica Mundial (OMM) se recomienda una serie mínima de 30 años para una mayor confiabilidad de los resultados por lo que se pueden considerar confiable la ecuación presentada.

La ecuación del INAMHI es dividida en dos partes según el tiempo de duración para las estaciones señalada las ecuaciones propuestas son las siguientes:

#### Estación M105

$$I_{TR} = \frac{123.05 * Id_{TR}}{t^{0.471}} \quad 5 \text{ min} < 49.9 \text{ min}$$

$$I_{TR} = \frac{597.42 * Id_{TR}}{t^{0.875}} \quad 49.9 \text{ min} < 1440 \text{ min}$$

#### Estación M107

$$I_{TR} = \frac{75.787 * Id_{TR}}{t^{0.417}} \quad 5 \text{ min} < 71.3 \text{ min}$$

$$I_{TR} = \frac{447.08 * Id_{TR}}{t^{0.833}} \quad 71.3 \text{ min} < 1440 \text{ min}$$

$Id_{TR}$  es la intensidad máxima en 24 horas según el periodo de retorno y  $t$  es el tiempo de duración de la lluvia en minutos, para determinar el  $Id_{TR}$  el INAMHI tiene calculado la intensidad máxima en 24 horas para distintos períodos de retorno los mismos que se presentan en la Tabla 40.

**Tabla 40.**  
**Intensidad máxima en 24 horas , estación M105 y M107**

Código	Estación	Coordenadas		altitud	Tr					
		Latitud	longitud		2	5	10	25	50	100
M105	Otavaló	805038.79	10026311.88	2550	1.51	1.84	2.03	2.24	2.39	2.53
M107	CAHUASQUI	810444.33	10057329.08	2335	1.37	2.07	2.54	3.12	3.56	3.99

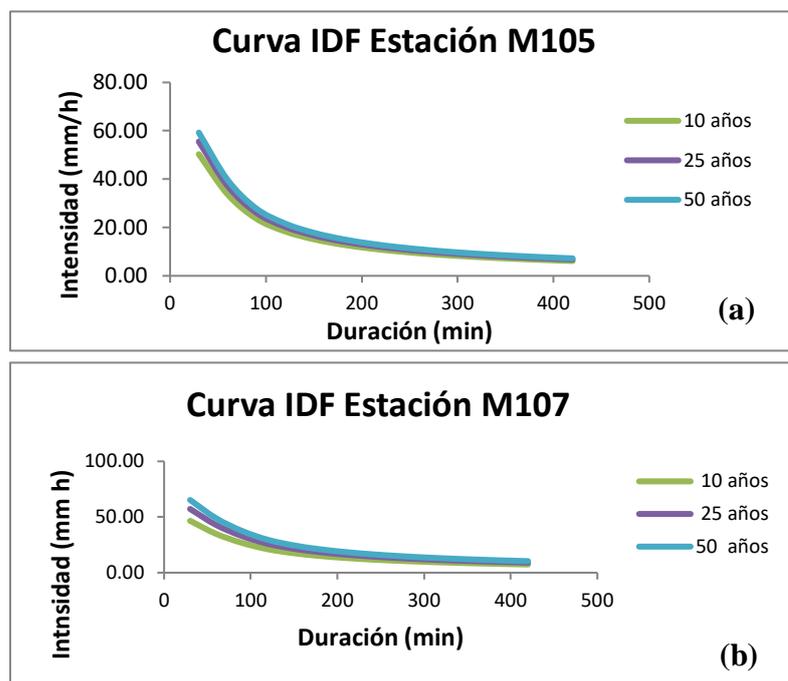
Fuente: (INAMHI , 2015)

Se calcularon los valores para distintos tiempos de retorno y tiempos de duración de la lluvia los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 41 y las curvas IDF se

presentan en la Figura 39, el tiempo de duración de las curvas IDF se los realizó de acuerdo al tiempo de concentración de la cuenca.

**Tabla 41.**  
**Intensidades –Tiempo de duración Estación M105-M107**

Estación M105														
Tr	Tiempo de duración (min)													
	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360	390	420
10	50.3	33.7	23.6	18.4	15.1	12.9	11.3	10	9.04	8.25	7.59	7.03	6.56	6.14
25	55.5	37.2	26.1	20.3	16.7	14.2	12.4	11.1	9.98	9.1	8.37	7.76	7.23	6.78
50	59.3	39.7	27.8	21.6	17.8	15.2	13.3	11.8	10.6	9.71	8.93	8.28	7.72	7.23
Estación M107 (b)														
Tr	Tiempo de duración (min)													
	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360	390	420
10	46.6	34.9	26.8	21.1	17.5	15	13.2	11.8	10.7	9.81	9.06	8.43	7.89	7.41
25	57.3	42.9	32.9	25.9	21.5	18.4	16.2	14.5	13.2	12.1	11.1	10.4	9.69	9.11
50	65.3	48.9	37.5	29.5	24.5	21	18.5	16.6	15	13.8	12.7	11.8	11.1	10.4



**Figura 39. Curvas IDF a) Est. M 105 b) Est. M107**

Para las estaciones M001, M009 y M315 en las que el INAMHI no cuenta con las ecuaciones, por medio de la precipitación máxima en 24 horas se determinó la ecuación IDF, las mismas que se presentan a continuación:

**Estación M001**

$$I_{TR} = \frac{201.306 * T^{0.1814}}{t^{0.618}}$$

**Estación M009**

$$I_{TR} = \frac{136.0127 * T^{0.153}}{t^{0.618}}$$

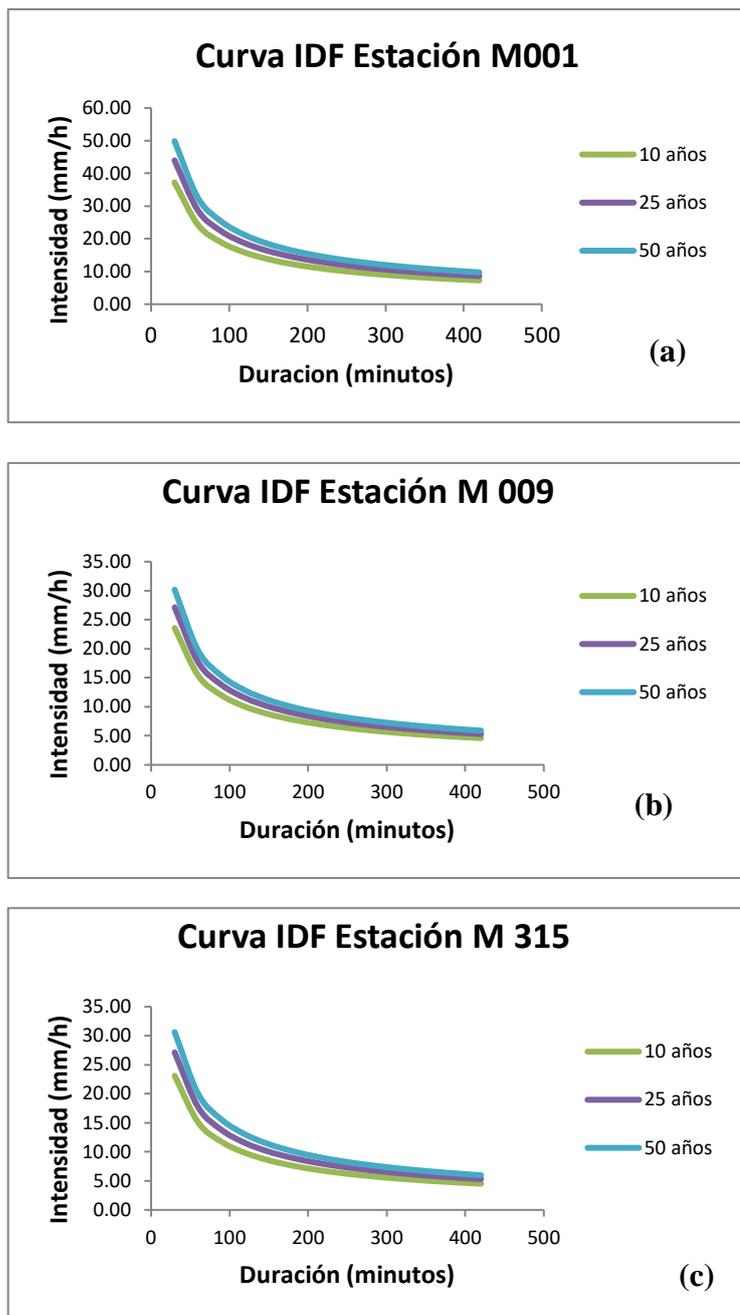
**Estación M315**

$$I_{TR} = \frac{126.707 * T^{0.175}}{t^{0.618}}$$

Remplazando dichas ecuaciones se obtuvieron las intensidades para las curvas IDF las mismas que se presentan en la Tabla 42. Las curvas IDF para dichas estaciones se presentan en la Figura 40.

**Tabla 42.**  
**Intensidades –Tiempo de duración Estación M001-M009-M315**

Tiempo de duración (min)														
Tr	Estación M001													
	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360	390	420
10	37.25	24.26	18.87	15.79	13.76	12.29	11.17	10.29	9.56	8.96	8.45	8	7.62	7.27
25	43.98	28.64	22.28	18.65	16.24	14.51	13.19	12.14	11.29	10.58	9.97	9.45	8.99	8.59
50	49.87	32.48	25.27	21.15	18.42	16.46	14.96	13.77	12.8	12	11.31	10.72	10.2	9.74
Estación M009														
Tr	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360	390	420
10	23.59	15.36	11.95	10	8.71	7.78	7.07	6.51	6.05	5.67	5.35	5.07	4.82	4.61
25	27.14	17.67	13.75	11.51	10.02	8.95	8.14	7.49	6.97	6.53	6.15	5.83	5.55	5.3
50	30.18	19.65	15.29	12.8	11.15	9.96	9.05	8.33	7.75	7.26	6.84	6.48	6.17	5.89
Estación M315														
Tr	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360	390	420
10	23.1	15.1	11.7	9.8	8.54	7.63	6.93	6.38	5.93	5.56	5.24	4.97	4.73	4.51
25	27.1	17.7	13.8	11.5	10	8.95	8.14	7.49	6.97	6.53	6.15	5.83	5.55	5.3
50	30.6	20	15.5	13	11.3	10.1	9.19	8.46	7.87	7.37	6.95	6.58	6.27	5.98



**Figura 40. Curva IDF a) Est. M001 b) Est. M 009 c) Est. M 315**

#### 4.5.2.2. Hietogramas

Los hietogramas de diseño son de mucha utilidad ya que para metodologías como las adoptadas en el programa HEC HMS no es suficiente conocer la precipitación máxima de la subcuenca en cierto periodo de retorno, sino que es necesario conocer

la evolución y distribución de la precipitación en un período de tiempo determinado (Sanchez, 2012).

Para el caso de la cuenca del río Ambi se desarrollaron los hietogramas de diseño para una duración igual al tiempo de concentración de la cuenca es decir para un tiempo de 7 horas con intervalos de 30 minutos. A partir de las curvas IDF obtenidas en el apartado anterior para las estaciones meteorológicas de la zona del proyecto, se calculó los hietogramas para los períodos de retorno de 10, 25 y 50 años los mismos que se observan en la Tabla 43. Así también, en la Figura 41 se presentan las gráficas de los hietogramas de precipitación de las estaciones consideradas.

**Tabla 43.**  
**Hietogramas de precipitación de las estaciones meteorológicas de la cuenca del río Ambi.**

t mi n	EST M001			EST M009			EST M105			EST M107			EST M315		
	Tr 10	Tr 25	Tr 50												
	P (mm)														
30	1.49	1.76	1.99	0.94	1.08	1.21	0.42	0.47	0.50	0.68	0.84	0.95	0.92	1.08	1.22
60	1.66	1.96	2.22	1.05	1.21	1.34	0.49	0.55	0.58	0.79	0.97	1.10	1.03	1.21	1.36
90	1.89	2.23	2.53	1.20	1.38	1.53	0.59	0.66	0.70	0.94	1.15	1.32	1.17	1.38	1.55
120	2.23	2.63	2.99	1.41	1.63	1.81	0.75	0.83	0.89	1.17	1.44	1.65	1.38	1.63	1.84
150	2.80	3.31	3.75	1.78	2.04	2.27	1.04	1.15	1.22	1.60	1.96	2.24	1.74	2.04	2.31
180	4.05	4.79	5.43	2.57	2.95	3.28	1.75	1.93	2.06	5.22	6.41	7.31	2.52	2.95	3.33
210	18.6	21.9 9	24.9 4	11.7 9	13.5 7	15.0 9	25.1 7	27.7 7	29.6 3	23.3 0	28.6 3	32.6 6	11.5 6	13.5 7	15.3 2
240	5.63	6.65	7.54	3.57	4.10	4.56	8.55	9.44	10.0 7	11.6 0	14.2 5	16.2 6	3.49	4.10	4.63
270	3.28	3.87	4.39	2.08	2.39	2.66	1.30	1.43	1.53	1.97	2.43	2.77	2.04	2.39	2.70
300	2.48	2.92	3.31	1.57	1.80	2.01	0.87	0.96	1.03	1.35	1.66	1.89	1.54	1.80	2.04
330	2.04	2.41	2.73	1.29	1.49	1.65	0.66	0.73	0.78	1.04	1.28	1.46	1.27	1.49	1.68
360	1.76	2.08	2.36	1.12	1.28	1.43	0.54	0.60	0.64	0.86	1.05	1.20	1.09	1.28	1.45
390	1.57	1.85	2.10	0.99	1.14	1.27	0.46	0.50	0.54	0.73	0.90	1.02	0.97	1.14	1.29
420	1.42	1.67	1.90	0.90	1.03	1.15	0.40	0.44	0.47	0.64	0.78	0.89	0.88	1.03	1.17

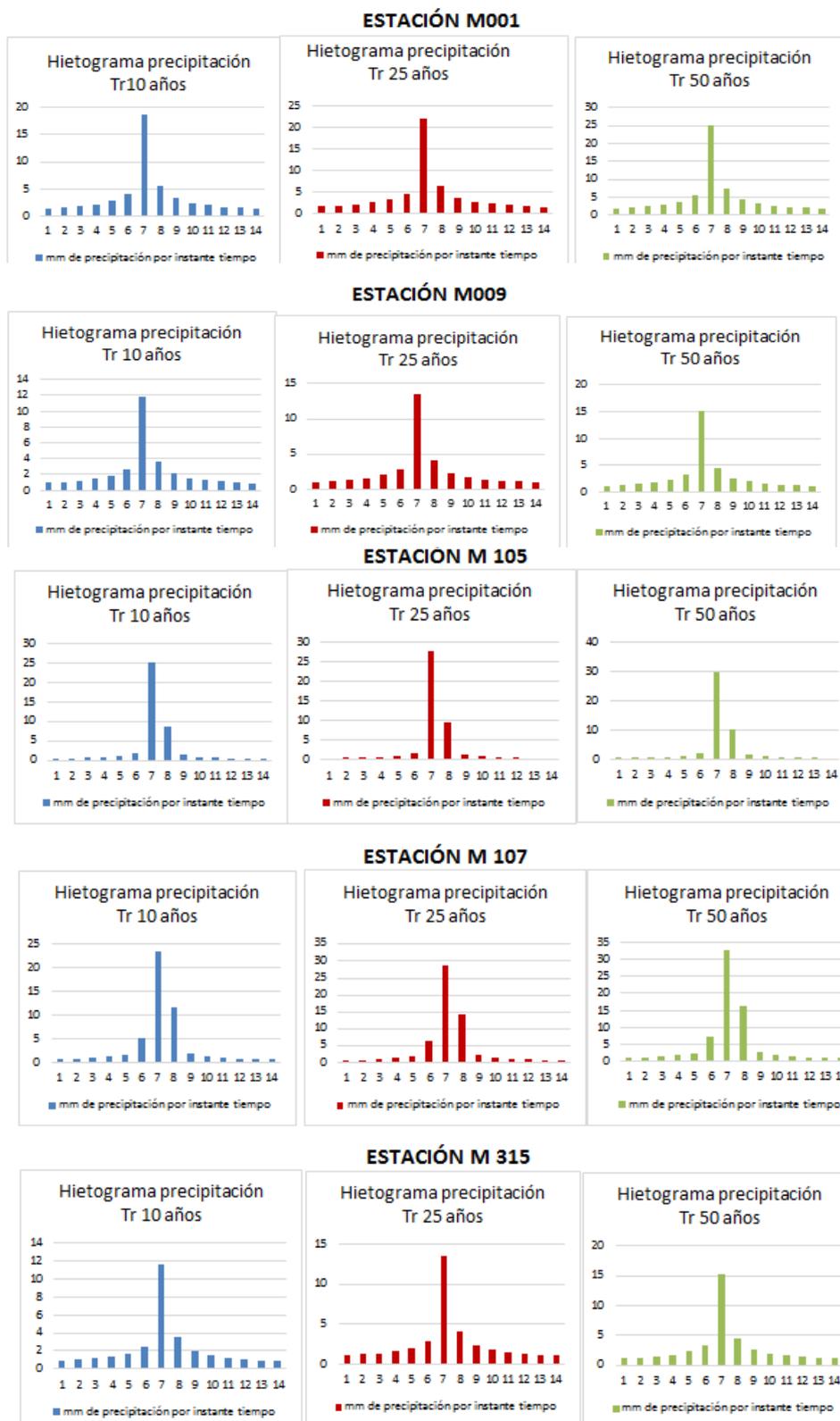
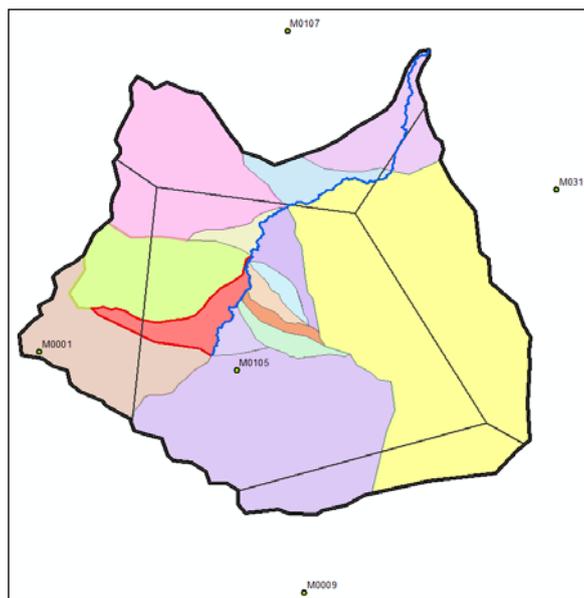


Figura 41. Hietogramas de las estaciones meteorológicas de la Cuenca del río Ambi.

Una vez obtenidos los hietogramas de diseño el software HEC-HMS requiere que se ingrese el porcentaje de las áreas de aporte de cada estación meteorológica para cada subcuenca, por lo que se utilizó el método de polígonos de Thiessen para determinar estos porcentajes, en la Figura 42 se presentan los polígonos para la cuenca del río Ambi y en la Tabla 44, los porcentajes de aporte de las estaciones para cada subcuenca.



**Figura 42. Polígonos de thiesen para la cuenca del rio Ambi.**

**Tabla 44.**  
**Porcentajes de aporte de las estaciones meteorológicas**

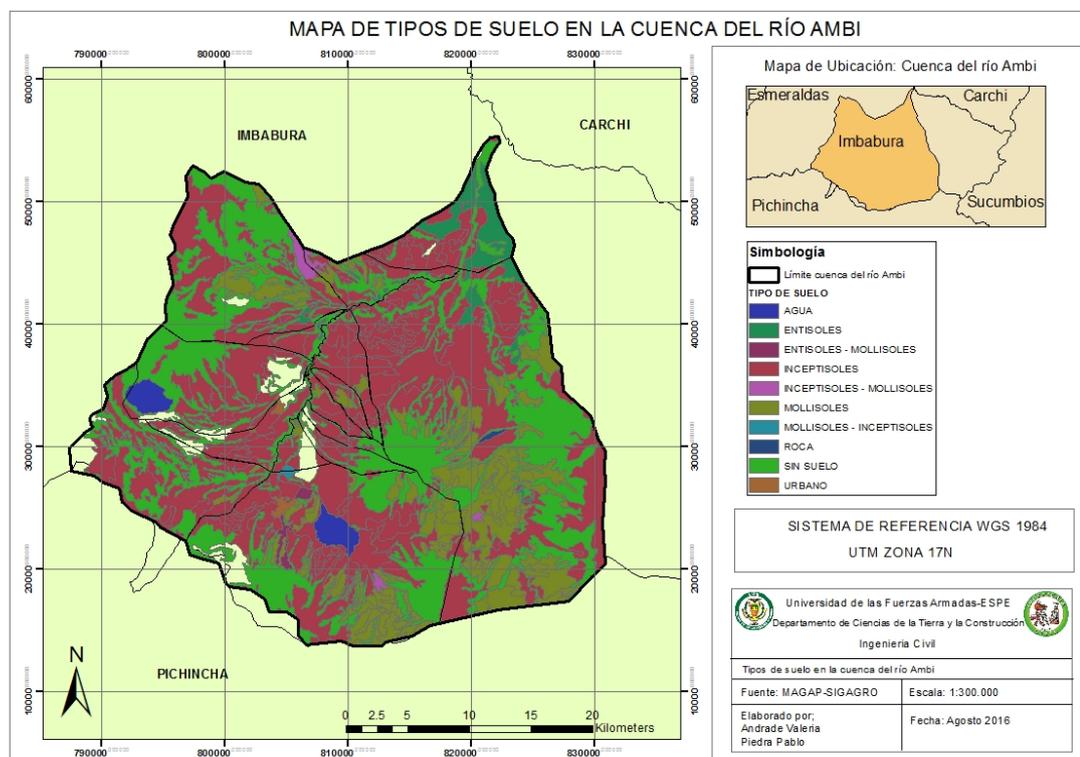
Subcuenca	P1 (M001)		P2 (M105)		P3 (M107)		P4 (M0315)		P5 (M009)	
	A (km <sup>2</sup> )	%								
Río Blanco	70.12	75.42	22.85	24.58						
Río Yanayacu	39.47	44.89	48.45	55.11						
Río Alambi-Cariyacu	19.52	14.12	31.78	22.99	86.95	62.89				
Río Tahuando			153.2	39.71	10.71	2.78	176.6	45.80	45.19	11.71
Río Jatunyacu			195.4	83.53					38.54	16.47
Río Pichavi	4.85	16.26	25.00	83.74						
Quebrada Iluman			13.86	100						
Quebrada Oscura			7.56	100						
Quebrada Yanuyacu			8.27	100						
Quebrada Jijón			10.40	100						
Quebrada			8.59	100						

Subcuenca	P1 (M001)		P2 (M105)		P3 (M107)		P4 (M0315)		P5 (M009)	
	A (km <sup>2</sup> )	%	A (km <sup>2</sup> )	%	A (km <sup>2</sup> )	%	A (km <sup>2</sup> )	%	A (km <sup>2</sup> )	%
Artizón										
Quebrada Colimbuela			10.38	100						
Quebrada Timbiche			22.73	100						
Quebrada Coñaquí			0.06	0.22	25.13	97.53	0.58	2.25		
Quebrada La Virgen					38.58	72.42	14.69	27.58		

### 4.5.3. Condiciones de humedad del suelo

#### 4.5.3.1. Taxonomía y tipos de suelo

En Estados Unidos, han elaborado un sistema para clasificar a los suelos conocidos como la taxonomía del suelo haciendo énfasis en las propiedades físicas y químicas del perfil del suelo. La subcuenca del río Ambi presenta suelos de tipo inceptisoles y gran parte del área suelos tipo molisoles, tal como se muestra en la Figura 43 (Alvear *et al.*, 2006).

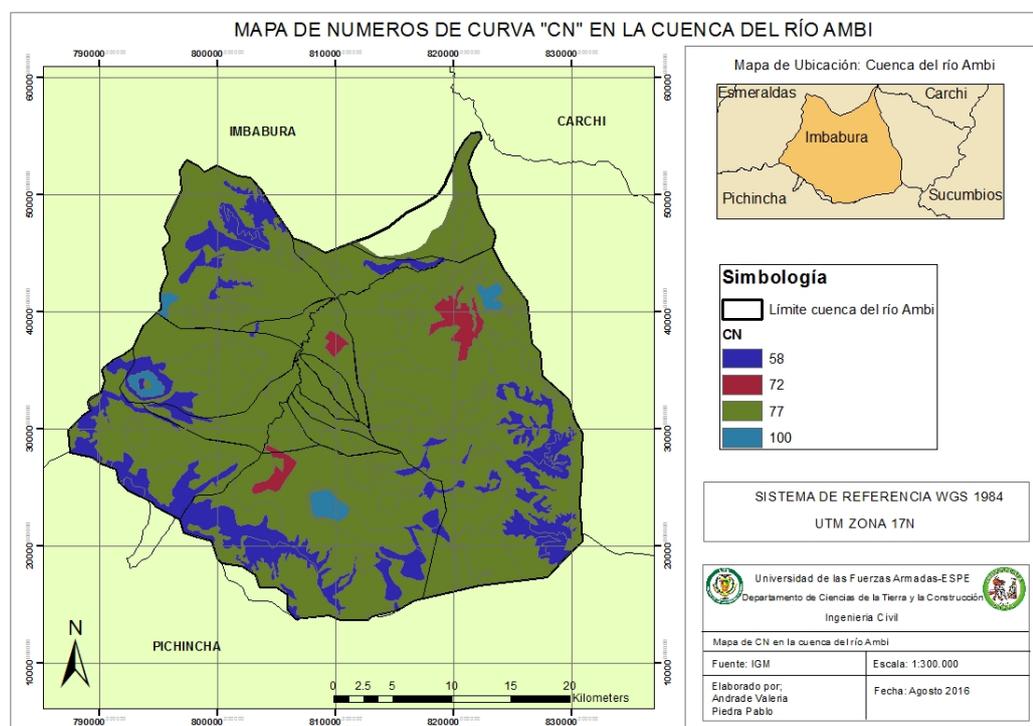


**Figura 43. Taxonomía de la Cuenca del Río Ambi**

Los inceptisoles son un conjunto de suelos, negros, limosos con un porcentaje de arcilla menor al 30% poco ácidos, derivados de ceniza, mientras que los molisoles son un conjunto de suelos limoso o arenoso (Cabrera, 2002), por lo tanto dado las características de este tipo de suelos para la clasificación según el SCS para determinar el número de curva, la cuenca del río Ambi por sus las características antes descritas se seleccionó un suelo de tipo B con una litología de arenas calcáreas con limos, un porcentaje de arcilla entre el 10-30%, una moderada permeabilidad, humedad y tasa de infiltración.

#### 4.5.3.2. Número de curva

El número de curva CN toma valores desde 0 a 100 y es función de la textura del suelo, la cobertura el uso y los antecedentes de humedad del suelo (Red río Aburrá, 2011). Los valores del número de curva para cada subcuenca, la capacidad de almacenamiento (S) y la pérdida inicial (Ia) se encuentran detallados en la Tabla 45, el mapa de los números de curva representativos de la cuenca del río Ambi se observan en la Figura 44.



**Figura 44. Número de curva (CN) cuenca del río Ambi**

**Tabla 45.**  
**Valores de CN, S, Ia para la cuenca del río Ambi**

Subcuenca	CN	S	Ia
Río Blanco	77	75.8701299	15.174026
Río Yanayacu	77	75.8701299	15.174026
Río Alambi-Cariyacu	58	183.931034	36.7862069
Río Tahuando	77	75.8701299	15.174026
Río Jatunyacu	58	183.931034	36.7862069
Río Pichavi	77	75.8701299	15.174026
Quebrada Iluman	77	75.8701299	15.174026
Quebrada Oscura	77	75.8701299	15.174026
Quebrada Yanuyacu	77	75.8701299	15.174026
Quebrada Jijón	77	75.8701299	15.174026
Quebrada Artizón	77	75.8701299	15.174026
Quebrada Colimbuela	58	183.931034	36.7862069
Quebrada Timbibiche	72	98.7777778	19.7555556
Quebrada Coñaquí	77	75.8701299	15.174026
Quebrada La Virgen	77	75.8701299	15.174026

En el caso de la cuenca del río Ambi por tratarse de suelos con características tipo B los números de curva varían entre 100 y 58 siendo el valor más representativo en la cuenca 77 debido a que el uso del suelo característico de la zona es la agricultura.

#### **4.5.4. Información hidrológica del proceso de transformación de lluvia en escorrentía (Tiempo de retardo)**

El tiempo de retardo se define como el tiempo transcurrido entre el centro de masas de la lluvia efectiva y el centro de masas del hidrograma de escurrimiento directo. Debido a la dificultad en determinar el centro de masas del hidrograma de escurrimiento directo, el tiempo de retardo se define también como el tiempo transcurrido entre el centro de masa de la lluvia efectiva y el pico del hidrograma de escurrimiento directo (SINGH, 1992), dicho parámetro es el requisito para el cálculo del proceso de transformación de lluvia en escorrentía mediante el método del hidrograma sintético del SCS.

El tiempo de retardo se lo calcula a partir del tiempo de concentración antes calculada y utilizando la fórmula propuesta por el manual del HEC-HMS se obtienen los resultados presentados en la Tabla 46.

**Tabla 46.**  
**Tiempos de retardo de las subcuenca del río Ambi.**

Nombre	Area(km <sup>2</sup> )	Long cauce (km)	Promedio	
			Tc	Lag
Río Blanco	92.967	19.373	142.946143	<b>50.03115</b>
Río Yanayacu	87.913	18.474	107.159796	<b>37.5059287</b>
Río Alambi-Cariyacu	138.253	19.244	111.151598	<b>38.9030595</b>
Río Tahuando	385.809	39.427	237.487584	<b>83.1206543</b>
Río Jatunyacu	233.993	21.076	155.323135	<b>54.3630972</b>
Río Pichavi	29.856	15.892	127.154087	<b>44.5039306</b>
Quebrada Iluman	13.862	10.267	55.553904	<b>19.4438664</b>
Quebrada Oscura	7.563	7.77	46.801653	<b>16.3805786</b>
Quebrada Yanuyacu	8.271	7.95	57.7835038	<b>20.2242263</b>
Quebrada Jijón	10.398	4.175	45.5202348	<b>15.9320822</b>
Quebrada Artizón	8.586	6.014	42.6104882	<b>14.9136709</b>
Quebrada Colimbuela	10.376	5.323	45.6747832	<b>15.9861741</b>
Quebrada Timbibiche	22.728	8.713	56.1158633	<b>19.6405522</b>
Quebrada Coñaquí	25.762	7.539	61.9384372	<b>21.678453</b>
Quebrada La Virgen	53.267	3.532	23.3535218	<b>8.17373263</b>
Cuenca Río Ambi	1129.6	68.486	435.254485	<b>152.33907</b>

#### 4.5.5. Hidráulica de los métodos de tránsito

##### 4.5.5.1. Tiempo de retardo

Para el cálculo del tránsito de caudales el método más simple que utiliza el HEC-HMS es el del tiempo de retardo, este tiempo de retardo sirvió para calcular las ordenadas del hidrograma de salida a partir del hidrograma de entrada,

Se calculó el tiempo de retardo para los 14 tramos o cauces modelados en la cuenca del río Ambi, los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 47.

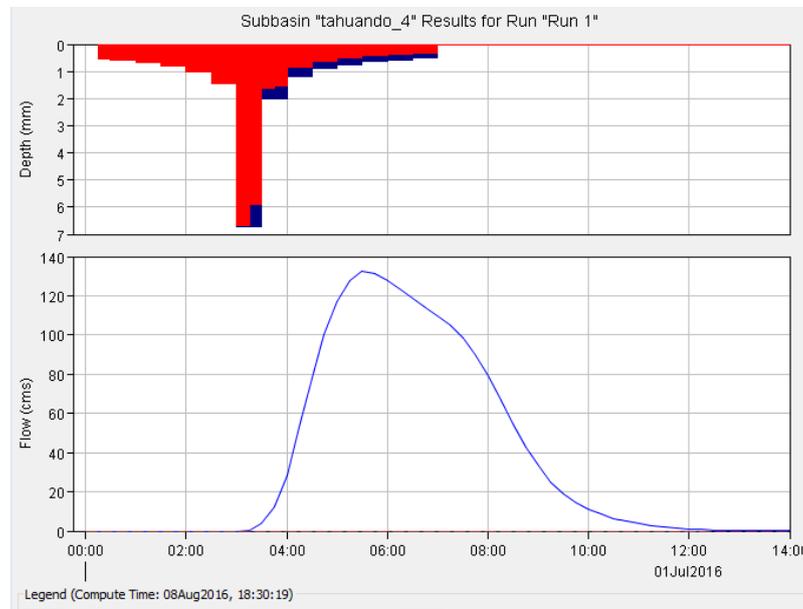
**Tabla 47.**  
**Tiempo de retardo de los cauces modelados en la cuenca del río Ambi**

No	Tramo	Long cause (km)	Cota máx	Cota min	Tc (min)	T Lag (min)
1	A-B	6.45	2466.41	2334.87	89.70	<b>31.40</b>
2	B-C	0.64	2334.87	2324.46	18.71	<b>6.55</b>
3	C-D	1.21	2324.46	2304.72	29.42	<b>10.30</b>
4	D-E	0.23	2304.72	2301.00	9.11	<b>3.19</b>
5	E-F	1.54	2301.00	2271.00	32.78	<b>11.47</b>
6	F-G	1.86	2271.00	2230.77	36.10	<b>12.63</b>
7	G-H	0.91	2230.77	2211.00	21.62	<b>7.57</b>
8	H-I	1.32	2211.00	2181.89	27.98	<b>9.79</b>
9	I-J	2.14	2181.89	2134.73	39.63	<b>13.87</b>
10	J-K	4.55	2134.73	2047.21	71.38	<b>24.98</b>
11	K-L	2.41	2047.21	1964.41	36.84	<b>12.89</b>
12	L-M	9.31	1964.41	1746.40	111.17	<b>38.91</b>
13	M-N	2.69	1746.40	1686.23	46.34	<b>16.22</b>
14	N-O	11.42	1686.23	1461.11	137.05	<b>47.97</b>

#### 4.5.6. Obtención de caudales del modelo HEC-HMS

Una vez ingresados todos los datos de entrada requeridos según las metodologías antes señaladas en el programa HEC-HMS se definió el tiempo de control del modelo, para definir este tiempo se utilizó el tiempo de concentración de la cuenca, en un hidrograma de avenida desde el pico del hidrograma donde se genera el caudal máximo al final del hidrograma ha transcurrido un tiempo igual al tiempo de concentración de la cuenca, (Robedro, 2014). Por esta razón y al no conocer de antemano el tiempo en el que se genera el caudal máximo se optó para realizar el modelo un tiempo de lluvia de dos veces el tiempo de concentración de la cuenca es decir de 14:00 horas con un intervalo de lluvia de 15 min, según los manuales existentes del programa HEC-HMS el tiempo de modelación debe ser tal que todos los hidrogramas de la cuenca se desarrollen por completo (Nania, 2007), por lo que una vez corrido el modelo para todos los tiempos de concentración considerados se verificó que se cumpla esta condición, por lo tanto para el caso del río Ambi el tiempo de lluvia optado permitió el desarrollo de todos los hidrogramas de las subcuencas, nudos y tramos modelados.

En la Figura 45 se muestra el hidrograma correspondiente a la subcuenca de mayor extensión que es la del río Tahuando para un período de retorno de 10 años donde se verifica que el hidrograma se desarrolla en el tiempo de lluvia modelado.



**Figura 45. Hidrograma de la subcuenca del río Tahuando obtenido del HEC-HMS**

Los resultados obtenidos del programa HEC- HMS son los caudales durante todo el tiempo de modelación de la lluvia para cada subcuenca nudo y tramo de la cuenca, así mismo presenta un hidrograma para cada uno de los elementos de la cuenca y un cuadro resumen donde indica los caudales máximos y la hora en la que se produce cada caudal de toda la cuenca, para el efecto de la investigación se requería conocer el caudal máximo de la cuenca por lo que en la Figura 46 se muestra el cuadro resumen de los caudales pico para un periodo de retorno de 10 años.

Project: AMBI\_TC    Simulation Run: Run 1

Start of Run: 01Jul2016, 00:00    Basin Model:    Ambi  
 End of Run: 01Jul2016, 14:00    Meteorologic Model: T 10 AÑOS  
 Compute Time:08Aug2016, 18:30:19    Control Specifications:Control 1

Show Elements: All Elements    Volume Units:  MM  1000 M3    Sorting: Hydrologic

Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (MM)
TRAMO_FG	401.225	116.8	01Jul2016, 05:30	3.93
qyanayacu_9	8.271	13.7	01Jul2016, 04:00	7.46
NUDO_G	409.496	118.5	01Jul2016, 05:30	4.00
TRAMO_GH	409.496	117.7	01Jul2016, 05:45	4.00
yanuyacu_2	87.913	147.0	01Jul2016, 04:15	9.18
NUDO_H	497.409	235.3	01Jul2016, 04:30	4.92
TRAMO_HI	497.409	230.4	01Jul2016, 04:30	4.92
timbibiche_13	22.728	21.7	01Jul2016, 04:00	4.42
NUDO_I	520.137	242.6	01Jul2016, 04:30	4.90
TRAMO_IJ	520.137	241.4	01Jul2016, 04:45	4.90
Colimbuela_12	10.376	0.2	01Jul2016, 04:45	0.20
NUDO_J	530.513	241.6	01Jul2016, 04:45	4.80
TRAMO_JK	530.513	237.2	01Jul2016, 05:15	4.80
alambi_3	138.253	12.5	01Jul2016, 04:45	0.85
NUDO_K	668.766	248.0	01Jul2016, 05:15	3.99
TRAMO_KL	668.766	244.3	01Jul2016, 05:30	3.99
Coñaqui_14	25.762	61.5	01Jul2016, 04:00	11.72
NUDO_L	694.528	253.9	01Jul2016, 05:30	4.27
TRAMO_LM	694.528	253.0	01Jul2016, 06:00	4.27
tahuando_4	385.809	132.5	01Jul2016, 05:30	4.78
NUDO_M	1080.337	380.9	01Jul2016, 06:00	4.46
TRAMO_MN	1080.337	379.8	01Jul2016, 06:15	4.46
virgen_15	53.267	118.7	01Jul2016, 04:00	9.05
NUDO_N	1133.604	389.7	01Jul2016, 06:15	4.67
TRAMO_NO	1133.604	387.3	01Jul2016, 07:00	4.67
NUDO_O	1133.604	387.3	01Jul2016, 07:00	4.67

**Figura 46. Resumen de los caudales pico para un periodo de retorno de 10 años**

De la misma manera se obtuvo los caudales correspondientes a los periodos de retorno de 25 y 50 años, los caudales máximos obtenidos para los tiempos de retorno modelados se presentan en la Tabla 48.

**Tabla 48.**  
**Caudales máximos obtenidos del modelo HEC-HMS**

Tr	HEC-HMS	Tiempo caudal máximo
	Q max (m <sup>3</sup> /seg)	
10	389.7	6:00
25	691.2	6:00
50	950	6:00

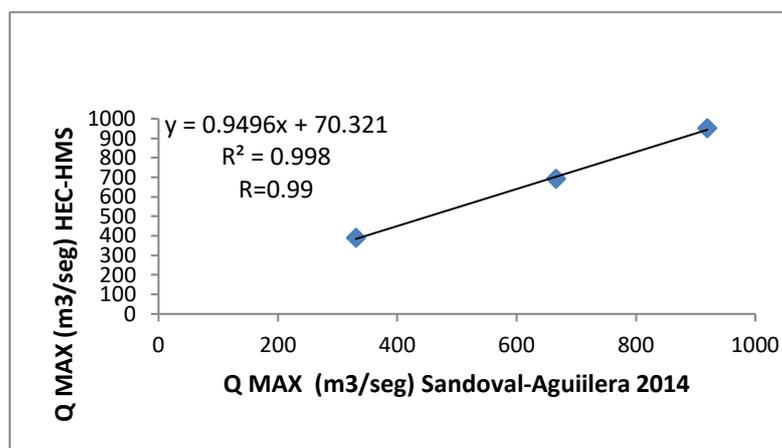
#### 4.5.7. Comparación de caudales

Para verificar los resultados obtenidos del programa HEC HMS se calcularon los caudales máximos por el método de Sandoval y Aguilera (2014), para cuencas con extensiones mayores a 45 km<sup>2</sup>, aplicando dicha metodología cuya ecuación está en función del área, la precipitación media y el periodo de retorno, en la metodología interviene un coeficiente a que depende de la precipitación media de la cuenca como dicha precipitación es 832 mm el coeficiente (a) es 0.106 para el cálculo del caudal máximo en todos los periodos de retorno.

Se realizó una correlación entre los dos caudales calculados en donde en las abscisas se colocó el caudal calculado por el método de Sandoval y Aguilera, y en las ordenadas el obtenido por medio del programa HEC-HMS, en la Tabla 49 se presentan los resultados obtenidos y el porcentaje de error entre ambos métodos, en la Figura 47 se presenta en grafico de dispersión y el valor de correlación R entre ambos métodos.

**Tabla 49.**  
**Comparación de caudales método Sandoval -Aguilera y HEC HMS**

Tr	Método Sandoval y Aguilera 2015	HEC-HMS	% ERROR
	Q Max (m <sup>3</sup> /s)	Q Max (m <sup>3</sup> /s)	
10	330.364891	389.7	15.07
25	665.746331	691.2	3.65
50	919.452596	950	3.21



**Figura 47. Comparacion de caudales maximos entre los metodos Sandoval-Aguilera y HEC- HMS**

Como se observa los resultados obtenidos en ambos modelos presentan valores cercanos para los tres períodos de retorno. El caudal obtenido con HEC-HMS ocupando el modelo del SCS presenta un valor mayor, la correlación de los resultados obtenidos es muy cercana a uno, por lo que se puede decir que la relación de los resultados es positiva intensa (Lind *et al.*, 2004).

#### 4.6. Análisis multitemporal

El análisis multitemporal en este estudio permitió examinar el comportamiento de las variables más representativas en los muestreos realizados en los años 2014 al 2016 en donde se contó con datos de cinco puntos alrededor de toda la cuenca con cuatro temporadas de muestreo escogidas de acuerdo a las precipitaciones dadas por las estaciones meteorológicas del INAMHI.

Los parámetros escogidos para este análisis fueron determinados a partir del análisis de componentes principales.

##### 4.6.1. Análisis de Componentes Principales

Se realizó el análisis de los componentes principales que representaron el comportamiento de los iones en el agua de la subcuenca del río Ambi, tanto para época de lluvias (mayo 2016) y época de estiaje (agosto 2016). A partir de los resultados obtenidos en laboratorio de los 8 iones estudiados, se concluyó luego de aplicar el software estadístico Minitab 17, que los componentes principales que gobiernan el comportamiento iónico en las aguas son para ambas épocas los mismos. Dichos componentes se muestran a continuación en las Tablas 50 y 51.

**Tabla 50.**

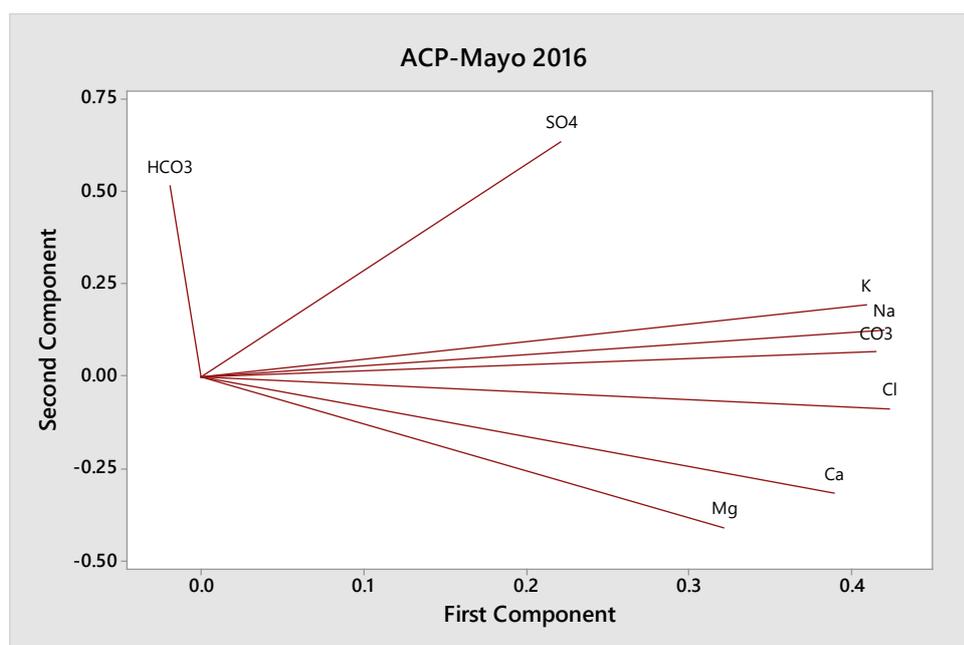
##### Componentes Principales – Mayo 2016

<b><u>V.</u></b>	<b>67.90%</b>	<b>85.10%</b>	<b>97.20%</b>
<b><u>Acumulativa</u></b>			
<b>Iones</b>	<b>CP1</b>	<b>CP2</b>	<b>CP3</b>
Ca <sup>2+</sup>	0.390	-0.315	0.102
Mg <sup>2+</sup>	0.322	-0.407	0.422

Na <sup>+</sup>	<b>0.420</b>	0.127	0.031
K <sup>+</sup>	0.409	0.194	0.029
CO <sub>3</sub>	0.415	0.066	-0.218
HCO <sub>3</sub>	-0.019	0.516	<b>0.806</b>
Cl <sup>-</sup>	<b>0.423</b>	-0.088	-0.050
SO <sub>4</sub>	0.221	<b>0.635</b>	-0.332

Para época de lluvias (Tabla 50), se observó que para tres componentes principales se abarca el 97.2% de la información, es decir los otros cinco iones no aportan al análisis. Se obtuvo como componentes principales a los iones Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub> y HCO<sub>3</sub>. Del primer componente principal se escogió a 2 iones por sus resultados similares, siendo así 4 en total los componentes principales para época de lluvias. En la Figura 48, se muestra la gráfica de los componentes principales para el primer muestreo en mayo, donde se reflejan los resultados mostrados en la tabla anterior.

Los componentes con una longitud mayor en cada dirección, son los que se consideraron como principales. Los iones sodio y cloruros tienen una mayor magnitud en la dirección del primer componente principal, los sulfatos en la dirección del segundo componente principal y los bicarbonatos en la dirección del tercer componente principal.



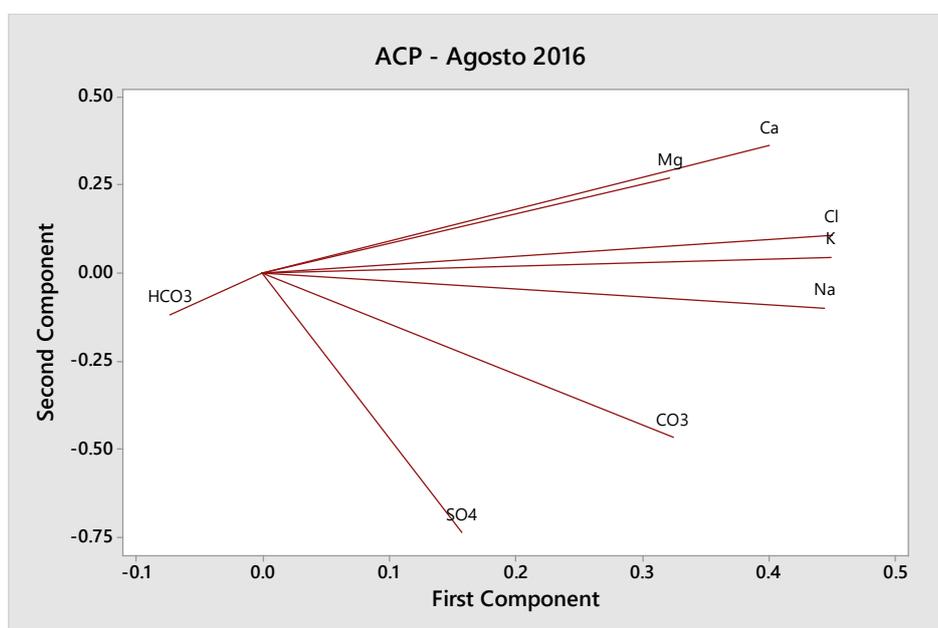
**Figura 48. Análisis de componentes principales mayo 2016**

De igual forma, para el segundo muestreo en época de estiaje (Agosto 2016), los componentes principales resultaron los mismos, sin embargo, recogieron menor cantidad de información en comparación con el primer muestreo. Dichos resultados y su gráfica se muestran a continuación en la Tabla 51 y en la Figura 49.

**Tabla 51.**

**Componentes Principales – Agosto 2016**

<u>V.</u> <u>Acumulativa</u>	58.10%	76.90%	93.70%
Iones	CP1	CP2	CP3
Ca <sup>2+</sup>	0.400	0.362	0.073
Mg <sup>2+</sup>	0.322	0.271	0.481
Na <sup>+</sup>	0.444	-0.098	-0.047
K <sup>+</sup>	0.449	0.047	-0.067
CO <sub>3</sub>	0.324	-0.466	-0.185
HCO <sub>3</sub>	-0.073	-0.118	<b>0.824</b>
Cl <sup>-</sup>	<b>0.450</b>	0.108	-0.093
SO <sub>4</sub>	0.157	<b>-0.735</b>	0.187



**Figura 49. Análisis componentes principales agosto 2016**

Para el segundo muestreo, se suma al análisis el ion  $K^+$ , el mismo que aumenta sus niveles de concentración en el agua en época en que las precipitaciones son menores y el río disminuye su caudal.

La presencia de  $Na^+$  en las aguas se debe a su contacto con suelos salinos y se encuentra en más concentración que el  $K^+$ . Ambos iones se encuentran en gran cantidad en las aguas subterráneas y donde ha habido contaminación por filtración salina, es decir características naturales de la subcuenca (Osicka, R., Giménez, M., 2004).

La presencia de cloruros se atribuye a la disolución de depósitos minerales, contaminación proveniente de diversos efluentes de la actividad industrial, aguas excedentarias de riegos agrícolas y sobre todo de las minas de sales potásicas (Metcalf & Eddy, 1998). A veces puede presentarse un aumento del nivel de cloruros también como consecuencia de contaminaciones domésticas, en particular procedente de la orina del hombre y animales que contiene aproximadamente 5g/l de este ión (Gómez, 2010).

Por otra parte los sulfatos, se encuentran en casi todas las aguas naturales. La mayor parte de los compuestos sulfatados se originan a partir de la oxidación de las menas de sulfato, la presencia de esquistos, y la existencia de residuos industriales. El sulfato es uno de los principales constituyentes disueltos de la lluvia (Casado, J., Calvo, D., Monterde, E., Alfonso, p., 2013) .

Las aguas bicarbonatadas por su parte se deben a la presencia de aguas calcáreas, es decir que están expuestas a la caliza. En general un agua va ser rica en bicarbonatos ya que todos los equilibrios conducen a su formación, como por ejemplo la desintegración de una roca en presencia de  $CO_2$  produce bicarbonatos al mismo tiempo que emergen cationes como  $Na^+$  y  $K^+$  (Moreno, 2003).

Según la secuencia de Chebotarev (1955), las aguas con aniones bicarbonatos y sulfatos predominantes, como es el caso de la cuenca del río Ambi, tienen menor salinidad y un menor recorrido y tiempo de permanencia en el acuífero, es decir son aguas jóvenes. Por otro lado, las aguas con altos contenidos de cloruros, como el caso de la quebrada Tumbabiro, son aguas antiguas ya que tienen un recorrido y

tiempo de permanencia mayor en la cuenca aumentando así su salinidad (Rebollo, 2017).

#### **4.6.2. Variables de estudio**

Una vez encontrados los componentes principales, se buscó funciones que contengan a estos iones más representativos que además son parámetros indicadores de contaminación del agua según el uso al que este destinado el recurso, para este caso se tomó como variables de estudio la relación de adsorción de sodio determinada como RAS, la salinidad efectiva y salinidad potencial, parámetros que representan las variables más críticas en el estudio y la calidad del agua para uso agrícola, tal como lo realizó Cortés *et al.* (2009) en el estudio de calidad de agua del acuífero del valle de Yaqui, Sonora en México, además de la CE que representa la presencia de salinidad en las aguas.

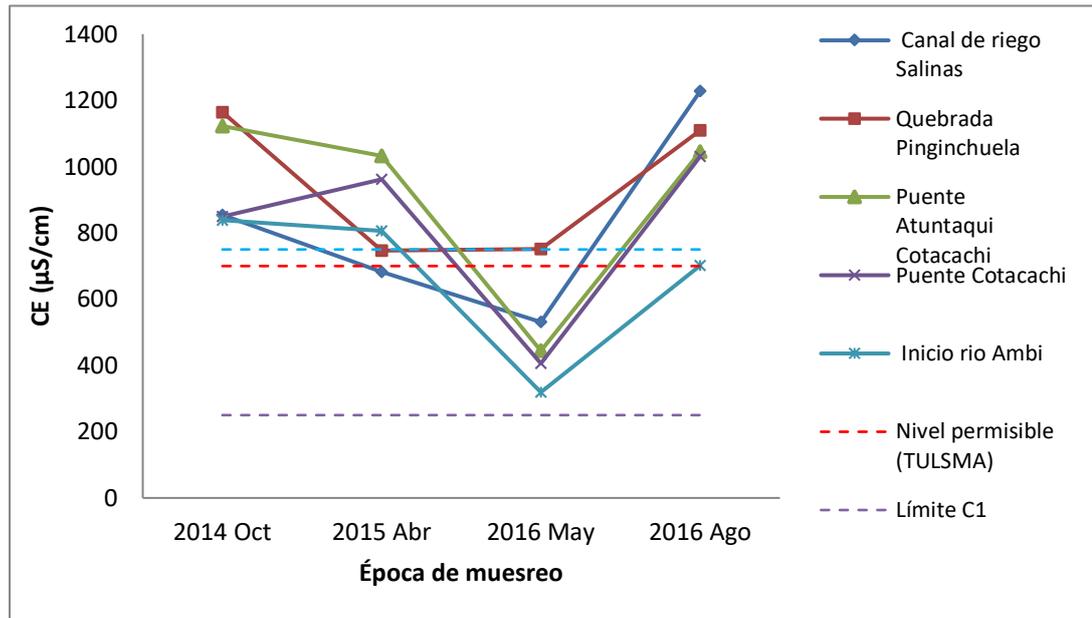
##### **4.6.2.1. Conductividad eléctrica**

La CE es un parámetro relacionado a la salinidad del agua, es la medida de la capacidad de una solución acuosa para transmitir una corriente eléctrica (Orozco, C., Pérez, A., Gonzales, M N., Rodriguez, F., Alfayate, J M., 2004).

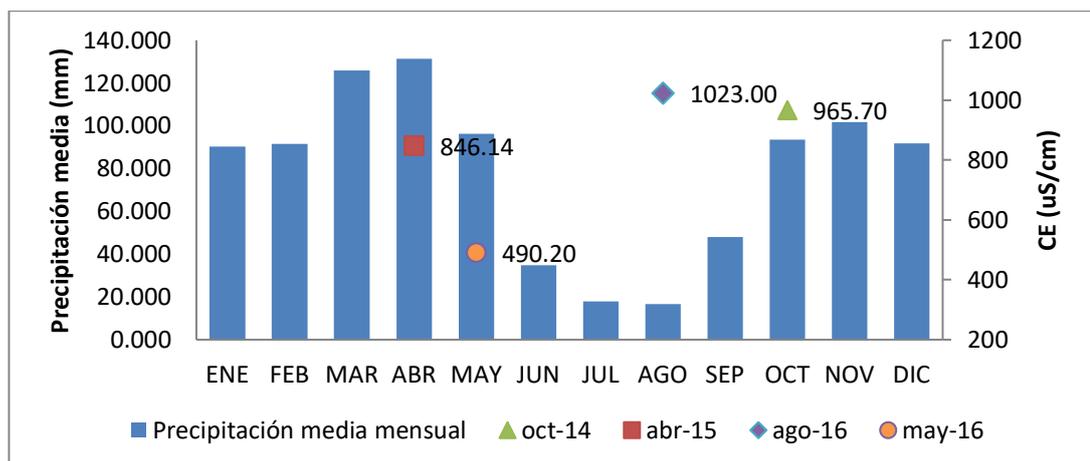
La CE tiene una estrecha relación con la cantidad de sólidos disueltos y la pureza química del agua, mientras más pura es un agua menor es la concentración de electrolitos y por lo tanto la CE es baja (Jiménez A. , 2001).

El análisis de la CE toma importancia especialmente en usos para riego agrícola, debido a que altas salinidades pueden causar pérdidas de rendimiento en una gran variedad de cultivos, ya que puede inhibir el crecimiento de la planta y reducir la productividad, principalmente por el desbalance nutricional y la toxicidad por iones (Carranza, Carlos., Lancho, O., Miranda, D., Chaves, 2009)

En la Figura 50 se puede observar el comportamiento de las variables analizadas de los cinco puntos en el tiempo en el que se realizó el muestreo, mientras que en la Figura 51 se puede observar la relación de la precipitación y la CE promedio de los puntos de muestreo tomados.



**Figura 50. Relación CE vs Época de muestreo**



**Figura 51. Relación CE precipitaciones**

Las variaciones de CE está condicionadas por las precipitaciones y el caudal del río, los usos del suelo y sus modificaciones, la geología del lugar, la aplicación de riego y los focos de contaminación presentes (Rodríguez, C., Duque, C., Calvache, M L., López, M., 2010).

Tal como se muestra en las figuras para la muestras en el río Ambi se puede observar que en promedio la CE de los puntos tomados en el mes de agosto de 2016 es la que presenta un mayor valor debido a que según el histórico de precipitaciones mensuales de las estaciones meteorológicas de la zona es la época en la que se da una

menor cantidad de lluvias y por ende se tiene un menor caudal en el río en el momento del muestreo, lo que haría aumentar la concentración de sales y la CE. La lluvia puede tener una mayor conductividad que el agua del río, debido a la incorporación de gases y partículas de polvo, sin embargo, las fuertes precipitaciones pueden disminuir la conductividad de un cuerpo de agua ya que diluye la concentración de salinidad actual (Fundamentals of Environmental Measurements, 2016).

De acuerdo al INAMHI en el mes de octubre de 2014 llovió más del promedio histórico de 1979 al 2015 teniendo una precipitación media mensual de 146.5 mm, por el contrario en el mes de abril de 2015 se tuvo una disminución de la precipitación comparado al histórico con una precipitación media mensual de 61.5 mm, a esta disminución de precipitación en este mes de muestreo se puede atribuir la razón de que los valores de CE en abril de 2015 fueron mayores que en mayo de 2016, de acuerdo a Fundamentals of environmental Measurements (2016), en las zonas con estaciones secas y húmedas, la conductividad generalmente disminuye durante tiempos de lluvia debido a la dilución de la fuente de agua, esto explicaría el aumento de la CE en el mes de abril, ya que al disminuir la precipitación se disminuye el caudal y las sales se disuelven en menor cantidad, lo que no sucede por ejemplo en la cuenca del río Grande en Chone, donde en época de precipitaciones existe mayor concentración en sus aguas (Carrera, D., Guevara, P., Maya, M., Crisanto, T., 2015).

Según Rodríguez *et al*, (2016), la relación entre la precipitación y la CE es inversa, pero esta relación no siempre ocurre en un río y se debe probablemente a que el exceso o la falta de riego puede generar el lavado de las sales del suelo que forma parte del sistema hidrográfico y aumentar o disminuir la CE, según los datos de precipitación medidas en el INAMHI en los meses de muestreo y debido a que ocurrió una variación climática el mes de octubre debería tener un valor inferior al de abril del 2015, esto como se observa en las Figuras no ocurrió así, probablemente debido a que a pesar de que la conductividad generalmente es menor para estaciones de lluvia, a menudo hay picos de CE cuando el agua entra en contacto con suelos ricos en nutrientes o mineralizados, los iones de sal previamente de los suelos secos

pueden entrar en la solución a medida que se inunda, y por arrastre se produce lavado de suelos aumentando así la conductividad del agua (Fisheries and Aquaculture Department, 2016).

De acuerdo a la norma TULSMA 2015, para uso agrícola, si la CE del agua tiene un valor alrededor de 700  $\mu\text{S}/\text{cm}$  o menor, no existe restricción para el uso de dicha agua. Por otra parte si tiene un valor entre los 700 y 3000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  tiene un grado de restricción de ligero mientras es más cercano a 700  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y de moderado conforme se acerca a los 3000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Finalmente, si el valor de conductividad asciende los 3000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , el grado de restricción es severo y dicho cuerpo de agua no puede emplearse para actividades de riego (MAE, 2015).

De acuerdo a esta normativa en la Figura 50 se pudo ver que para el mes de mayo de 2016 no se tuvo restricción para su uso para riego mientras que para los meses de octubre de 2014, abril 2015 y agosto 2016 tuvieron una restricción ligera a moderada.

Según la clasificación de Riverside, para el muestreo de mayo de 2016 se tienen aguas tipo C2 con una salinidad media que pueden ser utilizadas siempre que haya un lavado moderado, sin embargo, es factible la producción de cultivos moderadamente tolerantes a las sales sin un control de salinidad riguroso, mientras que para octubre de 2014 y agosto de 2016 se tiene aguas de tipo C3 que son altamente salinas y se lo debe utilizar solo con cultivos muy tolerantes a las sales. En el muestreo de abril de 2015 se obtuvo mayormente aguas tipo C3 a excepción del canal de riego Salinas y la quebrada Pingunchuela que resultaron ser de tipo C2.

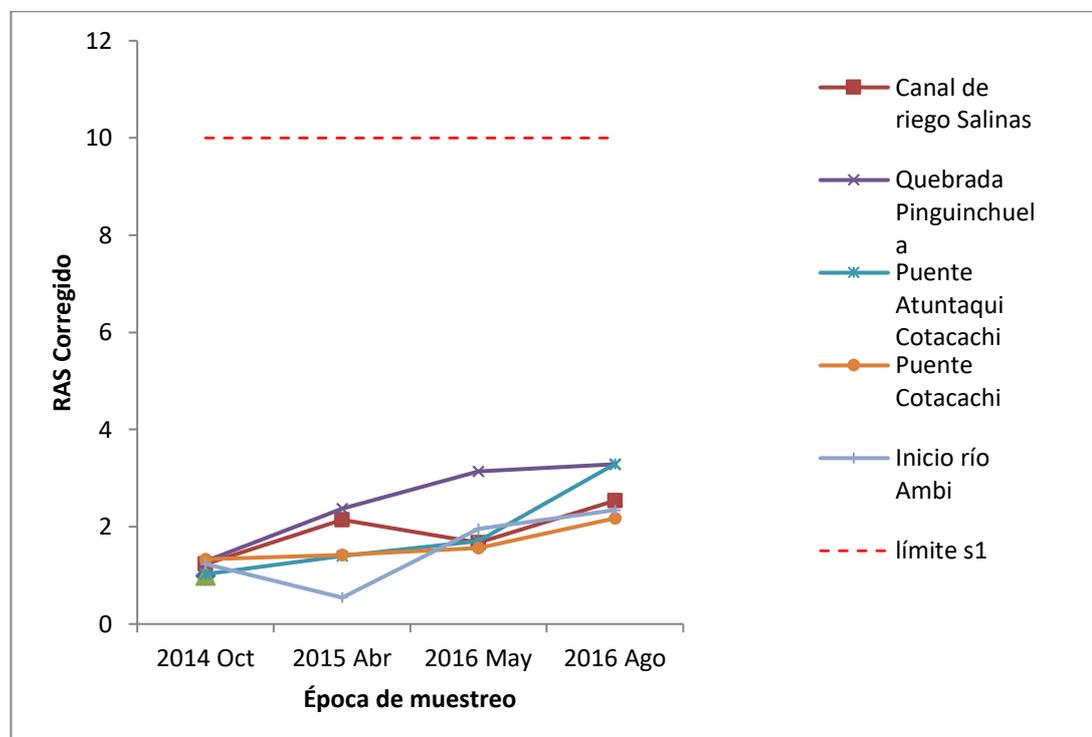
#### **4.6.2.2. RAS**

La relación de adsorción de sodio es un parámetro que permite estimar el grado en que el sodio del agua de riego será adsorbido por el suelo, dentro del análisis es importante considerar los cambios que sufre el calcio por los procesos de precipitación y dilución (García, 2012).

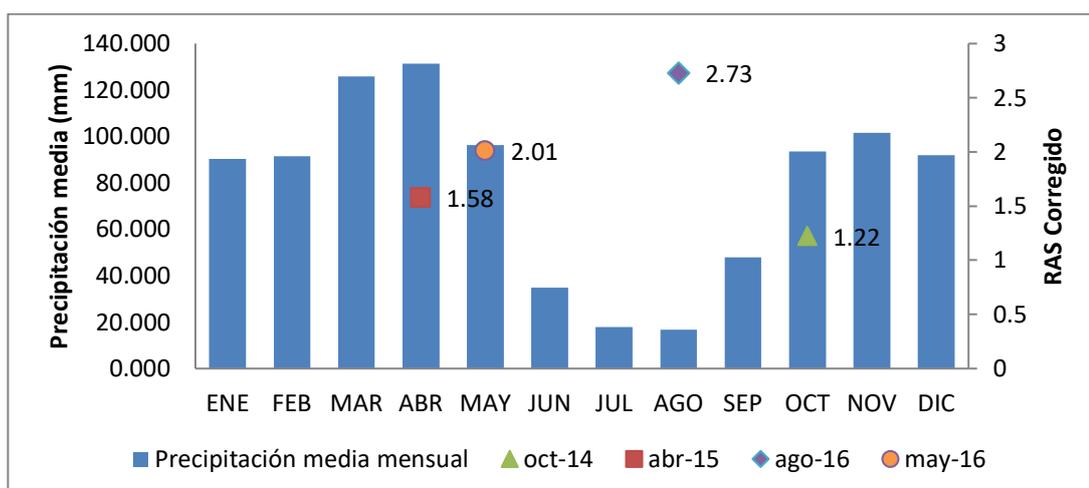
Existen tres formas de calcular este parámetro, la primera el RAS propuesto por la USDA, este no considera los cambios debido a la solubilidad del calcio presente por

la presencia de carbonatos y bicarbonatos los mismos que modifican la concentración del sodio, por lo que el cálculo del RAS de esta forma no representa la verdadera concentración de este parámetro en el agua, debido a esto, Ayers y Westcot (1987) propusieron el cálculo del RAS ajustado, el mismo que considera la formación de precipitados de  $\text{CaCO}_3$ , el problema con este parámetro es que según Suarez (1981), este parámetro sobreestima la peligrosidad del sodio. Es por esto que para esta investigación se consideró el uso del RAS corregido para el análisis multitemporal y geoestadístico debido a que este parámetro si toma en cuenta el efecto de los carbonatos, bicarbonatos y salinidad en los procesos de dilución y precipitación del calcio y no sobreestima la cantidad del sodio por lo que representa el valor más aproximado de concentración de este parámetro en el agua, y es el parámetro recomendado por la FAO (García, 2012).

En las Figuras 52 y 53 se presenta la variación del RAS corregido según la época de muestreo para los cinco puntos muestreados en todas las temporadas y su relación con la precipitación respectivamente



**Figura 52. Relación RAS corregido vs época de muestreo**



**Figura 53. Relación RAS corregido vs precipitación**

En las Figuras se puede apreciar que de las cuatro temporadas de muestreo el mes de agosto de 2016 es el que presentó mayores valores del RAS corregido, esto se debe a que este mes es el que según el histórico de precipitaciones representa épocas de estiaje, tal como cita Pérez (2015), la escases de lluvia puede causar la precipitación del calcio y el magnesio y aumentar la concentración de sodio, al aumentar la concentración de sodio aumenta el valor del RAS corregido lo que resultaría perjudicial para el uso del recurso agua desde el punto de vista agrícola.

En el muestreo de mayo de 2015 y abril de 2016 se nota una disminución de la concentración de RAS ya que el nivel de precipitaciones aumenta lo que haría disminuir la precipitación de calcio y magnesio disminuyendo también la concentración de sodio, el mes de octubre de acuerdo al histórico de precipitaciones del INAMHI representa una época intermedia de lluvias, pero por las variaciones climatológicas en el 2014 se tuvo un nivel mayor de precipitaciones en este mes, por lo que la concentración del RAS corregido fue la menor de las cuatro temporadas de muestreo, al tener grandes precipitaciones se tiene una mayor dilución de los iones además de que según el Departamento de Agricultura y pesca de la FAO, cuando el agua entra en contacto con suelos rico en nutrientes o mineralizado, se produce por arrastre el lavado de suelos, y según Szabolcs (1989) el sodio es el catión más soluble por su valencia es el primero en diluirse en el arrastre de suelos por lo que al disminuir la concentración de sodio disminuye el valor del RAS.

Como se observa en la Figura 52, los puntos muestreados para el análisis multitemporal pertenecen a la clasificación de sodicidad tipo S1, que contienen bajo contenido en sodio con un valor de RAS entre 0 y 10, este tipo de aguas pueden usarse para el riego en la mayoría de los suelos con pocas posibilidades de alcanzar niveles peligrosos de sodio intercambiable, pero es importante considerar que la clasificación según Riverside relaciona la CE con la relación de adsorción de sodio y de acuerdo a esta clasificación se puede evaluar la calidad de agua para riego, en la Tabla 52 se presenta la clasificación de las aguas según Riverside para los puntos muestreados (Richards, L. A, 1954).

**Tabla 52. Clasificación de las aguas del río Ambi según las normas Riverside en todas las épocas de muestreo**

Descripción	oct-14			abr-15			may-16			ago-16		
	RAS	CE	Clase	RAS	CE	Clase	RAS	CE	Clase	RAS	CE	Clase
Yachay, Canal de riego Salinas	1.23	853.5	C3-S1	2.14	682.8	C2-S1	1.68	531	C2-S1	2.54	1228	C3-S1
Quebrada Pinginchuela	1.29	1164	C3-S1	2.37	746.7	C2-S1	3.14	751	C3-S1	3.29	1109	C3-S1
Río Ambi, Puente Atuntaqui Cotacachi	1.03	1122	C3-S1	1.40	1032.4	C3-S1	1.70	444	C2-S1	3.29	1046	C3-S1
Cotacachi Río Ambi, puente Cotacachi	1.33	849.5	C3-S1	1.43	962.1	C3-S1	1.56	406	C2-S1	2.18	1031	C3-S1
Otavaló, inicio río Ambi, antes de PTAR	1.24	838.5	C3-S1	0.54	806.7	C3-S1	1.96	319	C2-S1	2.34	701	C2-S1

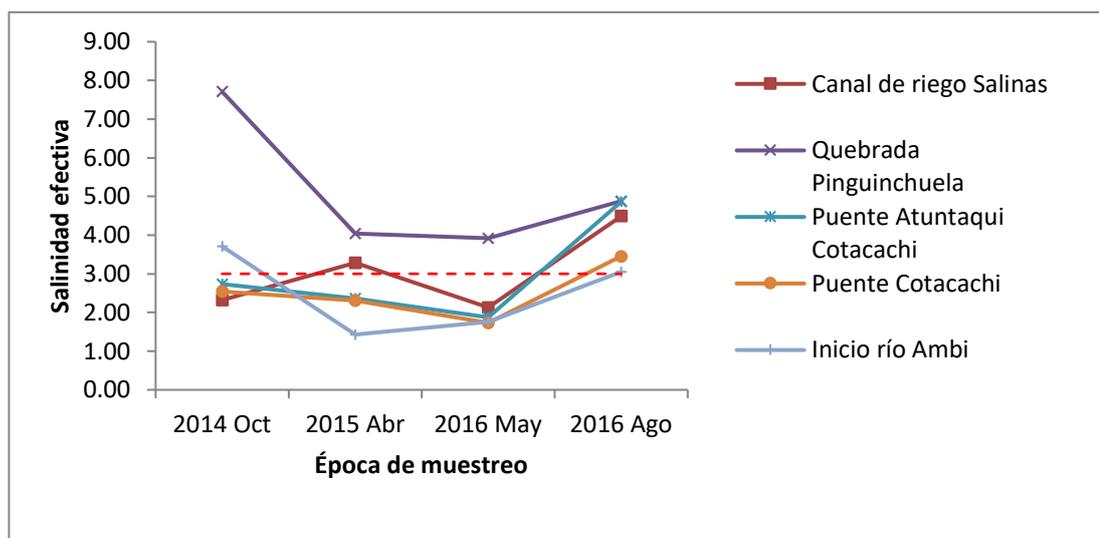
En octubre de 2014 se tiene una clasificación C3-S1 debido a que la CE para esta temporada fue alta, este tipo de aguas debido a su alta salinidad se puede utilizar para el riego de suelos con buen drenaje, empleando volúmenes de agua en exceso para lavar el suelo y utilizando cultivos muy tolerantes a la salinidad, en abril de 2015 se tuvo una disminución de la CE pero de igual forma resultaron ser de tipo C3-S1 a excepción del canal de riego salinas y la quebrada Pinginchuela, en mayo de 2015 se tuvo una reducción considerable de la CE debido al aumento de precipitaciones por lo que para esta temporada de acuerdo a Riverside se clasifican como tipo C2-S1 con una salinidad media apta para el riego, para agosto de 2016 se tuvieron los valores más altos de CE y RAS corregido ya que fue tomado en época de estiaje por lo que se clasifican como tipo C3-S1.

#### 4.6.2.3. Salinidad efectiva

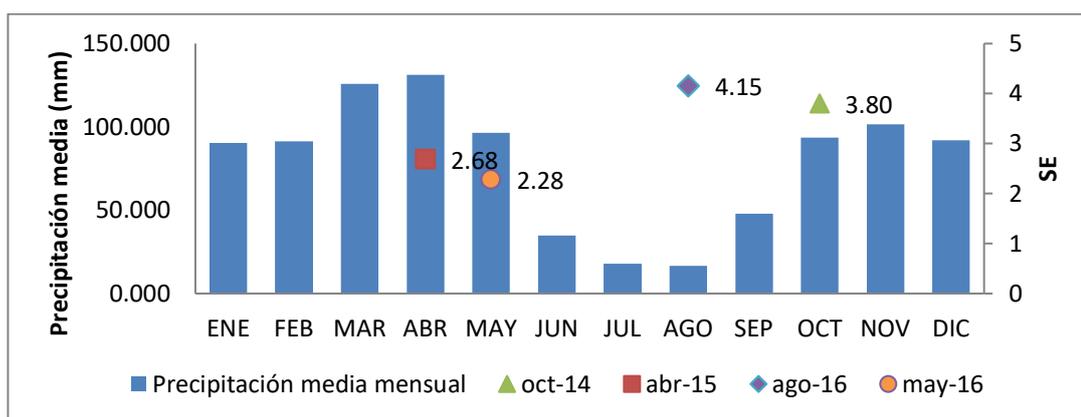
La salinidad efectiva es una estimación más real del problema de la salinidad ya que toma en cuenta la precipitación probable de las sales menos solubles carbonato de calcio y magnesio y sulfato de calcio (Valverde, 2007).

Los índices de salinidad potencial y efectiva aumentan considerablemente la presión osmótica en la solución del suelo disminuyendo la calidad del agua para uso agrícola (Aguilera, C., Martinez, E., R , 1996).

En las Figuras 54 y 55 se puede observar el comportamiento de la variable analizada de los cinco puntos en el tiempo en el que se realizó el muestreo, y la relación de la salinidad efectiva y la precipitación media de los puntos de muestreo tomados.



**Figura 54. Relación Salinidad efectiva vs época de muestreo**



**Figura 55. Relación salinidad efectiva vs precipitación media mensual**

En las gráficas se pudo observar que la salinidad efectiva en el muestreo de agosto de 2016 fue en promedio la más crítica, esto se debe a las bajas precipitaciones que se dieron en la época del muestreo, lo que disminuye el caudal y la posibilidad de disolución de las sales en el mismo, la salinidad efectiva tiene mucha incidencia en la cantidad de carbonatos y bicarbonatos que contiene el agua, en zonas con altas precipitaciones la mayoría de los carbonatos y bicarbonatos expuestos y disponibles son disueltos y o lavados a lo largo del tiempo lo que haría disminuir también a la salinidad efectiva (UPRM, 2016).

En abril de 2015 debido a los cambios climáticos se tuvo una precipitación menor al promedio histórico mensual, por lo que la salinidad efectiva presentó valores mayores a los del mes de mayo debido a que a menor precipitación menor disolución de las sales en el agua tal como se lo explicó anteriormente. Para agosto de 2016 se tiene una clasificación de aguas de acuerdo a la salinidad efectiva condicionada en todos los puntos muestreados, por lo que se debe tener cuidado para su uso desde el punto de vista agrícola ya que el aumento de la presión osmótica debido a la salinidad efectiva puede afectar a los cultivos (Aguilera, C., Martínez, E., R., 1996).

El mes de octubre de 2014 a pesar de que el INAMHI indicó que se tuvo altas precipitaciones en ese mes y eso haría disolver las sales, como se observa en los gráficos se tiene mayores contenidos de salinidad efectiva en este muestreo, esto se puede justificar probablemente por el intemperismo que es la alteración de los materiales rocosos expuestos al aire, la humedad y al efecto de la materia orgánica, en este caso especialmente por el intemperismo químico, ya que este está estrechamente relacionado con el clima, ya que este regula las condiciones de

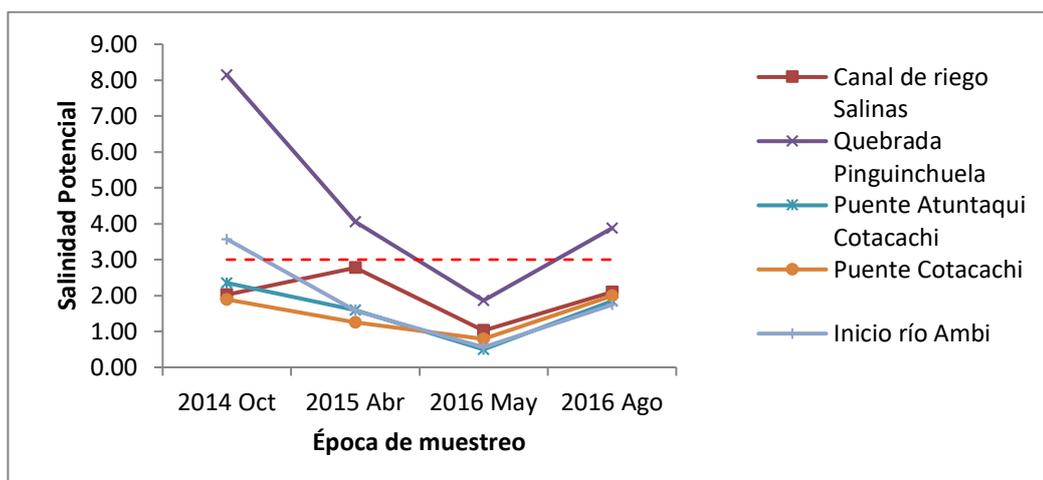
humedad y temperatura que son esenciales para controlar las reacciones químicas que conducen descomposición de los minerales, altas precipitaciones aceleran el intemperismo ya que el agente de meteorización química más importante es el agua (Duque, 2016).

Para el caso de la salinidad efectiva ocurriría la meteorización química por carbonatación en donde  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$  reaccionan formando  $\text{H}_2\text{CO}_3$  (ácido carbónico), este a su vez reacciona con el carbonato cálcico  $\text{CaCO}_3$  para formar bicarbonatos, las sales que resultan como producto de estas reacciones son transportados a través del suelo y depositadas en la zona de saturación para finalmente llegar a los ríos, incrementando así el contenido de salinidad efectiva l en el agua (Duque, 2016).

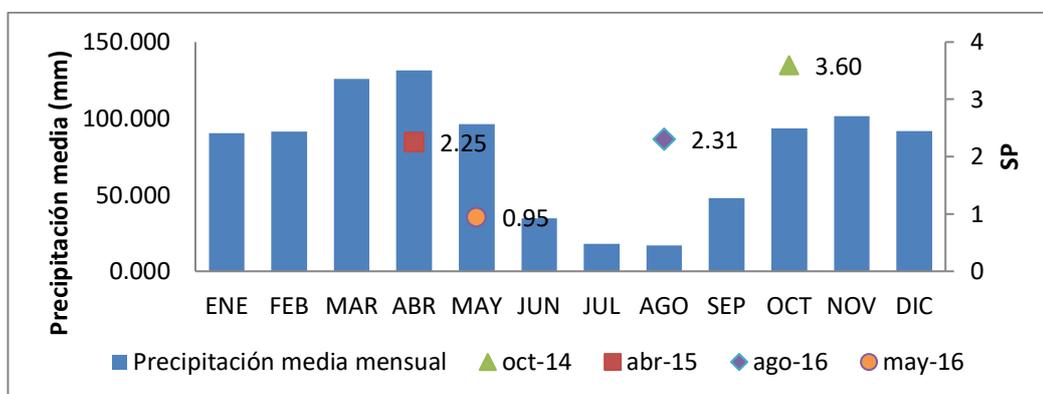
En el mes de mayo de 2016 y abril de 2015 , no se tiene ninguna restricción ya que los puntos de muestreo a excepción de la quebrada Pingunchuela, se clasifican como buenas respecto a la salinidad efectiva, agosto de 2016 tiene una clasificación condicionada, octubre de 2014 a excepción de e inicio del rio Ambi y la quebrada Pingunchuela tiene una clasificación buena.

#### **4.6.2.4.Salinidad Potencial**

La salinidad potencial es un índice para estimar el efecto adverso que producen los cloruros y sulfatos a bajos niveles de humedad ya que estas sales a una humedad menor al 50% son las ultimas que quedan en la solución produciendo un aumento considerable en la presión osmótica (Cuellar, 2013). En las Figuras 56 y 57 se puede observar el comportamiento de la variable analizada de los cinco puntos en el tiempo en el que se realizó el muestreo, y la relación de la salinidad potencial y la precipitación media de los puntos de muestreo tomados.



**Figura 56. Relación Salinidad Potencial vs época de muestreo**



**Figura 57. Relación Salinidad Potencial vs precipitación media mensual**

De acuerdo a las otras variables analizadas y debido a que según la bibliografía antes citada cuando se tiene un mayor caudal se produce una mayor dilución de las sales la época de muestreo con menos precipitaciones debería ser la que más concentración de la variable tenga, como se observa en las gráficas para el caso de la salinidad potencial no sucedió así, ya que el mes de Octubre de 2014 presento las concentraciones más críticas, a pesar de que de acuerdo al INAMHI en Octubre de 2014 se tuvo altas precipitaciones, este fenómeno se le puede atribuir a la meteorización, el agua al ser el agente de meteorización química más importante fuertes precipitaciones podrían acelerar estos procesos (Duque, 2016).

Para el caso de la salinidad potencial los procesos de dilución dentro de la meteorización química pueden ser la razón del incremento de la cantidad de esta

variable, los nitratos, cloruros, sulfatos y carbonatos de iones alcalinos y alcalinotérreos, son las sales que con mayor facilidad se forman como consecuencia de la meteorización, el ion cloruro y sulfato dentro de las 5 categorías de movilidad durante la meteorización son consideradas como fuertemente lavables por lo que la probabilidad de que por el proceso de meteorización se incremente la cantidad de iones de cloruros y sulfatos es alto lo que podría explicar el aumento de concentración de salinidad potencial en este muestreo (Quezada, 2003).

La salinidad potencial no presentó restricción en ninguno de los muestreos ya que en su gran mayoría se tuvo una salinidad potencial que clasifica a las aguas como buenas para su uso desde el punto de vista agrícola, a excepción de la quebrada Pinguinchuela que para octubre de 2014 abril 2015 y agosto 2016 tuvo una clasificación condicionada.

#### **4.7. Análisis Geoestadístico**

De las variables principales obtenidas en el análisis de componentes principales y agrupadas dentro de los parámetros RAS°, SE y SP, se realizó el análisis espacial con el fin de obtener una correlación entre los puntos y poder predecir los valores de dichos parámetros en puntos no muestreados.

Para la presente investigación se contó con cuatro períodos de muestreo, dos realizados en este proyecto y dos tomados de Tamayo (2016), para cada muestreo hubo diferente cantidad de puntos tomados. Para Octubre de 2014 se obtuvieron 26 puntos, para 2015 en el mes de Abril 11 puntos, y para Mayo y Agosto 2016, 10 puntos.

En el Anexo 6, se muestran los datos completos de los tres parámetros (RAS°, SP y SE), para todos los períodos, con los que se trabajó el análisis geoestadístico.

Se muestra a continuación el análisis geoestadístico detallado para el parámetro RAS° de Octubre del 2014 que fue el período con mayor número de puntos

muestreados. Para el resto de parámetros en este y el resto de períodos, se resumió los resultados en la tabla que se adjunta en el Anexo 7.

#### **4.7.1. Análisis exploratorio de datos (AED)**

La finalidad del AED fue examinar los datos previamente a la aplicación de cualquier técnica estadística. De esta forma se consigue un entendimiento básico de los datos y de las relaciones existentes entre las variables analizadas, el AED proporciona métodos sencillos para organizar y preparar los datos, detectar fallos en el diseño y recogida de datos, tratamiento y evaluación de datos ausentes, identificación de casos atípicos y comprobación de los supuestos subyacentes en la mayor parte de las técnicas multivariantes (Salvador Figueras, M., Gargallo, P., 2003).

Coro (2010) , recomienda que para comprobar la distribución de variables de tipo cuantitativas se aplique el método gráfico conocido como histograma, por su facilidad de representar a primera vista la distribución de los datos, aunque advierte que para muestras pequeñas, se puede distorsionar la representación visual, de tal forma que sea poco fiable. Para esto, propone evidenciar con un diagrama de cuantiles (Q-Q plots).

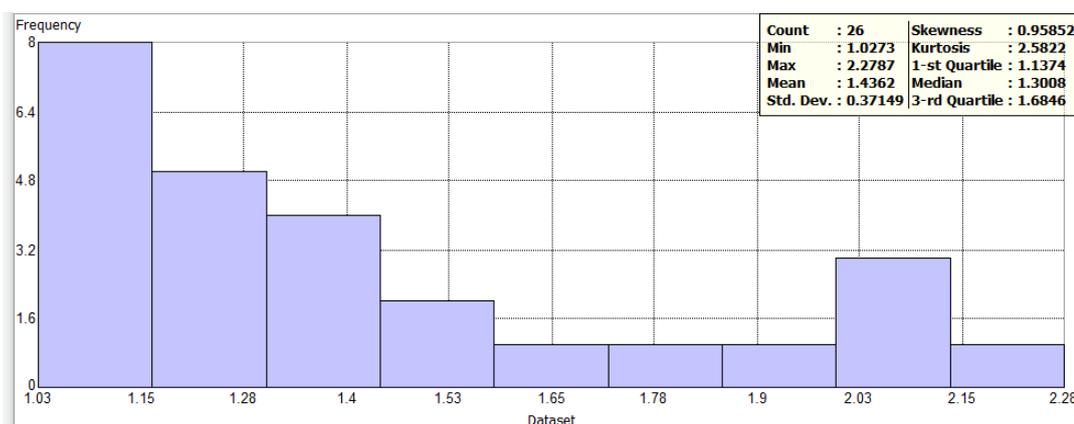
Los diagramas de cuantiles comparan en un sistema de coordenadas cartesianas, los cuantiles muestrales (eje X) con los cuantiles esperados bajo la hipótesis normalidad. Si la distribución de partida es normal dichos diagramas tenderán a ser rectas que pasan por el origen (Castillo, S., Lozano, E., 2007).

Los datos atípicos que se tengan dentro de un conjunto de muestras son otra consideración importante en el AED, este tipo de datos no pueden ser caracterizados categóricamente como benéficos o problemáticos sino que deben ser contemplados en el contexto del análisis y debe evaluarse el tipo de información que pueden proporcionar. Su principal problema radica en que son elementos que pueden no ser representativos de la población y distorsionan seriamente el comportamiento de los contrastes estadísticos (Salvador Figueras, M., Gargallo, P., 2003).

Esto se puede hacer gráficamente mediante histogramas, diagramas de caja o bien numéricamente, mediante el cálculo de puntuaciones tipificadas. Coro (2010) , recomienda para datos cuantitativos que se lo haga mediante un diagrama de caja y bigotes que es una presentación visual que describe varias características importantes, al mismo tiempo, tales como la dispersión y simetría.

#### 4.7.1.1.Método gráfico (histograma)

El histograma se lo elaboró dividiendo a los datos en nueve barras, así, se pudo obtener continuidad en el gráfico y agrupar a todos los datos en todos los intervalos. En la Figura 58 se observa el histograma correspondiente a la variable en análisis (RAS°) para el período de Octubre de 2014, con los valores estadísticos que describen al conjunto de datos.



**Figura 58. Histograma RAS° muestreo octubre 2014**

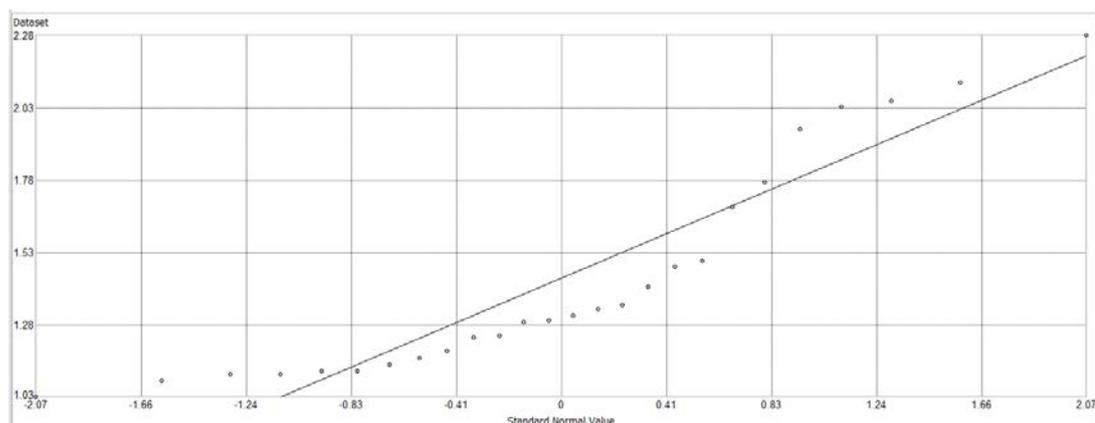
Del gráfico del histograma se pudo concluir que los datos no presentaron una distribución normal simétrica, gráficamente se observó una distribución sesgada hacia la derecha y la misma se corroboró con los parámetros que definieron la forma de la distribución como son la curtosis y el coeficiente de sesgo, el coeficiente de sesgo otorga una distribución cuantitativa referida a la distribución, si los datos presentan una distribución normal este coeficiente toma valores de cero, para este caso como el coeficiente de sesgo es mayor a cero indica una distribución asimétrica positiva. La curtosis o apuntalamiento cuantifica la compacidad de la

distribución para el caso de la distribución normal toma el valor de cero, como se observa en el análisis este parámetro es mayor a cero por lo que la distribución es de carácter leptocúrtica (Koch, A., Cabrera, P., 2010)

Una distribución es normal cuando la media, mediana y la moda tienen los mismos valores, para los datos analizados la media fue mayor a la mediana por lo que se tuvo una curva asimétrica a la derecha. La desviación estándar es un índice de la dispersión de los datos, mientras más alto es el valor de este parámetro más dispersos están los datos, para el análisis se obtuvo una desviación estándar de 0.37 lo que corrobora que los datos analizados no siguen una distribución normal (Tellez, C., Lemus, D., 2014).

#### 4.7.1.2. Gráfico Q-Q Plot

Debido a que la cantidad de datos es reducida y siguiendo las recomendaciones de Coro (2010), se comprobó la distribución de los datos mediante el diagrama Q-Q plot, el cual permitió comparar la distribución empírica de los datos analizados con la distribución normal a través de los cuantiles. En la Figura 59 se observa el diagrama Q-Q plot obtenido para la variable analizada (RAS<sup>o</sup>) en el período octubre de 2014.



**Figura 59. Diagrama de cuantiles, RAS<sup>o</sup> muestreo octubre 2014**

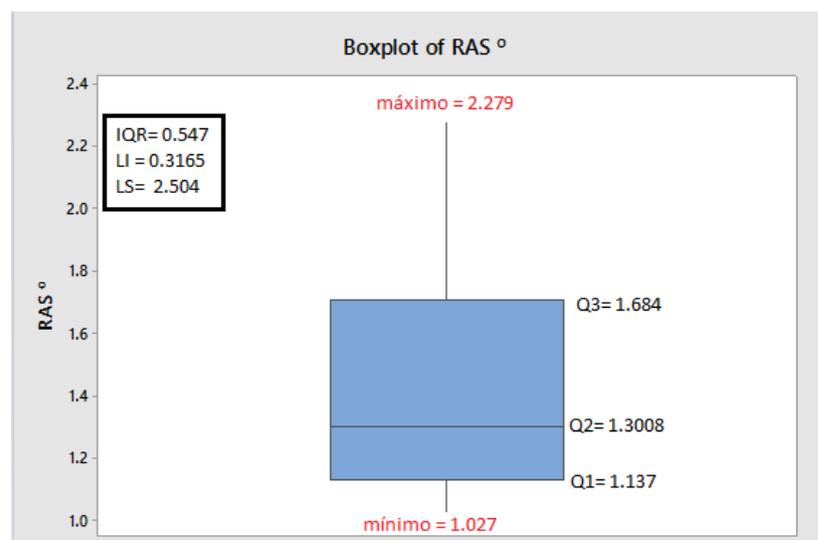
Se acepta la normalidad de los datos cuando la distribución de la variable se asemeja a la distribución normal es decir presenta un comportamiento rectilíneo, no

obstante se debe tener en cuenta que siempre se tenderá a observar mayor variabilidad en los extremos (Castillo, S., Lozano, E. , 2007).

Como se observa en la gráfica para la variable analizada se confirmó que no se tuvo una distribución normal en los datos, el comportamiento no fue rectilíneo y los cuantiles de la variable observada no se asemejaron a los de distribución normal. Como se observa la variable en estudio tuvo un comportamiento en forma de “S” lo que confirma que se tiene una distribución leptocúrtica además de que un gráfico Q-Q plot en forma de "S" significa que la distribución tiene colas mayores o menores que la normal, esto es, que existen pocas o demasiadas observaciones en las colas de la distribución, como es el caso de la variable analizada (Bernal, 2013).

#### 4.7.1.3. Diagrama de caja

El diagrama de caja indicó la existencia de datos atípicos además de que proporcionó información sobre la simetría de los datos, su distribución y los valores de la mediana, el primer y tercer cuartil y el límite inferior y superior de la variable en estudio (Luceño, A., Gonzales, F., 2004). En la Figura 60 se observa el diagrama de caja y bigotes para el RAS ° en el muestreo de octubre de 2016.



**Figura 60. Diagrama de caja RAS muestreo octubre 2014**

Como se observa en el diagrama no se encontró ningún dato atípico ya que los datos están comprendidos entre el límite inferior (0.3165) y superior (2.504), el

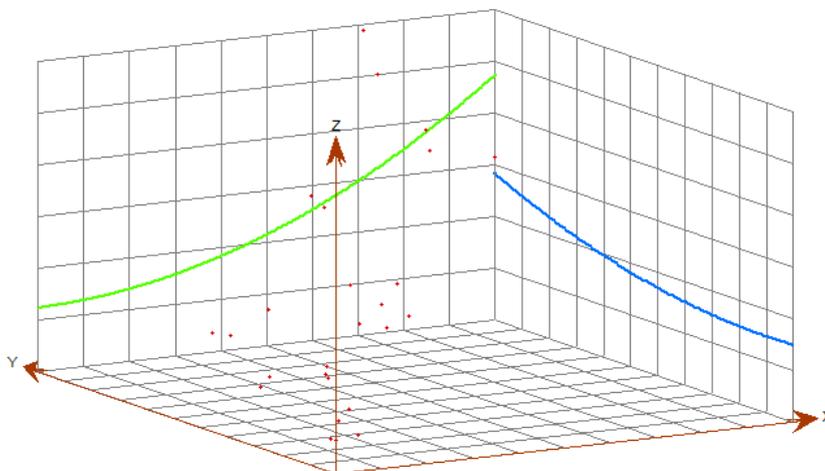
diagrama de caja está formado por una caja central que abarca el 50 % de los datos y representa el recorrido intercuartílico. La mediana o segundo cuartil es representada por la línea horizontal la misma que si se encuentra en el centro de la caja los datos analizados tienen simetría, en el gráfico se observa que para la variable analizada los datos no tienen simetría ni una distribución normal (Llinas, H., Rojas, C., 2005).

#### 4.7.1.4. Análisis de tendencia

Sirve para determinar si el fenómeno a estudiar tiene una tendencia espacial, es decir que existan diferencias dependientes de la dirección en los valores característicos de la variable investigada, es importante para el análisis geoestadístico, ya que el método de Kriging parte de supuesto de la estacionaridad de las variables por lo que para su análisis se requiere depurar las tendencias ya que las mismas pueden tener influencia externas a los valores de las variables (Koch, A., Cabrera, P., 2010).

Es significativo analizar si los datos manifiestan tendencias direccionales que permitan establecer correlaciones en esas direcciones, y formular modelos de comportamiento, para luego en el análisis estructural pueda ser removida dicha tendencia (Ceballos, 2011).

En la Figura 61 se observa la distribución tridimensional de los valores RAS° del muestreo de octubre de 2014 a través de las coordenadas X e Y.



**Figura 61. Gráfico de tendencias RAS° octubre 2014**

En la gráfica, en la dirección Norte-Sur (línea azul) se puede observar una ligera tendencia relativamente lineal, mientras que para la dirección Este-Oeste (línea verde) se observa una tendencia más pronunciada de forma polinómica cuadrática.

La tendencia del modelo será en la dirección en la que la tendencia sea más fuerte o predominante (Ceballos, 2011) , para el caso de la variable en estudio se tendría una tendencia cuadrática alrededor de la dirección Este-Oeste, la misma que se debe considerar en el análisis exploratorio de datos para mejores resultados del modelo.

Existen varios autores que colocan como requisito la distribución normal de los datos para el análisis geoestadístico por el método de Kriging, Hengl (2009), manifiesta que los requisitos para la modelación por el método de Kriging son la estacionaridad de los datos y la distribución normal. Por otra parte en Diggle y Ribeiro (2007), se manifiesta que a pesar de que la distribución normal es esencial en el método Kriging ya que el mismo es impulsado por medios Gaussianos, también pueden ser utilizados datos de distribución no normal, en el caso de optar por un método apropiado, Krivoruchko (2000), dice que a pesar de no ser un requisito para el método se obtiene mejores resultados en la predicción con datos de distribución normal, si los datos no tienen distribución normal la incertidumbre de predicción es grande y los resultados obtenidos no son confiables.

De manera general se resume del análisis exploratorio de datos que la variable analizada no tiene una distribución normal, presenta una distribución sesgada a la derecha de carácter leptocúrtica sin datos atípicos y con una tendencia cuadrática en la dirección Este-Oeste. De acuerdo a lo explicado en párrafos anteriores la distribución sesgada a la derecha de los datos si bien es cierto no es impedimento para el análisis geoestadístico por el método de Kriging, se sabe que la incertidumbre de predicción por la carencia de distribución normal de los datos en estudio es grande, por otro lado, la estacionaridad de los datos si es un requisito para el uso del modelo de Kriging por lo que se debe eliminar la tendencia de los datos en el análisis estructural.

#### **4.7.2. Análisis estructural**

Una vez realizado el AED, se realizó el análisis estructural o estudio variográfico en donde únicamente se calcula y se ajusta los datos a un semivariograma teórico que caracterice la continuidad espacial de la variable estudiada. En general, el ajuste a modelos teóricos para la determinación de los parámetros del semivariograma se realiza de forma visual. En ocasiones se efectúan ajustes polinomiales por el método de los mínimos cuadrados u otras variantes, que aunque se encuentra el mejor ajuste, no siempre se verifica la condición de que el variograma obtenido sea siempre de tipo positivo, siendo insatisfactorio (Gorsich, D., Genton, M., 1999).

El método geoestadístico que se utilizó fue Kriging ordinario. Es un método empleado en variables relacionadas con la agricultura y da buenas predicciones cuando existe un muestreo intenso (Oliver, 2010).

Las principales características que hacen del krigeado un método de estimación muy superior a los tradicionales, como el inverso ponderado de la distancia, la triangulación, etc., son las siguientes: mientras que los métodos tradicionales utilizan el concepto euclidiano de la distancia para el cálculo de los pesos que se aplicarán a cada dato muestral, el krigeado considera tanto la distancia como la geometría de la localización de las muestras; mediante el krigeado se minimiza la varianza del error esperado; los métodos geoestadísticos muestran una gran flexibilidad para la interpolación, puede estimar valores puntuales o en bloques, así como métodos para incorporar información secundaria que esté relacionada con la variable principal (Moral Garcia, 2004).

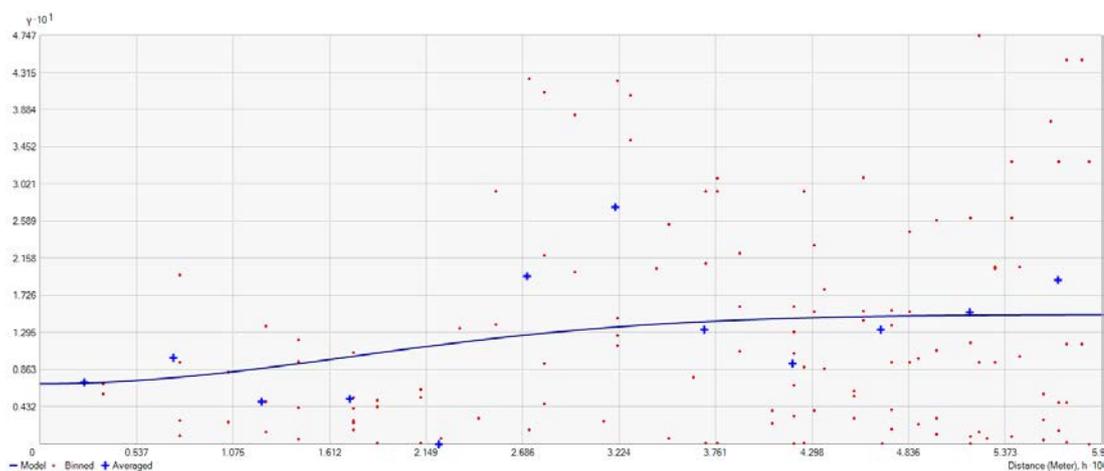
##### **4.7.2.1. Semivariograma teórico**

Por la tendencia que presentan los datos en el espacio, fue necesario cumplir con el principio de estacionaridad removiendo la tendencia cuadrática que se detectó en el análisis exploratorio. El ArcGIS presenta la opción de remover la tendencia de los datos haciendo que los resultados del modelo sean más confiables.

Fuenzalida (2015), señaló que se debe tomar como el semivariograma óptimo a aquel que presentó el menor valor de error medio cuadrático (RMS), la menor diferencia en validación cruzada, el error estándar más pequeño y próximo al RMS y con un valor de RMS estandarizado cercano a uno.

Basado en lo antes mencionado, para la variable y el período en análisis, se tomó el modelo de semivariograma gaussiano. En la Figura 62, se presenta el gráfico del semivariograma teórico para el conjunto de datos analizados. En ella se observó que el rango para el cual la meseta alcanzó su límite máximo es de 5910m, se dividió a dicho rango en 12 intervalos. El largo en los intervalos se eligió de tal forma que el número de pares en cada intervalo sea lo suficientemente grande para que el estimado del semivariograma sea relativamente estable. Se considera que entre 30 y 50 pares satisfacen este requerimiento (Diaz, 2002).

El efecto pepita ( $C_0$ ) del semivariograma tuvo un valor diferente de cero (0.07), es decir no parte del origen, esto se suele interpretar como un error en las mediciones o una ausencia de valores en distancias inferiores a las que se tomaron las muestras (Gallardo, A., 2006).



**Figura 62. Semivariograma RAS° muestreo octubre 2014**

La meseta del semivariograma alcanzó el valor de 0.15. El efecto pepita representa el 47% de la meseta, si interpretamos como un error en las mediciones, un modelo no puede tener un  $C_0$  mayor del 50% de la meseta para que pueda explicar bien la realidad (Diaz, 2002).

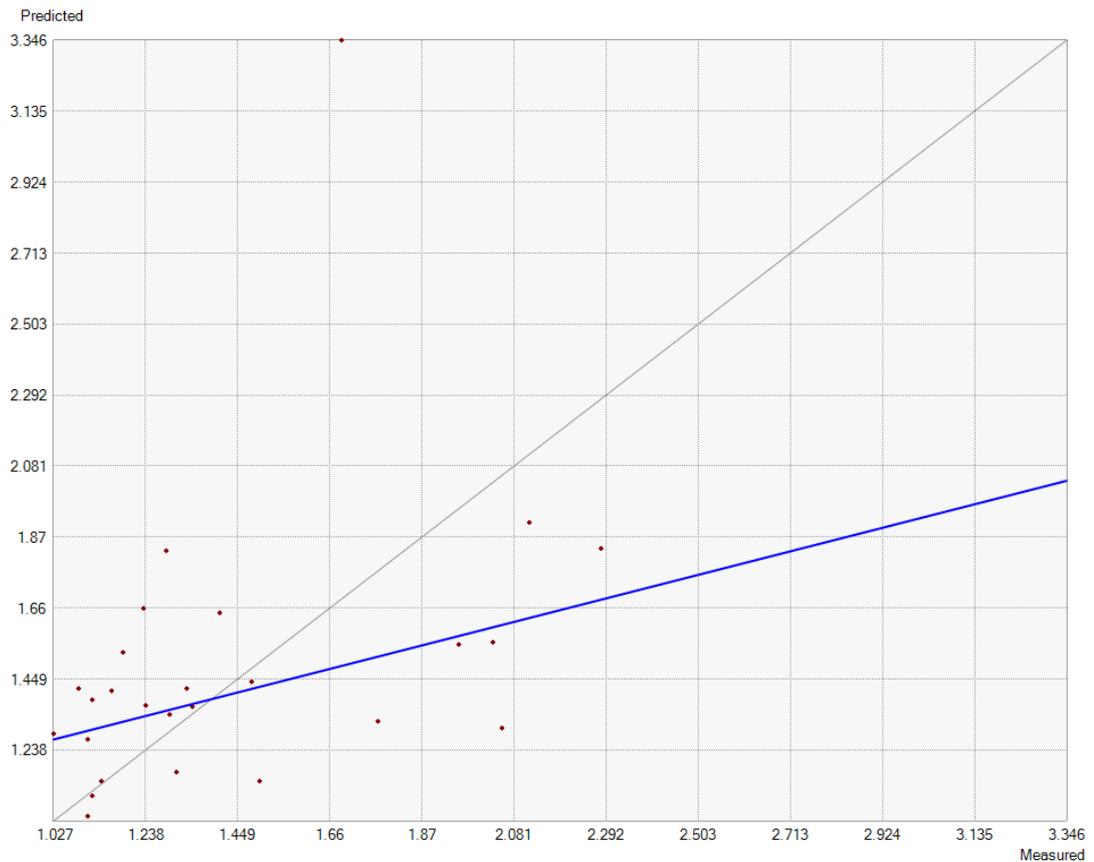
A pesar de que hubo un modelo de semivariograma que se ajustó de una mejor manera a los datos, se determinó que no existe un modelo que satisfaga al método Kriging para realizar una buena predicción. Esto se lo demuestra posteriormente en los resultados de la predicción.

#### **4.7.2.1. Validación cruzada**

La técnica geostadística de validación cruzada consiste en estimar cada punto a partir de los puntos vecinos, sin que el punto en cuestión intervenga en el proceso de estimación. Esta operación se repite para todos los puntos del conjunto de datos, obteniéndose finalmente una imagen de los errores de restitución o experimentales (Abarca, F., Chica, M., 2001).

Para la validación cruzada el ArcGIS compara los valores medidos con los predichos y los grafica en un sistema de coordenadas. En la Figura 63, se muestra la relación existente entre los valores medidos y los que el método Kriging predijo a partir de los mismos.

Una buena correlación se tiene cuando la línea azul parte del origen y se aproxima a la dirección de la línea gris, es decir su pendiente es lo más próxima a 45° (Piñeiro, G., Perelman, S., Guerschman, P., Paruelo, J., 2008). La pendiente que se obtuvo en el presente análisis fue de aproximadamente 14° y la línea no pasó por el origen, esto sumado al valor  $R^2$  de 0.14, indicó que por validación cruzada no existió una buena correlación entre los datos medidos y los de predicción.



**Figura 63. Validación cruzada método Kriging RAS ° muestreo octubre 2014**

En la Tabla 53, se observa la diferencia reflejada en la gráfica y el porcentaje de error diferencial.

**Tabla 53.**  
**Tabla de validación cruzada método Kriging Ordinario RAS ° octubre 2014**

Punto	V. Medido	V. Predicción	Error	% Error
1	1.16	1.42	0.26	18.31
2	1.24	1.37	0.13	9.49
3	2.05	1.3	-0.75	57.69
4	1.41	1.65	0.24	14.55
5	1.33	1.42	0.09	6.34
6	1.03	1.29	0.26	20.16
7	1.48	1.44	-0.04	2.78
8	2.03	1.56	-0.47	30.13
9	1.08	1.42	0.34	23.94
10	1.31	1.17	-0.14	11.97

Punto	V. Medido	V. Predicción	Error	% Error
11	1.5	1.15	-0.35	30.43
12	1.12	1.39	0.27	19.42
13	1.11	1.04	-0.07	6.73
14	1.14	1.15	0.01	0.87
15	1.77	1.33	-0.44	33.08
16	1.19	1.53	0.34	22.22
17	1.34	1.37	0.03	2.19
18	1.23	1.66	0.43	25.90
19	2.28	1.84	-0.44	23.91
20	1.29	1.83	0.54	29.51
21	1.95	1.55	-0.4	25.81
22	1.29	1.35	0.06	4.44
23	2.11	1.91	-0.2	10.47
24	1.11	1.27	0.16	12.60
25	1.1	1.1	0	0.00
26	1.68	3.35	1.67	49.85

#### 4.7.3. Predicción del método Kriging

Como último paso del análisis geoestadístico está la predicción del método a partir de los datos existentes. En esta etapa se realizan estimaciones de la variable en los puntos no muestrales, considerando la estructura de correlación espacial seleccionada e integrando la información obtenida de forma directa en los puntos muestrales, así como la conseguida indirectamente en forma de tendencias conocidas (Moral Garcia, 2004).

Se observó que para la cantidad existente de datos no fue posible obtener errores aceptables. La cantidad de puntos muestreados que se tenga disponibles y por ende las distancias entre ellos tienen una gran importancia en el análisis geoestadístico. Entre más cerca estén los puntos entre sí, se podrá obtener una mejor correlación y predicción de los puntos intermedios o no determinados. La cantidad de puntos requeridos depende de la variable a estudiar y del área que se esté tomando en cuenta en el estudio (Dick, J., Gerard, D.M., 2007).

Para variables de concentraciones en agua se han obtenido resultados confiables en B. Nas (2009) en el estudio de calidad de agua subterránea en Konia Turkia con 156 muestras en un área de estudio de 427.5 km<sup>2</sup>. En Funes (2004) se requirió

de 114 datos analizados para el acuífero de Tucson en un área de 0.057 Ha, en Eslami, H., Dastorani, J., Javadi, M., Chamheidar, H. (2013) se requirieron de 73 datos para un área de estudio de 453.2 Km<sup>2</sup> para la evaluación de la calidad de agua subterránea en Mianab Plain Iran.

Se presenta a continuación los resultados obtenidos en la predicción del método Kriging para la variable y período en análisis.

#### 4.7.3.1. Errores de predicción

Son los parámetros que indican la confiabilidad de los resultados obtenidos en la predicción. Los de mayor importancia son el error medio cuadrático (RMS), el error cuadrático medio estandarizado (RMSS) y el error estándar.

En la Tabla 54, se presenta los resultados de los errores de predicción obtenidos en el presente análisis en el programa ArcGIS.

**Tabla 54.**  
**Errores de predicción modelo Kriging ordinario RAS° octubre 2014**

Número de datos	26
RMS	0.4518
RMSS	1.1722
Error estándar promedio	0.353

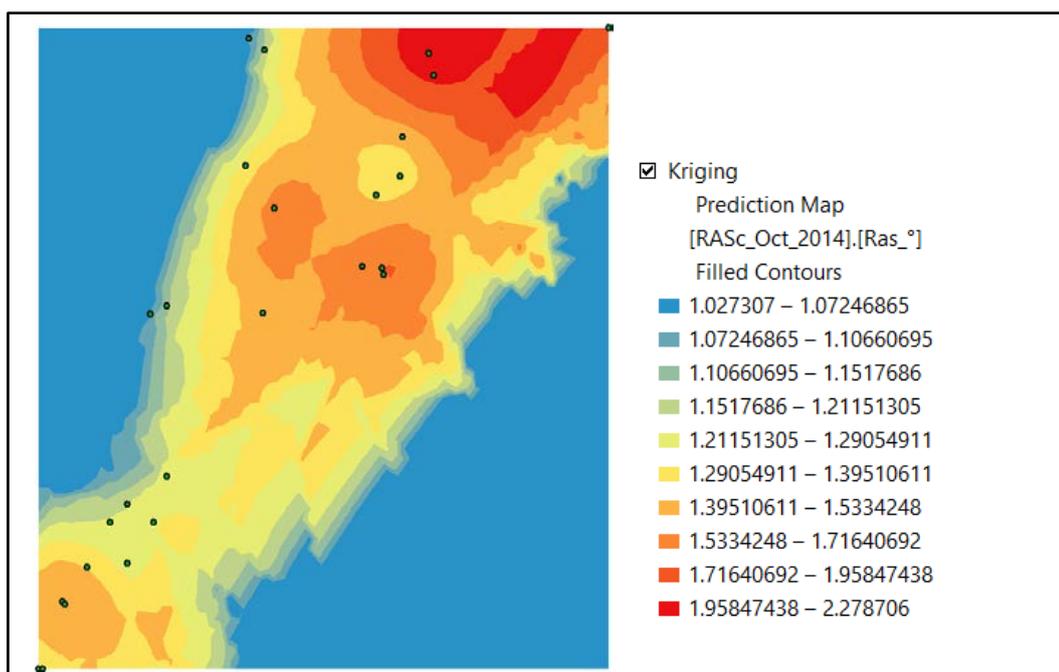
El RMS es un estimador utilizado para determinar la medida en la que el modelo no se ajusta a la información, un valor pequeño de este parámetro, mientras más se acerque a cero, indica una variación mínima y por lo tanto indica un buen estimador (Chai, T., Draxler, R., 2014).

En este caso que el RMS es más grande que el error estándar, el modelo representó la variabilidad de modo demasiado inexacto. Además al tener un RMSS mayor a uno, se subestima la variabilidad (Koch, A., Cabrera, P., 2010).

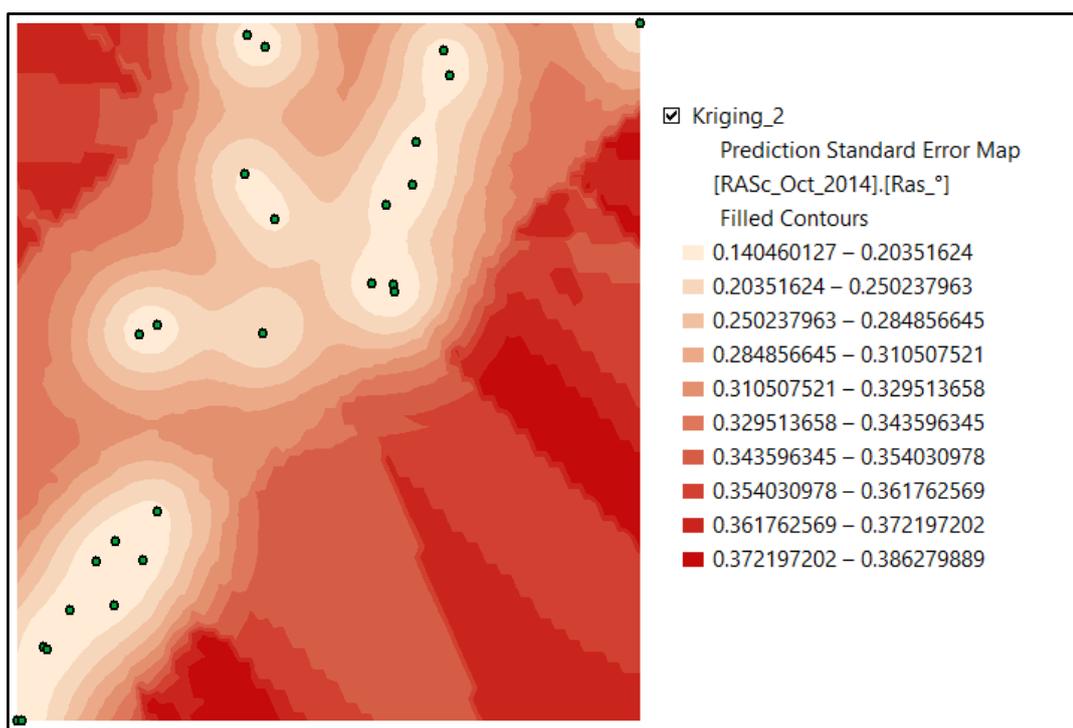
#### 4.7.3.2. Mapa de predicción

Como resultado de la predicción mediante el método Kriging, el programa elaboró un mapa en donde se puede conocer el valor de la variable estudiada, en este caso RAS°, en cualquier punto dentro del conjunto de datos con los que se trabajó inicialmente. Además de este mapa, el programa elaboró un mapa de errores estándar, en el que se puede saber el margen de error que existe en cada punto que se desea predecir. Los dos mapas en conjunto deben ser analizados para poder dictaminar con certeza si el valor predicho está dentro de un rango de confiabilidad.

En las Figuras 64 y 65, se muestran los mapas de predicción y error estándar como resultado de la aplicación del método probabilístico en la presente investigación.



**Figura 64. Mapa de predicción Kriging ordinario RAS° octubre 2014**



**Figura 65. Mapa de errores de predicción método Kriging ordinario RAS° octubre 2014.**

La confiabilidad de un modelo geoestadístico se puede determinar en porcentaje como 100 restado el mayor error estándar obtenido en el mapa de predicción de error o el error estándar promedio obtenido. Se considera un modelo con buena confiabilidad cuando esta supera el 90% (Menéndez, 2012).

La confiabilidad del modelo Kriging en la presente investigación con 26 datos disponibles fue de 64.7 % considerando el error estándar promedio y de 61.4% considerando el error estándar máximo.

Los resultados de predicción con el modelo que más se ajustó tuvo un porcentaje de confiabilidad promedio de 63% debido principalmente a la baja cantidad de datos, si se lo compara con el nivel de confiabilidad de acuerdo a Menéndez (2012) este modelo no fue confiable, por lo que existe la necesidad de densificar los datos en la zona para obtener una mejor correlación entre valores de datos y por ende una mejor predicción, sin embargo la confianza de los resultados del modelo se lo debe analizar también de acuerdo al rango de variación de la variable estudiada para aceptar o rechazar los resultados, en el caso del RAS corregido se tiene un mayor

rango de variación para definir la clase de agua de acuerdo a este parámetro pero para el caso de salinidad efectiva y potencial este rango es reducido por lo que se requeriría para estas variables una confiabilidad mayor del modelo.

Por consiguiente debido al número de datos disponibles realizar mapas con la técnica de geoestadística en este estudio no fue viable y considerando que los técnicos que administran el recurso hídrico necesitan observar comportamientos a través de mapas se realizó la interpolación mediante la técnica determinística IDW. Tal como se lo realizó en A. Ambica ,K. Ilayaraja (2012) en la investigación “Evaluación de la Calidad del Agua Subterránea usando el Índice de Calidad del Agua (WQI) – cerca del área industrial de North Chennai” y en Adebayo, O., Abimbola, Y., Kolawole, O., Taiwo, O. (2013) en la investigación “Mapeo de la calidad del agua de los ríos utilizando la interpolación inversa a distancia en la cuenca del río Ogun-Osun, Nigeria”, en donde se realizó la elaboración de mapas de distribución espacial de las variables mediante el método de interpolación determinístico IDW.

#### **4.8. Análisis determinístico**

Se conoce que por el tipo de variables de tipo aleatorio que se manejó en el presente proyecto, un método determinístico no es lo más adecuado para realizar una interpolación, ya que dichos métodos son utilizados para variables fijas. Los modelos determinísticos son aquellos donde se supone que los datos se conocen con certeza, es decir, se supone que cuando el modelo sea analizado se tiene disponible toda la información necesaria para la toma de decisiones (Hernández, 2011).

Sin embargo, un modelo determinístico como el IDW, que fue el utilizado en este caso, puede arrojar resultados más cercanos a la realidad cuando el conjunto de datos no es muy grande y los modelos geoestadísticos no pueden dar respuestas confiables (Villatoro, M., Henríquez, C., Sancho, F., 2008).

Kravchenko (2003), recomienda el IDW para bases de datos pequeñas, en donde los parámetros del variograma no son conocidos, también cuando la distancia de muestreo es muy grande e incluso para cuando la distancia de muestreo es mayor al

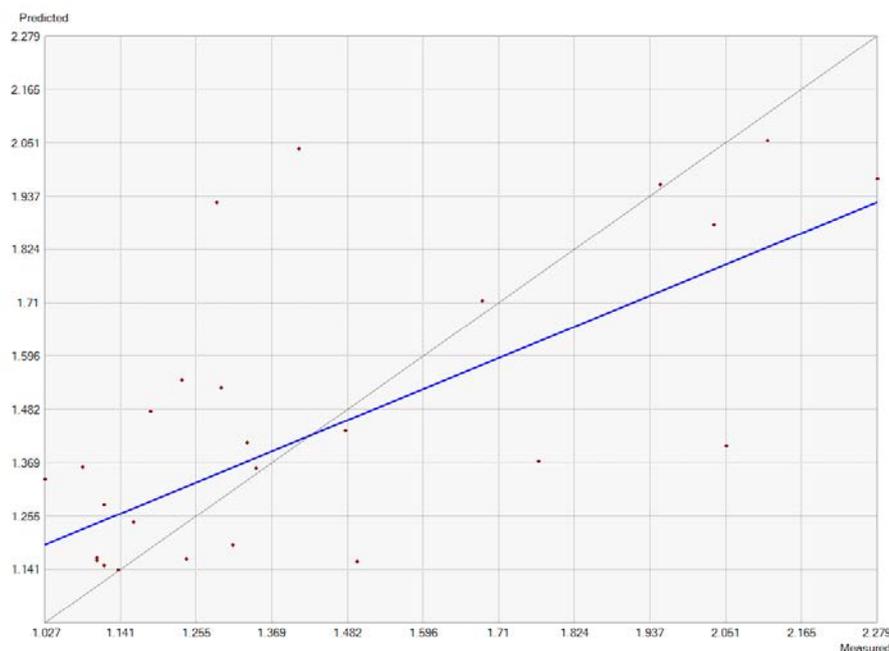
rango de la correlación espacial. Con relación a esto es importante mencionar que la precisión de las estimaciones es influenciada por la varianza aleatoria, la estructura de variación, y por la intensidad de muestreo (Lozano, Z., Bravo, C., Ovalles, F., Hernández, M., Moreno, B., Piñango, L., Villanueva, J., 2004).

El método IDW es similar al Kriging ordinario, ya que da más peso a los valores cercanos a un punto, pero posee una menor complejidad del cálculo. El IDW utiliza un algoritmo simple basado en distancias (Villatoro *et al.*, 2008).

Al igual que para el método Kriging, se realizó el análisis determinístico de la misma variable (RAS°) en el mismo período (Octubre 2014), para comparar los resultados y concluir que método y que modelo es el más adecuado en esta investigación. Así mismo, se realizó para el resto de variables y períodos.

#### 4.8.1. Validación cruzada

En la Figura 66, se muestran los resultados de la relación entre los valores medidos con los valores interpolados por parte del método IDW.



**Figura 66. Validación cruzada método IDW RAS° octubre 2014**

Se observó que la línea no pasó por el origen pero la pendiente resultante es de aproximadamente  $30^\circ$  y el valor de  $R^2$  llega a 0.44, estos valores indicaron a priori que existe una mejor correlación y que los resultados por este método son más aceptables en comparación con el método Kriging.

En la Tabla 55, se muestra también la diferencia reflejada en la gráfica y el porcentaje de error diferencial, que como se pudo comparar es menor que el método geoestadístico.

**Tabla 55.**  
**Tabla de validación cruzada método IDW RAS<sup>o</sup> octubre 2014**

Punto	V. Medidos	V. Interpolados	Error	% Error
1	1.160	1.242	0.082	7.07
2	1.239	1.164	-0.075	6.05
3	2.051	1.406	-0.645	31.45
4	1.408	2.037	0.629	44.67
5	1.331	1.413	0.082	6.16
6	1.027	1.334	0.307	29.89
7	1.479	1.437	-0.042	2.84
8	2.032	1.878	-0.154	7.58
9	1.084	1.361	0.277	25.55
10	1.309	1.194	-0.115	8.79
11	1.497	1.160	-0.337	22.51
12	1.116	1.281	0.165	14.78
13	1.105	1.161	0.056	5.07
14	1.137	1.141	0.004	0.35
15	1.769	1.373	-0.396	22.39
16	1.186	1.480	0.294	24.79
17	1.344	1.358	0.014	1.04
18	1.233	1.547	0.314	25.47
19	2.278	1.974	-0.304	13.35
20	1.285	1.925	0.640	49.81
21	1.952	1.962	0.010	0.51
22	1.293	1.530	0.237	18.33
23	2.114	2.057	-0.057	2.70
24	1.105	1.167	0.062	5.61
25	1.116	1.150	0.034	3.05
26	1.684	1.714	0.030	1.78

#### 4.8.2. Errores de predicción

Al tratarse de un modelo matemático y no probabilístico, en el IDW el programa solo reporta el valor de RMS, que como se había mencionado debe ser lo más cercano a cero para validar los resultados.

En el análisis de la variable para 26 datos se obtuvo un valor de RMS de 0.284, que es mucho menor al obtenido en el análisis geoestadístico. También este valor reflejó que el modelo determinístico es el que más se ajustó para el conjunto de datos en estudio.

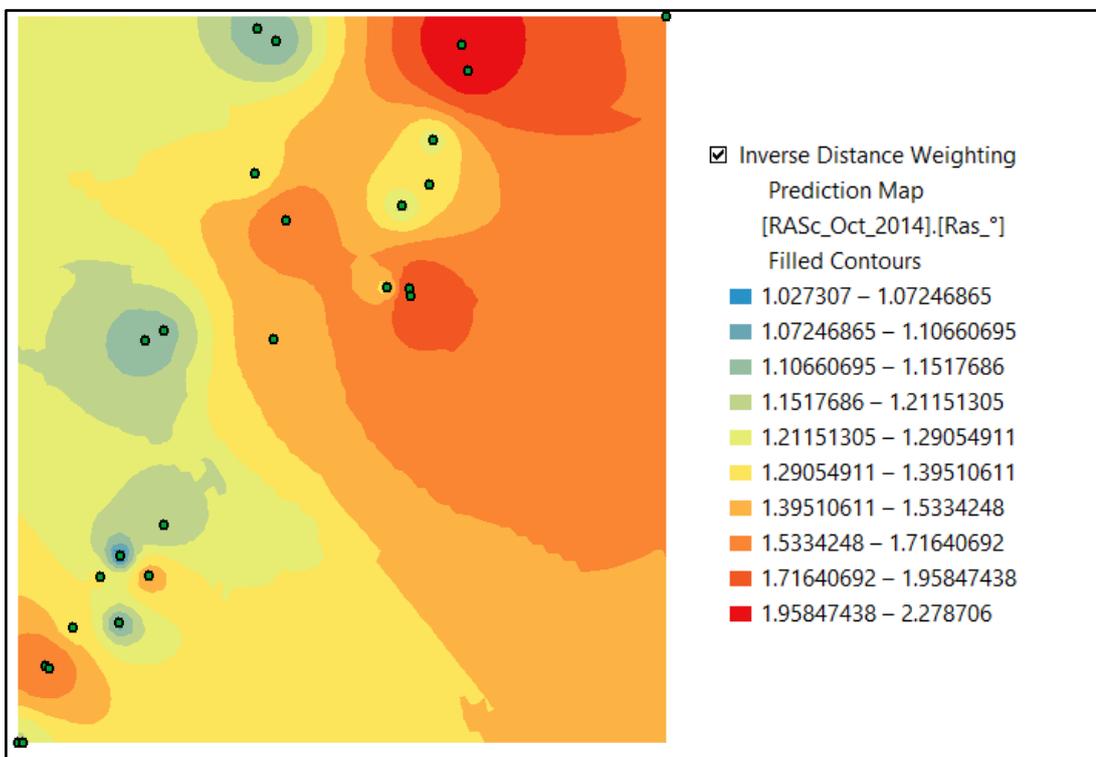
Para estudios similares donde las variables estudiadas son parámetros de calidad de agua en Taghizadeh Mehrjardi *et al.* (2008) y en Eslami *et al.*, (2013) se obtuvieron mejores resultados en la predicción usando los métodos de interpolación de geoestadística, pero se debe enfatizar que en estos estudios se contó con una buena base de datos (73 puntos de muestreo), por otro lado en Adebayo *et al.* (2013) que se contaba con 27 datos, se utilizó el método de IDW corroborando así que para una escasa cantidad de datos IDW es más idóneo ya que no requiere de la realización de variogramas y tiene una menor complejidad de cálculo que el método de Kriging ordinario (Villatoro *et al.*, 2008).

#### 4.8.3. Mapa de interpolación

El resultado de la interpolación realizada por el ArcGIS mediante el método IDW, es el que se muestra en la Figura 67. De este mapa se puede conocer el valor de la variable en cualquier punto dentro de los límites del conjunto de datos y en el tiempo que se realizó el muestreo. Por lo tanto, el IDW es una herramienta útil para indicar las condiciones de la zona de estudio en el momento del muestreo, además no se pretendió realizar una predicción en el tiempo con esta técnica

En teoría el valor leído en el mapa es fijo, es decir no tiene ningún error ya que el método a diferencia de Kriging no realiza predicciones sino una interpolación. Esto sería verdad en el caso de que las variables también fuesen fijas, sin embargo se conoce que las variables en estudio son variables en el tiempo, entonces para este caso el mapa de resultados son reales en el espacio y tiempo monitoreado, pero la

interpolación de los datos por lo analizado anteriormente es más exacto que en el modelo geoestadístico.



**Figura 67. Mapa de predicción metodo IDW RAS° octubre 2014**

#### **4.9. Plan de manejo de la subcuenca del río Ambi**

Los resultados obtenidos en los modelos de este trabajo demostraron que en la actualidad algunos parámetros no cumplen con la norma ambiental para riego, preservación de la vida acuática y silvestre y demás usos ambientales del Ecuador (TULSMA 2015, Acuerdo 140). Dichos parámetros principalmente tienen que ver con la carga orgánica presente en el agua del río Ambi, parámetros que son los críticos y por ende condicionan su uso en todas las actividades.

El objetivo del plan de manejo para la presente investigación, se limitó a proponer ciertas recomendaciones en beneficio de la calidad futura del agua del río Ambi, así como también del control de dicha calidad mediante aparatos de medición de caudales que a futuro permitan realizar un muestreo de campo conociendo los caudales reales al momento del muestreo, factor que es importante en un modelo de calidad y que en esta investigación no se lo pudo lograr justamente por falta de estaciones de control.

El escenario analizado para el año actual (2016), no consideró la intervención de algún tratamiento de aguas residuales que pueda disminuir las concentraciones críticas del río. Sin embargo, en la actualidad ya se están implementando plantas de tratamiento en las principales ciudades dentro de la subcuenca, como son Ibarra y Otavalo. Se pretende que ambas, entren en funcionamiento en los años 2017 y 2018 respectivamente (AME, 2016).

La calidad del río Ambi tendrá una mejora cuando dichas plantas entren en operación, sin embargo, esta mejora se dará en ciertos tramos donde desembocan las aguas residuales de estas ciudades. El resto del río Ambi no quedó solucionado desde el punto de vista de su calidad y por ende su potencial uso en actividades agrícolas.

Bajo estos hechos, en el presente plan de manejo se pretendió presentar dos escenarios. El primero de ellos fue con el modelo de calidad obtenido en el programa HEC-RAS para el año 2020, en donde se supone entrarán en actividad las plantas de tratamiento mencionadas de Ibarra y Otavalo. El segundo fue con la calidad

proyectada al año 2040, donde se asumió que otras ciudades importantes dentro de la subcuenca tales como Cotacachi y Atuntaqui traten sus aguas residuales, esta hipótesis no es irreal en vista de que el saneamiento de las aguas está siendo implementada en varias ciudades especialmente en las provincias de Azuay e Imbabura (La Hora, 2016).

#### **4.9.1. Reutilización de aguas residuales**

La utilización de aguas residuales en agricultura, tratadas o sin tratar, es una opción que empieza a tomar peso en diversas zonas del planeta, como una respuesta alternativa al creciente déficit hídrico, y sobre todo, a la fuerte competencia entre las zonas urbanas y periurbanas por agua dulce. Se calcula que a nivel mundial, 20 millones de hectáreas (7% de las tierras de regadío) se abastecen de aguas residuales tratadas o parcialmente tratadas (UN-Water, 2013).

El déficit hídrico puede deberse a factores climáticos, como sequías recurrentes, y también a la contaminación de las aguas superficiales y los acuíferos por diversas fuentes, lo que provoca una reducción de la cantidad de agua segura para el consumo. Una de estas fuentes es la disposición irresponsable de las aguas servidas. En la medida que se busca evitar este problema medioambiental y de salud, se propone el agua residual como parte de la solución en lugar del problema. El agua residual puede generar un valor agregado para los usuarios urbanos, los agricultores y el medio ambiente (PROSAP, 2013).

En el Ecuador se ha empezado a poner en consideración, en especial en las principales ciudades, la implementación de plantas de tratamiento para recuperación de los cuerpos de agua y reutilización, con el fin de aumentar el porcentaje de cobertura de tratamiento de las aguas residuales, que en el país es del 5% en el año 2000 y para el año 2016 según la SENAGUA, el 12% de las aguas que se emplean en el consumo humano recibe un tratamiento adecuado antes de su descarga en ríos y quebradas (La Hora, 2016). Pese a este crecimiento observado en los últimos 16 años, el Ecuador es el quinto país que menos cobertura de tratamiento de sus aguas residuales tiene en América Latina (Silva, 2015). Por esta razón existe la necesidad en el país de aumentar la cultura de la reutilización de las aguas de los ríos

contaminados que se convierten en un riesgo para la salud de las personas y la preservación del medio ambiente.

#### **4.9.2. Niveles de tratamiento de aguas residuales**

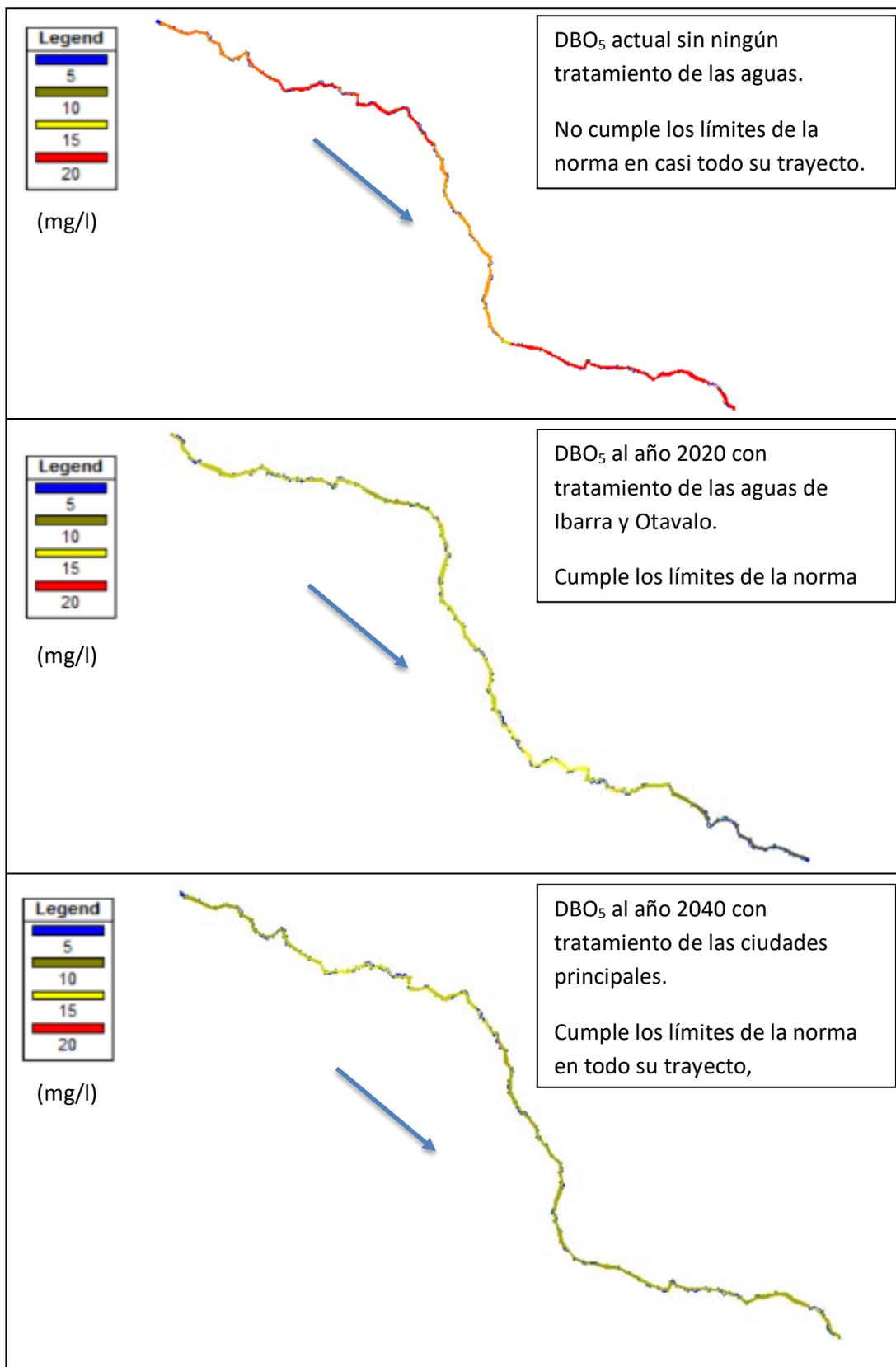
Dependiendo del uso que se le quiera dar al agua de un río, existen diversos niveles de tratamiento con los cuales se alcanza la remoción de la parcialidad o la totalidad de los materiales contaminantes. A continuación se describen dichos procesos de tratamiento para aguas residuales según lo indicado por PROSAP (2013):

- Preliminar: Este proceso es un filtrado grueso (normalmente una malla metálica), eliminando sólidos grandes.
- Primario: Este proceso se basa en la sedimentación de los materiales sólidos, recibe el nombre de tanque de sedimentación primario. Las partículas sólidas se asientan en el fondo y los aceites y grasas suben a la superficie. El material es eliminado como fango, éste suele recibir otro tratamiento.
- Secundario: Este es un proceso biológico que trata la materia orgánica disuelta presente en el agua. Se realiza en un tanque de aireación, donde los microorganismos consumen la materia orgánica, la después la mezcla se clarifica y pasa a un sedimentador secundario y el residuo es eliminado como fango para un proceso posterior.
- Terciario: es un proceso para la eliminación de contaminantes específicos con el fin de alcanzar una calidad del efluente al estándar requerido antes de que éste sea descargado al ambiente receptor.
- Procesamiento de fangos y material sólido: la mezcla proveniente de los procesos primario y secundario se procesa en un digestor anaerobio, produciendo biogás, agua y lodos estabilizados. Estos lodos se utilizan en paisajismo como enmienda.

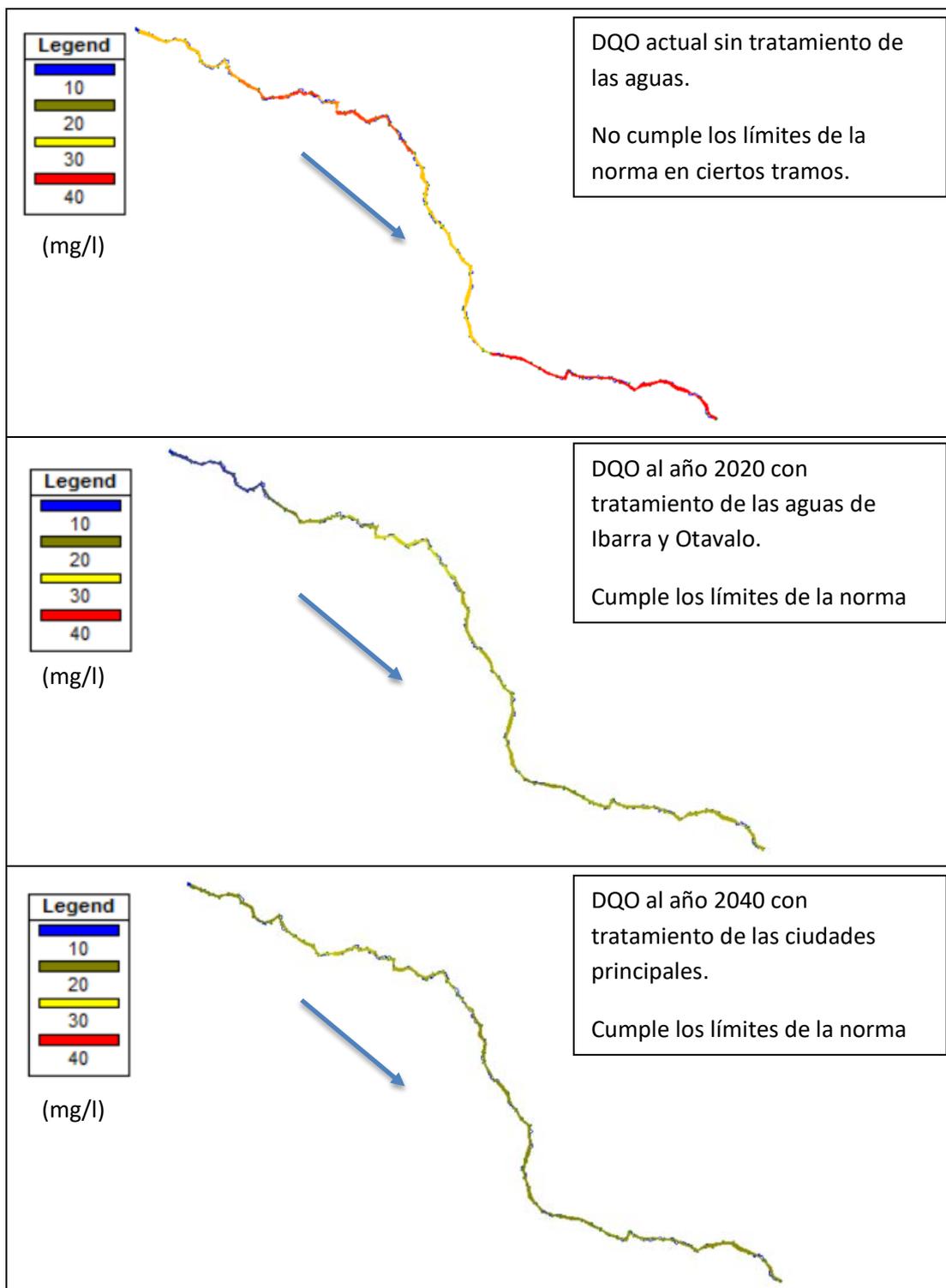
### 4.9.3. Calidad futura del río Ambi

Como se mencionó anteriormente, en la actualidad se están implementando dos plantas de tratamiento que pretenden reducir la contaminación y las concentraciones del agua del río Tahuando y Jatunyacu a un nivel terciario. Esto significa, remover las concentraciones orgánicas como DBO<sub>5</sub> y DQO en un 90%, las concentraciones inorgánicas tales como nitratos y fosfatos en un 50% y disminuir los coliformes fecales a 1000 NMP/100 ml aproximadamente en procesos de cloración (Franco, 2016).

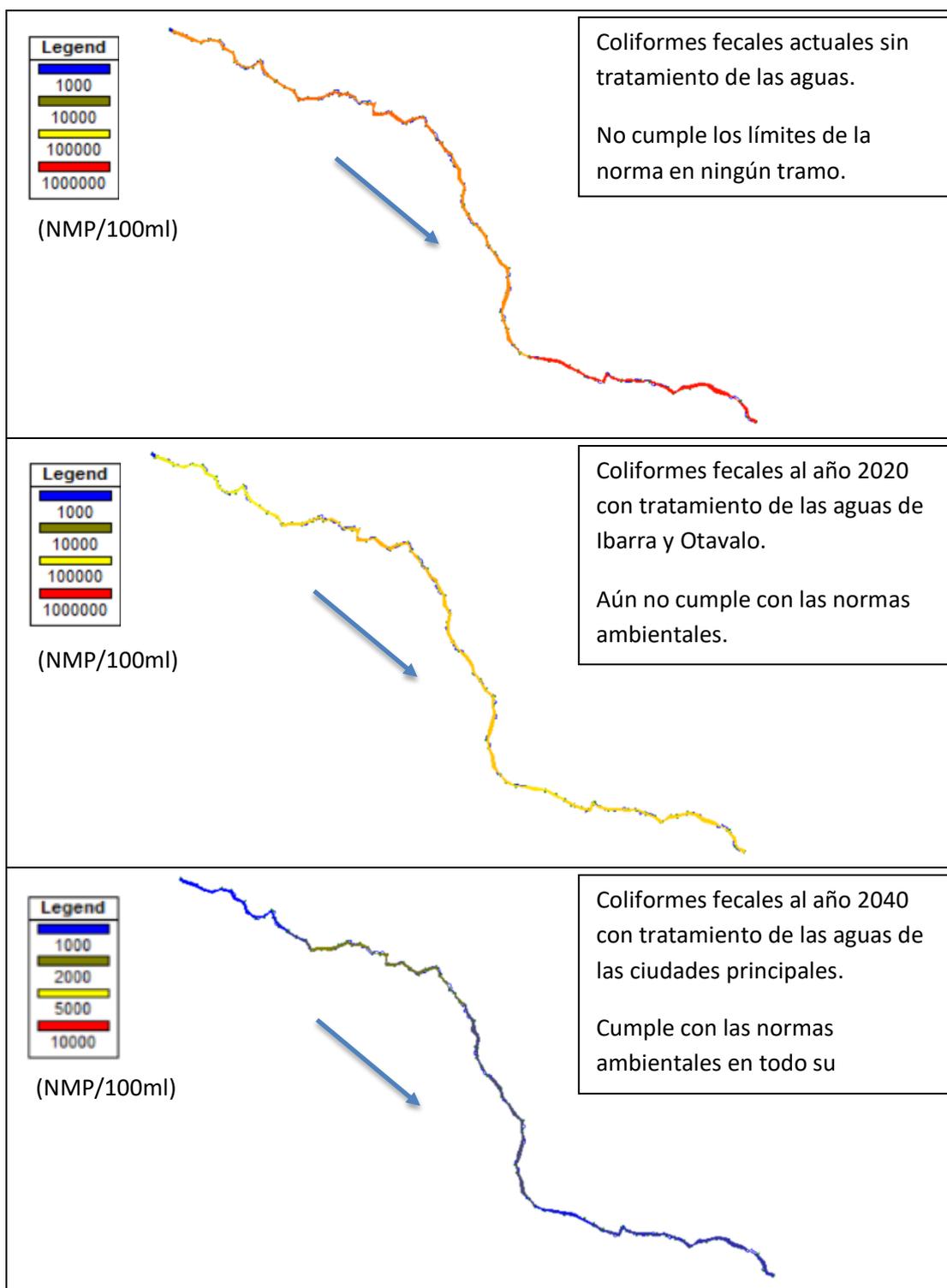
Tanto el río Tahuando como el Jatunyacu, reciben las descargas sanitarias de las poblaciones de Ibarra y Otavalo respectivamente que son las mayores aportantes de contaminación indirecta al río Ambi. Al año 2040, con un nivel de tratamiento terciario similar a los de Ibarra y Otavalo, se reducirá las concentraciones principalmente de los ríos Pichaví y la quebrada Timbibiche que receiptan las aguas servidas de las parroquias de Cotacachi y Atuntaqui respectivamente, además de esto se asumió que el resto de parroquias dentro de la subcuenca del Ambi, también realizarán un tratamiento de sus aguas por lo menos a nivel primario con el fin de reducir parte de su materia orgánica contaminante. Con esto se consiguió reducir los niveles de contaminación al punto de poder utilizar las aguas del río Ambi para todo uso. En las Figuras 68, 69 y 70, se muestran los niveles de concentración de los parámetros que resultaron críticos en la actualidad (año 2016) y se los comparó con la calidad futura considerando los tratamientos de las aguas de las ciudades principales al 2020 y 2040. La comparación se la realizó para caudal medio ya que es el escenario que representa al río en la mayor parte del año.



**Figura 68. Comparación de la concentración de DBO<sub>5</sub> actual y futura río Ambi**



**Figura 69. Comparación de la concentración de DQO actual y futura en el río Ambi**



**Figura 70. Comparación de la concentración de Coliformes Fecales actual y futura en el río Ambi**

Los nitratos como se presentó anteriormente en los resultados de la calidad, no representaron ningún problema en cuanto a sus concentraciones para el año 2016, por este motivo no entran en consideración en este plan ya que se entiende que se controlará el aumento excesivo de estos nutrientes en el río Ambi con los tratamientos mencionados en los años futuros, sin embargo, es importante seguirlos monitoreando para evitar daños ambientales. En el caso de los fosfatos existen niveles de concentración que superan los límites para el inicio de la eutrofización y que por lo tanto deben ser controlados, especialmente si se pretende construir obras de captación en donde el embalsamiento del agua acelera este proceso ocasionando aumento de algas y materia orgánica, lo cual perjudica a la calidad del agua (Carrera *et al.*, 2011).

La Organización Mundial de la Salud (OMS), sugiere los procesos de tratamiento para la reutilización de las aguas de un río en actividades como riego y recreación, es decir permite el uso del agua de efluentes residuales sometidos a procesos de tratamiento bacteriológico. La OMS concluyó que un tratamiento a nivel primario es suficiente para permitir la reutilización del agua para riego en cultivos que no sean para el consumo humano directo. Para el caso de cultivos de consumo humano directo sugiere procesos a nivel secundario y terciario dependiendo del tipo de cultivo (Ayers & Westcot, 1987).

En el caso del río Ambi, sus aguas se utilizan en actividades agropecuarias, artesanales y textiles principalmente. En cultivos de consumo humano directo como habas, frejol, maíz, tomate, pimiento, caña de azúcar, etc se toman de proyectos de riego derivados del río Ambi (Flores, 2010). Por esta razón, la OMS sugiere a diferencia de la norma ambiental ecuatoriana, que los coliformes estén por debajo de los 100 NMP/100ml y que se controle que no existan productos químicos que conduzcan a residuos indeseables en cultivos o peces.

Por otra parte el problema de salinidad que presentó el río Ambi en algunos puntos al estar condicionada o ser no recomendable para riego llevó a tratar este problema para aumentar el rendimiento de los cultivos. Las formas de reducir la salinidad son mediante el lavado de los suelos que se realizan mediante aplicaciones

de dosis de riego elevadas que desplazan las sales a través del suelo hacia horizontes profundos lejos del sistema radicular del cultivo y donde puedan ser evacuadas por los drenajes. Otra opción es plantar cultivos más tolerantes, que en condiciones de elevada salinidad, alcanzan rendimientos altos de producción (palmera, algodón, cebada etc.).

Una forma de controlar la salinidad, es también cambiar el sistema de riego a goteo, la facilidad con la que un sistema de goteo permite gestionar el agua de riego posibilita un mejor control de la salinidad del suelo. Este sistema permite aplicar el riego de forma más frecuente y a bajas dosis, por lo que se favorece que la zona del suelo donde se desarrollan las raíces se mantenga con un elevado contenido de agua. Esto produce una reducción del estrés hídrico, y a la vez, mantiene una concentración salina uniforme. La cuenca del río Ambi se consideró apta para este sistema de riego debido a que el índice de Langelier de sus aguas fue siempre positivo. Por último, se aconseja utilizar fertilizantes con bajo índices de sales o fraccionar la aplicación (Agrosal, 2016).

#### **4.9.4. Monitoreo de la calidad del río Ambi**

Un proceso de tratamiento de aguas residuales, parte de un modelo de calidad en el cual se pueda determinar el nivel de concentraciones de diferentes parámetros que se desean remover en dichos procesos. A su vez, un modelo de calidad necesita de estaciones de control de caudales que permitan en el momento de una toma de muestras en campo, conocer el caudal que pertenece a la calidad de la muestra tomada en cualquier punto. Debido a lo mencionado, se recomienda para investigaciones futuras, y debido a la importancia del río estudiado, la instalación de estaciones de control de medición de caudales en más puntos a lo largo del río Ambi y en toda su cuenca.

La presente investigación puede servir de referencia para conocer los puntos de instalación de dichas estructuras, los mismos que pueden ser los muestreados a lo largo del río Ambi y que se presentaron en esta investigación. De esta manera se

pueden mejorar los modelos presentados en este proyecto y reducir el tiempo y los costos en el caso de algún estudio para un proyecto que requiera el uso del río Ambi, ya que al faltar estas estaciones de control, se debe recompensar con un intenso y prolongado muestreo en cada punto. En el Ecuador, la poca generación de datos determina la calidad y precisión de los modelos en investigaciones y proyectos que requieran de información específica, por lo que las estaciones de control recomendadas resultarían de gran ayuda para futuros estudios dentro de la subcuenca del río Ambi.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. Conclusiones

- Del análisis de la composición inorgánica y por la familia química al que pertenecen las aguas de la cuenca del río Ambi (bicarbonatadas sódicas cálcicas y magnésicas), se concluye que este tipo de aguas representan riesgos para el uso agrícola. El alto contenido de bicarbonatos combinados con el calcio y magnesio aumenta la cantidad del RAS y el pH del agua y pueden provocar daños en los cultivos principalmente los que no son tolerables a las sales.
- Del análisis de los parámetros inorgánicos se observó que las muestras tomadas en la quebrada de Tumbabiro pertenecen a otro grupo de familias hidrogeoquímicas, aduciendo este cambio de composición a su ubicación ya que se encuentra fuera de la cuenca del río Ambi, lo que indica que las aguas cambian su composición química de cuenca a cuenca.
- Se mostró que el método de cálculo de caudales hidráulicos de Sandoval y Aguilera (2014), es aplicable a las condiciones de la cuenca del río Ambi ya que debido a la poca información hídrica con una sola estación hidrológica en la zona, se logró obtener con bastante precisión caudales medios, mínimos y máximos disponibles en el río.
- Para un buen ajuste del modelo de calidad se consideró a los caudales concesionados y desviados por los proyectos agrícolas de la zona, los mismos que afectan a la calidad debido a que dentro del caudal desviado se toma también parte del caudal sanitario, esto conlleva a una disminución de las concentraciones orgánicas en el mismo.

- Del modelo de calidad se observó que la situación actual del río Ambi, especialmente para los parámetros orgánicos como DBO<sub>5</sub>, DQO y CF, no fue favorable. Para el caudal medio se tiene valores al límite de la normativa para preservación de la vida acuática y al empeorar la situación con menores caudales en el río se concluyó que es indispensable y fundamental el tratamiento de aguas en años futuros, de lo contrario se llegarán a niveles de contaminación que acabará con la vida acuática y el uso del recurso será inasequible tal como se lo predijo en los modelos de calidad de 2020, 2030 y 2040.
- De la modelación hidrológica realizada con HEC-HMS a partir del método del SCS y la metodología propuesta por Sandoval y Aguilera (2014), se tienen resultados muy cercanos y al necesitar este último método menos parámetros como datos de entrada, resultó más aplicable y factible para el proyecto.
- Para obtener resultados más confiables con el modelo HEC-HMS se necesitó obtener una serie de parámetros de entrada como la morfología, número de curva, hietogramas de precipitación y tiempos de retardo de la cuenca; de la confiabilidad y calidad de estos datos dependen los buenos resultados del programa, por lo que, en algunos casos resulta inaplicable este método pues no siempre se cuenta con la información requerida.
- El análisis de componentes principales es fundamental para conocer que iones son los más representativos dentro de toda la subcuenca. De este modo se redujo el tiempo de análisis en parámetros que no resultaron representativos dentro de la subcuenca del Ambi.
- Los parámetros representativos pueden variar de acuerdo al tiempo de muestreo, es decir para épocas de lluvia y estiaje no necesariamente los

componentes principales resultan los mismos, ya que la lluvia tiene su influencia en la variación de la concentración de los parámetros.

- El análisis multitemporal indicó que no necesariamente existe una relación inversa entre precipitación y concentraciones en el agua ya que, debido a factores como el intemperismo, la introducción de iones del agua subterránea y el lavado de suelos pueden afectar las concentraciones de los iones en el agua alterando así las relaciones existentes entre la precipitación y las concentraciones.
- En zonas agrícolas, como es el caso de la subcuenca del río Ambi, es importante realizar el estudio de concentraciones de los parámetros inorgánicos, ya que por lo general, a lo largo del año se riegan los cultivos con agua que como se comprobó en este proyecto, presenta riesgos principalmente desde el punto de vista de la salinidad, especialmente en la época de sequía. Esto a la larga lleva a producir cultivos de mala calidad e incluso dañarlos por desconocimiento de su calidad inorgánica.
- Los semivariogramas teóricos que se escogen para un modelo geoestadístico, deben ser comparados con un semivariograma experimental como una especie de comprobación de ajuste a los datos. Se debe escoger el semivariograma que menor error arroje, que para el presente proyecto fue variable de acuerdo al parámetro analizado.
- Un análisis determinístico como el IDW no debe ser aplicado para variables que no sean fijas, sin embargo como se comprobó en esta investigación, para una cantidad pequeña de datos el error puede resultar menor que con un análisis geoestadístico.
- Ambientalmente, la reutilización de un cuerpo de agua en actividades agrícolas es importante ya que se forma un proceso de autoabastecimiento de agua de riego en la subcuenca, es decir el agua residual no es desechada sino reciclada.

- Proyectos de riego como La Victoria y Salinas están utilizando agua con una calidad fuera de los límites de la norma, especialmente en su contenido orgánico.
- Esta investigación permitió establecer que la calidad del agua de la subcuenca del río Ambi, desde un punto de vista agrícola y ambiental, no es la adecuada y que es necesario un tratamiento a nivel terciario de los principales focos de contaminación para asegurar la calidad y uso futuro en actividades de la zona.

## **5.2. Recomendaciones**

- Para obtener mejores resultados de un modelo de calidad se recomienda medir caudales en el momento del muestreo, con esto se logra conocer la relación entre el caudal y los parámetros medidos.
- Para realizar un análisis multitemporal en el que se pueda predecir y obtener una ecuación que represente el comportamiento de una variable a través del tiempo se recomienda aumentar los períodos de muestreo, en al menos un dato por cada mes durante dos años, debido a la variabilidad de las concentraciones respecto a las precipitaciones
- Para un análisis con un modelo geoestadístico es recomendable tener por lo menos 100 datos para realizar un modelo que pueda predecir de una manera adecuada el comportamiento de los parámetros en estudio.

## CAPITULO 6

### BIBLIOGRAFÍA

- A. Ambica ,K. Ilayaraja. (2012). Assessment Of Ground Water Quality Using Water Quality Index(WQI)-Near INDUSTRIAL AREA, North Chennai. *International Journal of Computer & Organization Trends – Volume 2 Issue 4 Number 1*, 44-54.
- A. B. L. Antonio. (2014). “Una revisión de la evaluación de la calidad de agua de los ríos de la provincia de Imbabura,”. *Universidad Técnica Particular de Loja*.
- Abad, O. (2014). Estimación de precipitación espacial mediante correlación con variables secundarias y la ayuda de tecnologías de información geográfica. *Proyecto de graduación previo a la obtención del Grado de Magister en Geomática*. Universidad de Cuenca, Facultad de Ingeniería.
- Abarca, F., Chica, M. (2001). Descriptor textual geoestadístico basado en validación cruzada: Aplicación a la clasificación de imágenes. *Teledetección, Medio Ambiente y Cambio Global*, 461-464.
- Adebayo, O., Abimbola, Y., Kolawole, O., Taiwo, O. (2013). Mapping of river water quality using inverse Distance weighted interpolation in Ogun-Osun river basin, Nigeria . *Landscape & Environment* 7 (2), 48-62.
- Agrosal. (2016). *Recomendaciones de salinidad*. Obtenido de La salinidad en la agricultura: [http://agrosal.ivia.es/recomendaciones\\_sal.html](http://agrosal.ivia.es/recomendaciones_sal.html)
- Aguilera, C., Martinez, E., R . (1996). Relaciones agua-suelo-planta-atmosferica . Mexico: Universidad Autonoma de Chapingo .
- Albert, L. . (2004). Toxicología ambiental. *Universidad Autónoma de Ciudad Juárez*. Mexico.
- Almeida, L. (2014). “Una revisión de la evaluación de la calidad de agua de los ríos de la provincia de Imbabura,”. *Universidad Técnica Particular de Loja*.
- Alvear, C., Carpio, J., Silva, M. (2006). Modelación Hidrológica para el pronóstico de caudales mediante la aplicación del Paquete HEC - HMS en la Cuenca del Rio Paute. *Tesis Facultad de Ingeniería Civil. ESPE. Sede Sangolquí*.

- Alvear, C., Carpio, J., Silva, M. (2006). Modelación Hidrológica para el pronóstico de caudales mediante la aplicación del Paquete HEC - HMS en la Cuenca del Rio Paute. *Tesis Facultad de Ingeniería Civil. ESPE. Sede Sangolquí.*
- Ambientum . (2002). *Revista ambientum*. Obtenido de Contaminacion del agua por materia orgánica :  
[http://www.ambientum.com/revista/2002\\_05/MATORG2.asp](http://www.ambientum.com/revista/2002_05/MATORG2.asp)
- AME. (2016). *Asociación de Municipalidades Ecuatorianas*. Obtenido de Ibarra tendrá planta de tratamiento de aguas residuales:  
<http://www.ame.gob.ec/ame/index.php/noticias/noticias-institucionales/1083-municipio-de-ibarra-tendra-planta-de-tratamiento-de-aguas-residuales>
- APHA. (1999). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*.
- ArcGIS. (2010). Manual de ArcGIS 10 .
- Ayers & Westcot. (1987). *Calidad del Agua para la Agricultura*. Obtenido de Calidad de agua para riego y reutilización de aguas residuales:  
<http://www.fao.org/docrep/003/t0234e/T0234E08.htm#ch7>
- B. Nas. (2009). Geostatistical Approach to Assessment of Spatial Distribution of Groundwater Quality . *Polish J. of Environ. Stud. Vol. 18, No. 6 , 1073-1082.*
- Barrenechea, M. (2004). *Aspectos físicoquímicos de la calidad del agua*. Obtenido de <http://www.bvsde.paho.org/bvsatr/fulltext/tratamiento/manualI/tomoI/uno.pdf>
- Bernal, E. (2013). *Bioestadística Básica para Investigadores con SPSS*. Bubok Publishing S.L.
- Bladé, E., Sánchez, M., Sánchez, H., Niñerola, D., Gómez, M. (2009). *Modelación numérica en ríos en regimen permanente y variable, una vision a partir de HEC-RAS*. Barcelona : Universidad Politécnica de Catalunya, SL.
- Cabrera, W. (2002). Propuesta de manejo de la subcuenca del río Ambi, provincia de Imbabura. *Tesis de ingeniería Agroforestal. Universidad Tecnológica Equinoccial.*
- Camacho, A., M.Giles, A.Ortegón, M.Palao, B.Serrano y O.Velázquez. (2009). Técnicas para el Análisis Microbiológico de Alimentos. 2da Edicion . *Facultad de Química, UNAM. México. Mexico.*
- Carmona, F. (2014). *Un ejemplo de ACP paso a paso*. Obtenido de <http://www.ub.edu/stat/docencia/Mates/ejemploACP.PDF>
- Carranza, Carlos., Lancho, O., Miranda, D., Chaves. (2009). Análisis del crecimiento de lechuga cultivada en un suelo salino de la Sabana de Bogotá.

- Carrera, D. (2011). Salinidad en suelos y aguas superficiales y subterráneas de la cuenca evaporítica de río Verde Matehualaca, San Luis Potosí. *Tesis presentada como requisito parcial para obtener el grado de Doctor en ciencias* . Mexico .
- Carrera, D., Guevara, P., Maya, M., Crisanto, T. (2015). Variations of Species Concentration in Inorganic Water Dam “Purpose Multiple Chone”, Ecuador Based on Precipitation, Evaporation and Evapotranspiration. *Procedia Earth and Planetary Science, Vol.15*, 641-646.
- Carrera, D., Guevara, P., Tamayo, L., Balarezo, A., Narvaez, C., Morocho, D. (2016). Relleno de series anuales de datos meteorológicos mediante métodos estadísticos en la zona costera e interandina del Ecuador, y cálculo de la precipitación media . *IDESIA CHILE*.
- Carrera, D., Guevara, P., Tamayo, L., Guallichico, D. (2015). Análisis multivariado de las aguas de la subcuenca del río Ambi en época de estiaje y su relación con la calidad desde el punto de vista agrícola. *Universidad De Las Fuerzas Armadas -ESPE*.
- Carrera, D., Ortega, H., Ramírez, J., Ramírez, C., Trejo, C., Becerril, A. (2011). Boro, fosfatos e índices de salinidad del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac, México. *Tecnología y ciencias del agua*, 5-21.
- Carrillo, M., Urgiles, P. (2016). Determinación del índice de calidad de agua ICA-NSF de los ríos Mazar y Pindilig. *Tesis de grado previo a la obtención de título de ingeniero ambiental, Universidad de Cuenca* . Cuenca, Ecuador .
- Carvacho, L. (2010). Geoprocesos utilizando Sistemas de Información Geográfica. *Taller regional sobre Cartografía censal con miras a la ronda de censos 2010 en Latinoamérica*.
- Casado, J., Calvo, D., Monterde, E., Alfonso, p. (2013). Determinación del origen de los sulfatos disueltos en las aguas de la cuenca del Llobregat en el Bages. *Libro de actas del III Congreso Internacional de Geología y Minería Ambiental para el Ordenamiento Territorial y Desarrollo Cardona*, 287-296.
- Castellón, J., Bernal, M., Hernandez, M. (2015). Calidad del agua para riego en la agricultura protegida en Tlaxcala. *Ingeniería 19-1*, 39-50.
- Castillo, S., Lozano, E. . (2007). Q-Q Plot Normal. Los puntos de posición gráfica. *Iniciación a la investigación, revista electrónica Universidad de Jaén*.
- Castillo, S., Lozano, E. (2007). Q-Q Plot Normal. Los puntos de posición gráfica. *Iniciación a la investigación*, 2-9.

- Castro, E., Carrasco, L. (2009). Utilización de modelos matemáticos para la formulación de una propuesta de gestión ambiental en la zona noroccidental del río Cali. *Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Ciencias Ambientales*.
- Catalán L, J.G., Olver, B., Alonso, J.J. (1971). Estudio hidrológico del Río Llobregat. *Litocolor S.A-Verdi 65*.
- Ceballos, D. (2011). *Taller de geoestadística*. Obtenido de <http://www.aguaysig.com/2011/03/geoestadistical-analyst-analisis.html>
- Cereceda, R. (2008). Propuesta de un método para la construcción de curvas IDF en estaciones pluviométricas en Chile central. *Universidad de Talca, Facultad de Ciencias Forestales*.
- Chai, T., Draxler, R. (2014). Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? –Arguments against avoiding RMSE in the literature. *Geoscientific Model Development*, 1247-1250.
- Chow, V., Maidment, D., Mays, L. (1994). *Hidrología Aplicada*. Mc Graw Hill.
- Chow, Ven Te. (2004). *Hidráulica de canales abiertos*. Mc Graw Hill.
- Chuvieco, E. (1990). *Fundamentos de la teledetección espacial*. Barcelona: Rialp.
- Cisterna, P., Peña, D. (2013). Determinación de la relación DQO/DBO5 en aguas residuales de comunas con población menor a 25.000 habitantes en la VIII región. Chile.
- Coro, Y. (2010). *Análisis exploratorio de datos espaciales*. Obtenido de Universidad Autónoma de Madrid: [https://www.uam.es/personal\\_pdi/economicas/coro/courses/Geoespacial/Sesion3\\_AEDE\\_Basico.pdf](https://www.uam.es/personal_pdi/economicas/coro/courses/Geoespacial/Sesion3_AEDE_Basico.pdf)
- Cortés, J., Troyo, E., Murillo, B., García, J., Garatuza, J., Suh Lee, S. (2009). Índices de calidad del agua del acuífero del valle del Yaqui, Sonora. *Terra Latinoamericana*, vol. 27, núm. 2, 133-141.
- Cuellar, E. (2013). Variaciones iónicas en las aguas residuales del valle de Mezquital. *Tesis de maestría en ciencias, Texcoco*. Moontecillo, Edo. de México.
- CYTED. (2001). *Agua potable para comunidades rurales, reuso y tratamientos avanzados de aguas residuales domésticas*. México D.F.
- Daziano, C. (2011). Hidroquímica y aptitud de aguas superficiales Alta Gracia - Córdoba Argentina. Córdoba, Argentina.

- De las Cuevas, C. (1999). Aplicación del análisis geoestadístico al diseño de programas de muestreo en formaciones salinas. *Acta Geológica Hispana*, 67-76.
- De Meers, M. (2002). GIS Modeling in Raster John Wiley & sons. *Chichester* 203 pp .
- Diaz, M. (2002). Geoestadística aplicada. *Instituto de Geofísica, UNAM*.
- Diaz, M., Gonzales, R. . (2009). Geoestadística Aplicada. *Estimación espacial*. Universidad Nacional Autónoma de México .
- Dick, J., Gerard, D.M. (2007). Optimization of sample patterns for universal kriging of environmental variables. *ScienceDirect*, 86-95.
- Diggle, P., Ribeiro, P. (2007). *Model-based Geostatistics*. Springer.
- Dueñas, C. (1997). Marco normativo vigente ante el riesgo de inundaciones. *La protección civil ante el riesgo de inundaciones*, 7.
- Duque, G. (2016). *Manual de geología para ingenieros*. Manizales : Universidad Nacional de Colombia .
- Echarri, L. (2007). Población ecología y ambiente . *Contaminación del agua*. Universidad de Navarra.
- Ecosystem Sciences Foundation . (2006). Calidad del agua de los pozos en San Miguel de Allende. *Dirección de medio ambiente y ecología* . Mexico.
- Elera, G. (2005). Modelación numérica del Río Piura utilizando River 2D, entre los puentes Cáceres e Integración. *Tesis para optar por el título de Ingeniero Civil, Universidad de Piura*. Perú.
- Engineers U.A. (2014). *Hydrologic Engineering Center*. Obtenido de <http://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/>
- Eslami, H., Dastorani, J., Javadi, M., Chamheidar, H. (2013). Geostatistical Evaluation of Ground Water quality Distribution with GIS (Case Study: Mianab-Shoushtar Plain). *Bulletin of Environment, Pharmacology and Life Sciences, Bull. Env. Pharmacol. Life Sci., Vol 3 (1)*, 78-82.
- Estrada, V., Pacheco, R. (2012). Modelación hidrológica con HEC-HMS en cuencas montañosas de la región oriental de Cuba. *RIHA vol.33 no.1 La Habana*.
- FAO WATER. (2016). *Un water*. Obtenido de Preguntas más frecuentes sobre calidad del agua: [http://www.unwater.org/wwd10/downloads/WWD2010\\_FAQS\\_ES.pdf](http://www.unwater.org/wwd10/downloads/WWD2010_FAQS_ES.pdf)

- Fernández, J., Curt, M.D. (2016). *Métodos analíticos para aguas residuales*. Recuperado el 2016, de Manual de fitodepuración. Filtros de macrofitas en flotación: [http://www.ciencias-marinas.uvigo.es/bibliografia\\_ambiental/outros/Manual%20de%20fitodepuracion](http://www.ciencias-marinas.uvigo.es/bibliografia_ambiental/outros/Manual%20de%20fitodepuracion)
- Fernandez, M., Soria, A. (2011). La contaminación de las aguas por nitratos procedentes de fuentes de origen agrario. *Comunidad Autónoma de la Región de Murcia Consejería de Agricultura y Agua*. España .
- Fisheries and Aquaculture Department. (2016). *Physical and Chemical Processes: Hydrology*. Obtenido de FAO: <http://www.fao.org/docrep/003/t0537e/T0537E02.htm>
- Fitchner Hydroestudios. (2014). "Estudios de Factibilidad y Diseños Definitivos del Plan de Descontaminación de los Ríos de Quito". *Informe 3 "Implementación de Modelos de Simulación y Formulación de Alternativas de Intercepción/Tratamiento"*.
- Flores, F. (2010). Manejo integral de la Cuenca Hidrográfica del Río Ambi ubicado en la Provincia de Imbabura entre las poblaciones de Atuntaqui y Otavalo, sector Cantón Cotacachi. *Tesis de grado ingeniería Civil Universidad San Francisco de Quito*.
- Franco, M. (2016). Planta de tratamiento de Ibarra y Otavalo. (P. Piedra, Entrevistador)
- Freire, N. (2009). *Calidad del Agua*. Obtenido de <http://www.dspace.espol.edu.ec>
- Fuenzalida, M. (2015). Evaluación de modelos geoestadísticos aplicados a la exposición al contaminante atmosférico PM10 en Chile. *XIV Conferencia Iberoamericana de Sistemas de Información Geográfica* .
- Fundación Ibérica para la Seguridad Alimentaria. (2001). Nitritos nitratos y nitrosaminas.
- Fundamentals of Environmental Measurements. (2016). *Conductivity, Salinity & Total Dissolved Solids*. Obtenido de Fondriest: <http://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/water-quality/conductivity-salinity-tds/#cond19>
- Funes, H. (2004). Métodos estadísticos en problemas espaciales. *Universidad Nacional de Tucumán*.
- GAD, I. (2010). Plan de Ordenamiento y Desarrollo Territorial del Cantón Ibarra.
- Gallardo, A. (2006). Geoestadística. *Revista Ecosistemas*, 1-11.

- García, A. (2012). *Criterios modernos para evaluación de la calidad del agua para riego (Primera parte)*. Obtenido de [http://www.ipni.net/publication/ia-lahp.nsf/0/B3BD6ED103283DDDD85257A2F005EF91B/\\$FILE/6%20Art.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lahp.nsf/0/B3BD6ED103283DDDD85257A2F005EF91B/$FILE/6%20Art.pdf)
- Gómez, L. F. (2010). *Indicadores de la calidad del agua*. Obtenido de Escuela Politécnica del Litoral: <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/6166/1/INDICADORES%20DE%20CALIDAD%20DEL%20AGUA%20EXPOSIC.pdf>
- Gorsich, D., Genton, M. (1999). Variogram model selection via Non Parametric Derivate Estimation. *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, 249-270.
- Goyenola, G. (2007). Red de Monitoreo Ambiental Participativo de Sistemas Acuáticos RED MAPSA. *Oxígeno disuelto*.
- Guerra, E. (2006). Análisis multitemporal de la cobertura y uso de la tierra a través del sistema LCCS en la cuenca baja del Río Grande-Santa Cruz. *Universidad Mayor de San Simon*. Bolivia.
- Guisande, C., Barreiro, A., Maneiro, I., Riveiro, I., Vergara, A., Vaamonde, A. (2006). *Tratamiento de Datos*. Vigo: Diaz de Santos.
- Gutierrez, A. (2006). Modelación hidrológica empleando isoyetas de relieve, una aproximación Geoestadística. *Climate Variability and Change Hydrological Impacts Fifth FRIEND World Conference held at Havana, Cuba*.
- Helsel, D. R., & Hirsch, R. M. (2002). Statistical Methods in Water Resources. En U. G. Survey, *Hydrologic Analysis and Interpretation* (págs. 17-64). Reston.
- Heng Lee, A., Nikraz, H. (2015). BOD:COD ratio as indicator for river pollution. *International Proceedings of Chemical, Biological and Environmental Engineering*, 89-94.
- Hengl, T. (2009). *A Practical Guide to Geostatistical Mapping*. Obtenido de [http://spatial-analyst.net/book/system/files/Hengl\\_2009\\_GEOSTATE2c1w.pdf](http://spatial-analyst.net/book/system/files/Hengl_2009_GEOSTATE2c1w.pdf)
- Henríquez, C., Mendez, J.C., Masís, R. (2013). Interpolación de variables de fertilidad de suelo mediante el análisis Kriging y su validación. *Agronomía costarricense*, 71-82.
- Hernandez, F. (2015). *Asistencia Técnica Agrícola*. Obtenido de El ph del agua de riego: <http://www.agro-tecnologia-tropical.com/>
- Hernández, G. (2011). *Tipos de Modelos en Investigación de Operaciones*. Obtenido de Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo:

[https://www.uaeh.edu.mx/docencia/P\\_Presentaciones/huejutla/sistemas/investigacion\\_operaciones/modelos.pdf](https://www.uaeh.edu.mx/docencia/P_Presentaciones/huejutla/sistemas/investigacion_operaciones/modelos.pdf)

- Hidalgo, M., Meoni G., Barrionuevo M., Navarro G., Paz R. (2003). Variabilidad de la relación DBO/DQO en ríos de Tucumán, Argentina. *13 Congreso Argentino de Saneamiento y Medio Ambiente*.
- Holguin, J., Camacho, A. (2003). Determinación de la tasa de reaireación en un río de montaña colombiano mediante el uso de trazadores . *Seminario Internacional La Hidroinformática en la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos*. Colombia.
- IEOS. (1992). Norma CO 10.07 - 601. *Abastecimiento de agua potable y eliminación de aguas residuales en el área urbana* .
- Illana, M. (2014). Estudio de la adsorción de fosfatos en aguas de depuradora mediante intercambiadores iónicos. *Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona*.
- INAMHI . (2015). Determinación de ecuaciones para el calculo de intensidades máximas de precipitación . *Actualización del estudio de lluvias intensas* . Quito, Ecuador .
- Jiménez, A. (2001). Determinación de los parámetros físico-químicos de calidad de las aguas . *Vol 2*.
- Jiménez, A. (2002). Mejora de una finca en el término municipal de Daimel. *Universidad de castilla la mancha, trabajo de titulacion*.
- King, H.W. (1954). *Handbook of hydraulics*. New York: Mc Graw Hill.
- Koch, A., Cabrera, P. (2010). Analisis exploratorio de datos espaciales . *UNI\_GIS: Modulo electivo estadística espacial* .
- Kravchenko, A. (2003). Influence of spatial structure on accuracy of interpolation methods. *Soil Scienci Society of American Journal*, 1564-1571.
- Krivoruchko, K. (2000). Introduction to Modeling Spatial Processes Using Geostatistical Analyst. ESRI.
- La Hora. (2016). *La Hora Nacional*. Obtenido de Planta de agua residuales toma forma: [http://lahora.com.ec/index.php/noticias/show/1101904763/-1/Planta\\_de\\_tratamiento\\_de\\_aguas\\_residuales\\_toma\\_forma.html](http://lahora.com.ec/index.php/noticias/show/1101904763/-1/Planta_de_tratamiento_de_aguas_residuales_toma_forma.html)
- La Hora. (2016). *La Hora Nacional*. Obtenido de Ecuador: 88% de las aguas residuales llega a los ríos: <http://lahora.com.ec/index.php/noticias/show/1101997377#.WIT4zfl95PY>

- Lema, E., Carrión, C. (2013). Generación de un modelo geoestadístico de concentración de plomo en el suelo de las parroquias San Rafael y Sangolquí. *Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE*.
- Lind, D.A, Marchal, W.G, Mason, R.D. (2004). *Estadística para Administración y Economía*. Colombia: Alfaomega.
- Llinas, H., Rojas, C. (2005). *Estadística descriptiva y distribución de probabilidad*. Bogota: Ediciones Uninorte.
- Lozano, Z., Bravo, C., Ovalles, F., Hernández, M., Moreno, B., Piñango, L., Villanueva, J. (2004). Selección de un diseño de muestreo en parcelas experimentales a partir del estudio de la variabilidad espacial de los suelos. *Bioagro*, 1-17.
- Luceño, A., Gonzales, F. (2004). *Métodos estadísticos para medir, describir y controlar la variabilidad*. Cantabria: Servicio de publicaciones de la Universidad de Cantabria.
- MAE. (2015). TULSMA Acuerdo Ministerial 097-A . *Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes del Recurso Agua libro VI anexo 1*.
- Martinez, A. (1992). Contaminación de nitratos en aguas superficiales y subterráneas, Efecto sobre el medio natural y medidas correctoras.
- Martínez, F., Ojeda, D., Hernández, O., Martínez, J., De la O, G. . (2011). El exceso de nitratos, un problema actual en la agricultura. *Synthesis*, 11-16.
- Martinez, L. (2009). *Estudio de la calidad agronómica del agua de riego de las islas Baleare* . Obtenido de [http://dgrechid.caib.es/www/doc/AIGUES\\_SUBTERRANIES\\_1.pdf](http://dgrechid.caib.es/www/doc/AIGUES_SUBTERRANIES_1.pdf)
- Menéndez, M. (2012). Aplicación de técnicas geoestadísticas en la estimación de área basimétrica. *Universidad de Oviedo*.
- Metcalf & Eddy. (1998). *Ingeniería de Aguas Residuales Volumen 1*. Mc. Graw-Hill.
- Ministerio de Coordinación de la Producción Empleo y Competitividad . (2011). *Agendas para la transformación productiva territorial* . Obtenido de Imbabura : <http://www.produccion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/02/AGENDA-TERRITORIAL-IMBABURA.pdf>
- Monsalve, G. (2009). *Hidrología en la Ingeniería*. Colombia: Escuela colombiana de ingeniería.

- Mora, J., Calvo, G. (2010). Estado actual de contaminación con coliformes fecales de los cuerpos de agua de la Península de Osa. *Tecnología en Marcha*, 34-40.
- Moral Garcia, F. (2004). Aplicación de la geoestadística en las ciencias ambientales. *Ecosistemas, Revista científica y técnica de ecología y medioambiente*, 78-86.
- Moreno, T. (2003). *Determinación en campo del contenido de bicarbonatos del agua de riego*. Obtenido de <http://www.horticom.com/pd/imagenes/66/955/66955.Pdf>
- Nania, L. (2007). Manual Básico de HEC- HMS3.0 y HEC GEO HMS 1.0. *Cálculo de Caudales de Avenida con HEC-HMS y SIG*.
- Olaya, V. (2011). Algebra de mapas . En *Siistemas de informacion geografica* (págs. 307-327).
- Oliver. (2010). *Geoestatistical applications for precision agriculture*. Springer.
- Orozco, C., Pérez, A., Gonzales, M N., Rodriguez, F., Alfayate, J M. (2004). *Contaminación Ambiental*. Thomson.
- Osicka, R., Giménez, M. (2004). Determinación del contenido de sodio y potasio en aguas naturales subterráneas por fotometría de llama. *Universidad Nacional del Nordeste*.
- Palma, R., Garnica, E., López, L., Ortiz, J., Peñaranda, S., Raad, J. (1999). Análisis de agua para consumo humano. *Instituto Nacional de Salud*. Santa Fé de Bogotá D.C.
- Perez, S. (2015). Indices de salinidad de las aguas de riego del canton Milagro, Guayas, Ecuador. *Tesis de grado de maestría en gestion ambiental* . Sangolquí.
- Pinos, M., Pizarro, K., Pomavilla, J. (2011). Organización y calidad del agua de consumo humano y salud, sistema de agua Tarqui-La Victoria del Portete. *Universidad de Cuenca*.
- Piñeiro, G., Perelman, S., Guerschman, P., Paruelo, J. (2008). How to evaluate models: Observed vs predicted or Predicted vs observed. *Ecological Modelling*, 316-322.
- PNBV. (2013). *Plan Nacional del Buen Vivir* . Obtenido de [www.buenvivir.gob.ec](http://www.buenvivir.gob.ec)
- Posada, E., Salvatierra , H. (2001). Analisis multitemporal del cambio del ecosistema de manglar en la costa del departamento del Atlántico (Colombia). *Revista Cartografica Proquest central* .

- PRODERENA. (2001). Propuesta del Plan de Manejo Racional del Uso del Agua.
- PROSAP. (2013). *Estudio del potencial del uso alternativo de fuentes de agua: Aguas Residuales*. Obtenido de Programa de Servicios Agrícolas Provinciales:  
[http://www.fao.org/fileadmin/user\\_upload/rlc/utf017arg/estudio/aguasresiduales/REUSO\\_SEGURO\\_DE\\_AGUAS\\_RESIDUALES\\_EN\\_ARGENTINA.pdf](http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/rlc/utf017arg/estudio/aguasresiduales/REUSO_SEGURO_DE_AGUAS_RESIDUALES_EN_ARGENTINA.pdf)
- Putz, P. (2008). Eliminación y determinación de fosfato. *Informe Práctico HACH*.
- Quezada, F. (2003). Estudio de la salinidad de los suelos mediante un sensor de inducción electromagnética en la zona costera de Nayarit. *Tesis para la obtención del título de Ingeniero Agrónomo*. Chapingo: Universidad Autónoma Chapingo .
- Rebollo, L. (2017). *Hidrogeología*. Recuperado el 2017, de Características físico-químicas de las aguas subterráneas:  
[https://portal.uah.es/portal/page/portal/GP\\_EPD/PD-GP-MA-ASIG/PD-GP-ASIG-67044/TAB42351/T7-Characterísticas%20físico-químicas%20de%20las%20aguas%20subterráneas.pdf](https://portal.uah.es/portal/page/portal/GP_EPD/PD-GP-MA-ASIG/PD-GP-ASIG-67044/TAB42351/T7-Characterísticas%20físico-químicas%20de%20las%20aguas%20subterráneas.pdf)
- Red río Aburrá. (2011). Diseño y puesta en marcha de la red de monitoreo ambiental en la cuenca hidrográfica del río Medellín en jurisdicción del área metropolitana . *Metodologías para la estimación de caudales, capítulo 6*.
- Richards, L. A. (1954). Diagnosis and improvement of Saline and Alkali Soils . Washington D.C.: Agriculture Handbook No 60.
- Rivas, V., Chuquilin, E. . (2012). Evaluación de los niveles de contaminación de aguas residuales en la quebrada Funas, con fines de tratamiento con humedales. *Investigación y Amazonía ISSN 2223-8492*, 85-94.
- Robedro, J. C. (2014). Cálculo de caudales de avenida. *Universidad Politécnica de Madrid*.
- Rodier, J. (1998). Analisis de las aguas . Barcelona : Omega .
- Rodriguez, C., Duque, C., Calvache, M L., López, M. (2010). Causas de las variaciones de la conductividad eléctrica del agua subterránea en el acuífero Motril-Salobreña, España. *GEOGACETA*, 107-110.
- Roldán, G., Ramírez, J. (2008). *Fundamentos de limnología netropical*. Colombia: Universidad de Antioquia.
- Romero Rojas, J. (1999). *Calidad del agua, 2 da Edición*. Mexico : Alfaomega.

- Ronzano, E., Dapena, J.L. (2010). *Eliminación de fósforo en las aguas residuales*.  
Obtenido de <http://cidta.usal.es/cursos/ETAP/modulos/libros/fosforo.pdf>
- Rueda, F. (2010). Autodepuración y vertidos en cursos fluviales. *Universidad de Granada*. España.
- Ruiz, J., De Jesús, O. (2012). Alteraciones de la precipitación y la temperatura ante variabilidad y cambio climático para la ciudad de Bogotá. *IDEAM*, 1-22.
- Ruiz, V. (2013). Análisis multitemporal del cambio de uso del suelo, en el Paisaje Terrestre Protegido Miraflores Moropotente Nicaragua. *Ecosistemas*, 117-123.
- Salvador Figueras, M., Gargallo, P. (2003). *Análisis exploratorio de datos (AED)*.  
Obtenido de 5campus.com: <http://www.5campus.com/leccion/aed>
- Sanchez, J. (2012). *Hidrología Hidrogeología*. Obtenido de Departamento de Geología . Universidad de Salamanca (España):  
[http://hidrologia.usal.es/practicass/Hietog\\_diseno\\_fundamento.pdf](http://hidrologia.usal.es/practicass/Hietog_diseno_fundamento.pdf)
- Sandoval, A., Carlos, G. (1991). *Manual no. 7 Determinación de coliformes fecales, adiestramiento para la prevención y control de las enfermedades gastrointestinales en el sector agua*. Mexico, Mexico: IMTA.
- Sandoval, W., Aguilera, E. (Diciembre de 2014). Determinación de Caudales en cuencas con poca información Hidrológica. *Revista Ciencia UNEMI No 2*, 100-110.
- SENESCYT. (2015). *Ecuador Universitario*. Obtenido de <http://ecuadoruniversitario.com/noticias-universitarias/con-una-inversion-de-1-381-millones-se-crearon-4-universidades-emblematicas/>
- Serman & asociados s.a. (2008). Estudio de impacto ambiental central termoeléctrica a carbón río Turbio, Santa Cruz . *Identificación y evaluación de impactos, modelación matemática de calidad de agua*.
- Sharpley, A. and Withers, P. (1994). *The environmentally-sound management of agricultural phosphorus* (Vol. 39). Netherlands: Fertilizer Research.
- Silva, H. (2015). Guías OMS uso seguro de aguas residuales, excretas y aguas grises. *Organización Panamericana de la Salud*. CEPIS.
- Simes, L. (2011). *Introducción a la química general (1ra ed)*. Argentina: Jorge Sarmiento Editor-Universitas. Obtenido de <http://www.ebrary.com>.
- SINGH, V. P. (1992). *Elementary Hidrology*. Prentice – Hall, Englewood Cliffs .
- Szabolcs, I. (1989). *Salt affected soils*. United states: Boca Raton .

- Tamayo, C. (2016). Calidad de agua y suelo en la cuenca del río Ambi para uso agrícola en los campos experimentales de la ciudad del conocimieto Yachay mediante análisis físoco-químico. Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE.
- Tapia, J. C. (2012). Modelización hidrológica de un área experimental en la cuenca del Río Guayas en la producción de caudales y sedimentos. *UNLP. tesis de maestría Facultad de ciencias agrarias y forestales*.
- Tellez, C., Lemus, D. (2014). *Estadística descriptiva y probabilidad con aplicaciones en R*. U. Los Libertadores .
- Terrádez, M. (2013). *Análisis de Componentes Principales*. Obtenido de Universidad Abierta de Cataluña:  
[http://www.uoc.edu/in3/emath/docs/Componentes\\_principales.pdf](http://www.uoc.edu/in3/emath/docs/Componentes_principales.pdf)
- U.S. Geological Survey. (1989). Guide for selecting Manning's roughness coefficients for natural Channels and Flood Plains. *Papar 2339*. Denver, CO.
- UNEP. (2016). *A Snapshot of the World's Water Quality, Towards a global assessment*. Obtenido de  
[http://uneplive.unep.org/media/docs/assessments/unep\\_wwqa\\_report\\_web.pdf](http://uneplive.unep.org/media/docs/assessments/unep_wwqa_report_web.pdf)
- UN-Water. (2013). *United Nations International Year of Water Cooperation*. Obtenido de <http://www.unwater.org/water-cooperation-2013>
- UPDC. (2016). "Análisis de Aguas." Obtenido de  
[http://www.upct.es/~minaees/analisis\\_aguas.pdf](http://www.upct.es/~minaees/analisis_aguas.pdf).
- UPRM. (2016). *Parametros físico quimicos alcalinidad*. Obtenido de  
<http://www.uprm.edu/biology/profs/massol/manual/p2-alcalinidad.pdf>
- USACE. (2010). *HEC-RAS* . Obtenido de User's manual:  
<http://www.hec.usace.army.mil/>
- Valverde, J. C. (2007). *Riego y drenaje*. San José, C.R: Euned.
- Verniere, S. a. (2007). Ciencias con lo mejor de Vernier. *Calidad del agua, Oxigeno disuelto*.
- Villatoro, M., Henríquez, C., Sancho, F. (2008). Comparación de los interpoladores IDW y Kriging en la variación espacial de pH, Ca, CICE y P del suelo. *Agronomía Costarricense*, 95-105.
- Wetzel, R. G. (2001). *Limnology: Lake and River Ecosystems*. San Diego, Ca: Academic Press.

