



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Civil

**MODELACIÓN DEL CICLO DE NUTRIENTES EN LOS EMBALSES MAZAR
Y AMALUZA DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO PAUTE, AZUAY**

Tesis de graduación previo a la
obtención del título de Ingeniero
Civil.

Autores:

Adrián Paúl Cedillo Galarza

Esteban Gustavo Jara Cárdenas

Director:

Ing. Andrés Alvarado Martínez

CUENCA- ECUADOR

2015

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se realizó la construcción y validación de un modelo computacional del ciclo de nutrientes de los embalses Mazar y Amaluza, a partir de datos experimentales de monitoreos efectuados en campo. El proceso de modelación inició con la generación cartográfica de los embalses y la discretización de los mismos en el software *Basins*, para facilitar los procesos de análisis que posteriormente se realizaron en el software *Aquatox*. Para la discretización se dividió al embalse de Mazar en cinco tramos y al embalse de Amaluza en cuatro tramos. Una vez dividido los embalses en segmentos se estudió parámetros como el oxígeno disuelto, clorofila, amonio, nitratos, y fósforo. Finalmente se realizó un análisis de escenarios en la actualidad y a futuro en los cuales se estudia el comportamiento de los nutrientes y una potencial eutrofización en dichos escenarios. Los resultados más destacados son la construcción cartográfica de los embalses y la predicción de los ciclos de nutrientes de los modelos en los diferentes escenarios.

PALABRAS CLAVES

Aquatox, Basins, Ciclo de Nutrientes, Embalse Amaluza, Embalse Mazar, Escenarios de Potencial Eutrofización.



ABSTRACT

This research work presents the construction and validation of a nutrient cycle computational model of Mazar and Amaluza reservoirs using experimental data from field monitoring. Modelling started with the cartographic representation of the reservoirs and their discretization using the software Basins. This program facilitates the following analysis processes implemented in the software Aquatox. For discretization, Mazar and Amaluza reservoirs were divided five and four stretches, respectively. On these, several parameters were studied, such as dissolved Oxygen, Chlorophyll, Ammonium, Nitrates, and Phosphorus. Finally, present and future scenarios were analyzed investigating nutrients behavior and potential eutrophication. Highlighted results include the cartographic construction of the reservoirs and nutrient cycle predictions for different modeled scenarios.

KEYWORDS

Aquatox, Basins, nutrients cycle, Amaluza reservoir, Mazar reservoir, potential eutrophication.

ÍNDICE

RESUMEN	2
ABSTRACT	3
ÍNDICE	4
LISTA DE FIGURAS	6
LISTA DE TABLAS.....	8
CLÁUSULAS DE DERECHOS DE AUTOR.	9
DEDICATORIA.....	12
AGRADECIMIENTOS	14
CONTENIDO.....	15
1 CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	15
1.1 Antecedentes	15
1.2 Justificación.....	15
1.3 Objetivo general	16
1.4 Objetivos específicos	16
1.5 Contenido de la Tesis.....	16
2 CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	17
2.1 Proyectos de Generación Hidroeléctrica en el Ecuador	17
2.2 Embalses artificiales.....	18
2.3 Impactos ambientales de los embalses artificiales.....	20
2.3.1 Ciclo del nitrógeno	22
2.3.2 Ciclo del fósforo	25
2.4 Otros procesos físico químicos ocurrentes en embalses	27
2.4.1 Sedimentación:	27
2.4.2 Degradación anaerobia de material orgánico:	28
2.4.3 Termoclina:	29
2.4.4 Fotosíntesis:	29
2.5 Modelación matemática en embalses	30
3 CAPÍTULO 3: MATERIALES Y MÉTODOS.....	34
3.1 Descripción General del Proyecto	34
3.1.1 Embalse Amaluza	36
3.1.2 Embalse Mazar.....	37



3.2	Modelo “Basins” en embalses	38
3.3	Modelo “Aquatox” para modelación matemática de contaminantes en embalses.....	39
3.4	Generación de Información para los Modelos Matemáticos.....	40
3.4.1	Datos Meteorológicos	41
3.4.2	Datos Hidrológicos.....	42
3.4.3	Datos Biológicos	44
3.4.4	Datos de Calidad de Agua.....	44
3.4.5	Datos Geomorfológicos	46
3.4.6	Datos Geográficos	47
3.5	Generación Cartográfica de los Embalses	47
3.5.1	Generación Cartográfica del Embalse Mazar	47
3.5.2	Generación Cartográfica del Embalse Amaluza	49
3.6	Metodología utilizada en la modelación de los embalses.....	50
3.7	Calibración y Validación del modelo “Aquatox”	51
3.8	Análisis de escenarios.....	52
4	CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSION	56
4.1	Modelación GIS de los embalses.....	56
4.2	Análisis de escenarios de potencial eutrofización en los embalses. ...	58
4.2.1	Escenarios en el presente y su desarrollo hasta el año 2016.....	58
4.2.2	Escenarios Con Y Sin Tratamiento 2030.....	68
4.2.3	Escenario con carga orgánica alta – ambiente anóxico.....	72
5	CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES	77
5.1	Conclusiones generales	77
5.2	Análisis de Escenarios	78
6	BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS	79

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 Sistemas Hídricos según superficie que cubren, (Chiriboga, 2013)	17
Figura 2-2 <i>Transformaciones biogeoquímicas del Nitrógeno</i> (Sales, 2008)	24
Figura 2-3 Ciclo del Fósforo en Ecosistemas Acuáticos, (Sales, 2008)	27
Figura 3-1 Descripción General del Proyecto Paute Integral	35
Figura 3-2 Central Molino, Presa "Daniel Palacios" y Embalse Amaluza (CELEC, 2010)	36
Figura 3-3 Presa y Embalse Mazar (C. CAMINOSCA, 2005)	37
Figura 3-4 Esquema de Caudales en los embalses Mazar y Amaluza	42
Figura 3-5 Esquema del modelo Aquatox en modo "Cascade"	51
Figura 4-1 Cartografía Embalse Mazar	56
Figura 4-2 Cartografía Embalse Amaluza	57
Figura 4-3 Oxígeno Tramo 1 – Mazar	59
Figura 4-4 Oxígeno Tramo 3 – Mazar	59
Figura 4-5 Oxígeno Tramo 5 – Mazar	59
Figura 4-6 Oxígeno Tramo 6 - Amaluza	59
Figura 4-7 Oxígeno Tramo 8 – Amaluza	60
Figura 4-8 Oxígeno Tramo 9 - Amaluza	60
Figura 4-9 Amonio Tramo 1 – Mazar	61
Figura 4-10 Amonio Tramo 3 – Mazar	61
Figura 4-11 Amonio Tramo 5 – Mazar	61
Figura 4-12 Amonio Tramo 6 - Amaluza	61
Figura 4-13 Amonio Tramo 8 – Amaluza	62
Figura 4-14 Amonio Tramo 9 - Amaluza	62
Figura 4-15 Clorofila Tramo 1 – Mazar	63
Figura 4-16 Clorofila Tramo 3 – Mazar	63
Figura 4-17 Clorofila Tramo 5 – Mazar	63
Figura 4-18 Clorofila Tramo 6 – Amaluza	63
Figura 4-19 Clorofila Tramo 8 – Amaluza	64
Figura 4-20 Clorofila Tramo 9 – Amaluza	64
Figura 4-21 Nitratos Tramo 1 – Mazar	65
Figura 4-22 Nitratos Tramo 3 – Mazar	65
Figura 4-23 Nitratos Tramo 5 – Mazar	65
Figura 4-24 Nitratos Tramo 6 – Amaluza	65
Figura 4-25 Nitratos Tramo 8 – Amaluza	66
Figura 4-26 Nitratos Tramo 9 – Amaluza	66
Figura 4-27 Fósforo Tramo 1 – Mazar	66
Figura 4-28 Fósforo Tramo 3 – Mazar	66
Figura 4-29 Fósforo Tramo 5 – Mazar	67
Figura 4-30 Fósforo Tramo 6 – Amaluza	67



Figura 4-31 Fósforo Tramo 8 – Amaluza.....	67
Figura 4-32 Fósforo Tramo 9 – Amaluza.....	67
Figura 4-33 Oxígeno 2030 Tramo 3 – Mazar.....	68
Figura 4-34 Oxígeno 2030 Tramo 8 – Amaluza	68
Figura 4-35 Amonio 2030 Tramo 3 – Mazar.....	69
Figura 4-36 Amonio 2030 Tramo 8 – Amaluza.....	69
Figura 4-37 Clorofila 2030 Tramo 3 – Mazar.....	70
Figura 4-38 Clorofila 2030 Tramo 8 – Amaluza.....	70
Figura 4-39 Nitratos 2030 Tramo 3 – Mazar.....	71
Figura 4-40 Nitratos 2030 Tramo 8 – Amaluza.....	71
Figura 4-41 Fósforo 2030 Tramo 3 – Mazar.....	71
Figura 4-42 Fósforo 2030 Tramo 8 – Amaluza.....	71
Figura 4-43 Oxígeno 2E6 hab. Mazar.....	72
Figura 4-44 Oxígeno 2E6 hab. Amaluza	72
Figura 4-45 Amonio 2E6 hab. Mazar.....	73
Figura 4-46 Amonio 2E6 hab. Amaluza.....	73
Figura 4-47 Clorofila 2E6 hab. Mazar.....	74
Figura 4-48 Clorofila 2E6 hab. Amaluza.....	74
Figura 4-49 Nitratos 2E6 hab. Mazar.....	75
Figura 4-50 Nitratos 2E6 hab. Amaluza	75
Figura 4-51 Fósforo 2E6 hab. Mazar.....	75
Figura 4-52 Fósforo 2E6 hab. Amaluza.....	75

LISTA DE TABLAS

Tabla 2-1 Compuestos Nitrogenados que intervienen en la calidad del agua y Estados de oxidación (Sales, 2008).	23
Tabla 3-1 Características Generales del Embalse Amaluza (Cisneros, 2013).	36
Tabla 3-2 Características Generales del Embalse Mazar (Cisneros, 2013).	37
Tabla 3-3 División por tramos Embalse Mazar	41
Tabla 3-4 División por tramos Embalse Amaluza	41
Tabla 3-5 Código y Coordenadas de la Estación Meteorológica.	41
Tabla 3-6 Volumen por tramos Embalse Mazar	43
Tabla 3-7 Volumen por tramos Embalse Amaluza	44
Tabla 3-8 Datos Biológicos.	44
Tabla 3-9 Fechas de las Campañas de Muestreo Embalse Mazar.	45
Tabla 3-10 Fechas de las Campañas de Muestreo Embalse Amaluza.	45
Tabla 3-11 Código, Lugar y Coordenadas de los puntos de muestreo Embalse Mazar.	45
Tabla 3-12 Código, Lugar y Coordenadas de los puntos de muestreo Embalse Amaluza.	45
Tabla 3-13 Parámetros y Unidades de Datos de Calidad de Agua.	46
Tabla 3-14 Datos Geomorfológicas Embalse Mazar	46
Tabla 3-15 Datos Geomorfológicos Embalse Amaluza	47
Tabla 3-16 Coordenadas y Latitud de los Embalses Mazar y Amaluza	47
Tabla 3-17 Plantas y concentraciones iniciales de plantas	52
Tabla 3-18 Plantas y concentraciones finales para el modelo calibrado	52
Tabla 3-19 Datos de Poblaciones Censos 2001 y 2010 (INEC, 2015) y Poblaciones Proyectadas 2012 y 2030	53
Tabla 3-20 Caracterización Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Ucubamba, Afluente.	54
Tabla 3-21 Caracterización Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Ucubamba, Efluente.	54
Tabla 3-22 Total de cargas contaminantes afluentes al embalse en los diferentes escenarios.	55
Tabla 3-23 Concentración Diluida por fechas para los diferentes escenarios.	55

CLÁUSULAS DE DERECHO DE AUTOR.



Universidad de Cuenca
Clausula de derechos de autor

Adrián Paúl Cedillo Galarza, autor de la tesis “Modelación del Ciclo de Nutrientes en los Embalse Mazar y Amaluza del Proyecto Hidroeléctrico Paute, Azuay”, reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniero Civil. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor

Cuenca, 03 de marzo de 2015



Adrián Paúl Cedillo Galarza

C.I: 0104057369



Universidad de Cuenca
Clausula de derechos de autor

Esteban Gustavo Jara Cárdenas, autor de la tesis “Modelación del Ciclo de Nutrientes en los Embalse Mazar y Amaluzá del Proyecto Hidroeléctrico Paute, Azuay”, reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniero Civil. El uso que la Universidad de Cuenca hiciera de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor

Cuenca, 03 de marzo de 2015

Esteban Gustavo Jara Cárdenas

C.I: 0104364716



CLÁUSULAS DE PROPIEDAD INTELECTUAL.



Universidad de Cuenca
Clausula de propiedad intelectual

Adrián Paúl Cedillo Galarza, autor de la tesis “Modelación del Ciclo de Nutrientes en los Embalse Mazar y Amaluza del Proyecto Hidroeléctrico Paute, Azuay”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 03 de marzo de 2015

Adrián Paúl Cedillo Galarza

C.I: 0104057369



Universidad de Cuenca
Clausula de propiedad intelectual

Esteban Gustavo Jara Cárdenas, autor de la tesis “Modelación del Ciclo de Nutrientes en los Embalse Mazar y Amaluza del Proyecto Hidroeléctrico Paute, Azuay”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 03 de marzo de 2015

Esteban Gustavo Jara Cárdenas

C.I: 0104364716

DEDICATORIA

A mis padres Lautaro y Patricia por todo su apoyo, amor, paciencia y guía durante estos años de carrera universitaria, a mi hermano Sebastián por todo su apoyo y ayuda, a mi enamorada Vero por toda su paciencia y por estar a mi lado en todo momento, así como a mis amigos que forman parte importante en mi vida.

Adrián

A mi madre Mariana y a mi hermano Geovanny quienes con su apoyo incondicional día a día me enseñaron que con amor, paciencia, sabiduría y humildad todo es posible, a mi abuelita Rosario por enseñarme a nunca darme por vencido, a mi enamorada Belén por siempre estar a mi lado apoyándome, a mis amigos y personas queridas que permitieron que este sueño se haga realidad.

Gustavo

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos en primer lugar a Dios, por habernos concedido salud y a nuestras familias que fueron parte fundamental de esta etapa universitaria.

Agradecemos de manera especial a nuestro director de tesis el Ing. Andrés Alvarado M. por toda la paciencia y dedicación que presto a la misma, así como también al Ing. Juan Cisneros por la ayuda brindada.

Finalmente a nuestros amigos que de manera desinteresada nos prestaron su ayuda Gina, Betín, Adrián, Juan, Ángel y a todos nuestros amigos que de una u otra manera formaron parte de este sueño que hoy se vuelve realidad.

CONTENIDO

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

El Ecuador es un país con alto potencial de generación hidroeléctrica debido a sus condiciones geográficas y climáticas; por esta razón el país apuesta al cambio de la matriz energética, con grandes proyectos como es el complejo Paute Integral, el cual está formado por la centrales Mazar, Molino, Sopladora y Cardenillo. Siendo los embalses Mazar y Amaluza parte importante de este complejo, en los que se realizó a lo largo del año 2012 y parte del 2013 un monitoreo de calidad de agua en puntos estratégicos, donde se podría generar un aporte importante de nutrientes a los embalses; así como también, se monitorio los ríos Paute y Collay antes de ser embalsados con el mismo objetivo. En el presente estudio el lector podrá encontrar el ciclo de nutrientes que influye a los ecosistemas de los embalses.

1.2 Justificación

El origen de la siguiente investigación surge de la necesidad de conocer como es el proceso del ciclo de nutrientes y su desarrollo en los embalses Mazar y Amaluza, ya que los mismos forman parte de la central hidroeléctrica Paute Mazar y Paute Molino, que conjuntamente tienen una potencia de 6175 GWh año⁻¹ y generando entre el 40 y 60% de la energía consumida en el país, poseen un volumen embalsado conjuntamente de 530 hm³. Actualmente estos embalses reciben contaminación por aguas residuales, basura arrojada indiscriminadamente por poblados y procesos agrícolas que no son controlados; esta contaminación puede producir una degradación de los embalses como contaminación visual, malos olores y putrefacción de los mismos, dando una mala imagen a estos cuerpos de agua. Por lo que es necesario el análisis de diferentes escenarios en dichos embalses. Esta investigación busca analizar el ciclo de nutrientes en el presente y futuro, así como las repercusiones que tendrían en los embalses al aplicar o no alguna clase de tratamiento para las ciudades que influyen en la hidrología del mismo.

1.3 Objetivo general

- Estudiar la contaminación, la autodepuración y el ciclo de nutrientes en embalses de proyectos hidroeléctricos.

1.4 Objetivos específicos

- Construir un modelo matemático de balance de masas y ciclo de macronutrientes en los embalses Mazar y Amaluza.
- Validar un modelo matemático de balance de masas del ciclo de macronutrientes en los embalses Mazar y Amaluza a partir de datos experimentales de monitoreos efectuados en campo.
- Analizar el potencial de autodepuración y eutrofización de los embalses Mazar y Amaluza.

1.5 Contenido de la Tesis

En este estudio se habla sobre proyectos de generación hidroeléctrica en el Ecuador, su importancia, los beneficios y perjuicios que generan, que proyectos están en construcción y cuales existen.

Además se estudia los embalses artificiales, su origen, cuales son los más importantes en el país, el ciclo de nutrientes que se da en estos y su posible eutrofización; con estos análisis se generan modelos matemáticos que nos permitan predecir sitios de contaminación y los impactos que se producen.

El análisis se profundiza en los embalses de Mazar y Amaluza con la ayuda del software *Basins* para la modelación cartográfica y el software *Aquatox* para la modelación matemática. Se indica el tratamiento que se da a los datos existentes para que puedan ser utilizados en el estudio y la metodología que se realiza para la modelación.

Se calibra el modelo y se plantean distintos escenarios que posteriormente serán analizados y comparados entre ellos. Se exponen conclusiones y recomendaciones sobre los resultados obtenidos en los embalses.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1 Proyectos de Generación Hidroeléctrica en el Ecuador

La generación hidroeléctrica es sin duda una de las alternativas energéticas más limpias, confiables y eficientes que existen en el mundo. El Ecuador, siendo privilegiado con una geografía y clima apropiados, viene desarrollando e incrementando sustancialmente su potencial de generación hidroeléctrica en los últimos años.

En la actualidad el Ecuador desarrolla ocho proyectos hidroeléctricos, con la finalidad de incrementar la capacidad nacional instalada a 7873 MW, consiguiendo que el estado en el año 2016 alcance un 90% de participación en las fuentes renovables de la matriz de generación eléctrica, siendo como meta a largo plazo alcanzar el 100% (MCSE, 2013). Además los esfuerzos de cambio de la matriz de generación eléctrica del país van encaminados a la utilización de otras fuentes de energía no convencionales como: eólica, solar, geotérmica y biocombustibles. El cambio de la matriz energética está definido como una estrategia fundamental para sustentar la economía y el cambio de la matriz productiva que nos espera en los siguientes años. 'El cambio de la matriz consiste en aumentar, de manera óptima y sustentable las fuentes primarias de energía; al mismo tiempo cambiar las estructuras de consumo en el sector de transporte, residencial y comercial; para que su uso sea racional y eficiente' (MCSE, 2013).

Nuestro país tiene 29 sistemas hídricos compuestos por 79 cuencas que cubre la superficie de nuestro territorio de la siguiente manera:

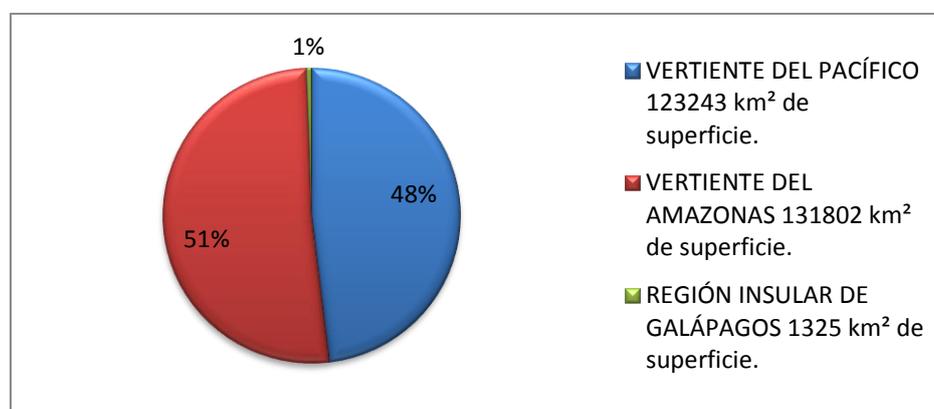


Figura 2-1 Sistemas Hídricos según superficie que cubren, (Chiriboga, 2013)

De este gran potencial según la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), el Ecuador ha utilizado apenas el 8% del recurso hídrico.

Desde el punto de vista ambiental, los proyectos hidroeléctricos son una alternativa viable, no contaminante y renovable; ya que comparado con otras tecnologías de obtención de energía estos proyectos disminuyen en gran parte la emisión de dióxido de carbono. Desde un punto de vista económico tienen un costo de operación menor, simple y eficiente (Avilés, 2008; Kenyon, 2013).

Estos proyectos son: Coca Codo Sinclair (Napo – 1500 MW), Manduriacu (Pichincha – 60 MW), Delsitanisagua (Zamora Chinchipe – 115 MW), Quijos (Napo – 50 MW), Minas San Francisco (Azuay – 276 MW), Sopladora (Azuay – 487 MW), Toachi Pilatón (Pichincha – 253 MW), Mazar Dudas (Cañar – 21 MW); los cuales duplicarían la generación eléctrica en el país de 3770 MW a 6779 MW. Todos estos proyectos se unirán a los ya existentes que son: Pisayambo-Pucará (Tungurahua), Paute-Mazar (Cañar-Azuay), Paute-Molino (Azuay), San Miguel (Carchi), Cumbayá (Pichincha), Agoyán (Tungurahua), San Francisco (Carchi) (CELEC, 2013g).

2.2 Embalses artificiales

Un embalse es la acumulación de agua por la obstrucción de un río o cuerpo de agua, que puede cerrar parcial o totalmente su cauce y puede ser vaciado ya sea por gravedad o por aspiración, esta agua acumulada puede ser utilizada para diferentes actividades. El hombre ha creado embalses artificiales desde épocas muy antiguas, en la actualidad estos han tenido su apogeo debido a sus múltiples usos como:

- Abastecimiento de agua potable.
- Producción de energía hidroeléctrica.
- Reservas para riego.
- Control de inundaciones.
- Navegación.
- Pesca.
- Control de sedimentos.
- Actividades de recreación.

En general el abastecimiento de agua potable tiene la prioridad más elevada de todos los usos potenciales. En la actualidad muchos embalses son utilizados para la generación de energía hidroeléctrica.

La generación de energía hidroeléctrica se obtiene a partir de la construcción de una central hidroeléctrica que es capaz de utilizar la energía potencial del agua almacenada o embalsada y convertirla en energía eléctrica, esto se realiza a través de un sistema de captación de agua, que es conducida a las turbinas, al pasar por estas a gran velocidad el agua provoca un movimiento de rotación que se transforma en energía eléctrica por medio de los generadores, una vez que el agua pasa por los generadores es devuelta río abajo (EPEC, 2012).

Los embalses artificiales más importantes en el Ecuador son:

Daule-Peripa: perteneciente a la Central Hidroeléctrica Marcel Laniado, ubicado en la intercepción de las provincias de Los Ríos, Manabí y Guayas, el mismo que cuenta con volumen de 6000 hm³ y una longitud de 32.17 km . Los principales usos de este embalse son el abastecimiento de agua para las ciudades de Guayaquil, Daule, Balzar, Santa Lucía y Pichincha, controlar las inundaciones en el valle bajo del río Daule, la generación hidroeléctrica con una capacidad de 213 MW, así como el riego de aproximadamente 50000 hectáreas (CAMINOSCA, 2010).

Chongón: ubicada en la provincia de Los Ríos, con la presa del mismo nombre. Su uso principal es para riego, agua potable y recreación.

La Esperanza: con la presa del mismo nombre, ubicada en la provincia de Manabí; almacena un volumen de 450 hm³ y tiene un multipropósito que permite el control de inundaciones, la producción de agua de riego y el consumo humano (CELEC, 2013a).

Agoyán: con la presa del mismo nombre, forma parte de la Central Hidroeléctrica Agoyán que se encuentra ubicada en la provincia de Tungurahua. El principal uso de este embalse es la generación eléctrica,

siendo esta central la tercera más importante del país con una potencia de 156 MW (ASTECC, 1987).

Tahuín: con la presa del mismo nombre está ubicado sobre el río Arenillas en la provincia de El Oro, con un embalse aproximado de 4 hm³. Sus principales usos son: Riego para 8000 hectáreas, abastecimiento de agua para las ciudades de Arenillas y Huaquillas, control de inundaciones en la cuenca media y baja del río Arenillas, generación de energía hidroeléctrica con una producción aproximada de 3.5 MW, pesca y recreación (INP, 2013).

Pisayambo: forma parte de la Central Hidroeléctrica Pucará, está ubicado en la provincia de Tungurahua, dentro del Parque Nacional Llanganates, este embalse cuenta con una extensión de 8 km² (CELEC, 2011).

Poza Honda: este fue el primer embalse construido en el Ecuador, localizado en la provincia de Manabí para proveer de agua potable e irrigación en el valle de Portoviejo (YELA, 2004).

Mazar: perteneciente a la Central Hidroeléctrica del mismo nombre con un volumen total de 410 hm³ y con una longitud aproximada de 31 km.

Amaluza: pertenece a la central “Molino” que tiene una capacidad de almacenamiento de 120 hm³.

2.3 Impactos ambientales de los embalses artificiales

Los embalses por su naturaleza, provocan impactos positivos y negativos en varios aspectos, destacándose los aspectos ambiental y energético. Entre los impactos negativos de un embalse están: cambiar la dirección del flujo del agua y lograr que se altere la morfología fluvial del lecho, provocar cambios en nutrientes y sedimentos, y con esto alterar los ecosistemas adyacentes, acumular contaminantes y provocar que la calidad del agua disminuya; es decir, los embalses provocan cambios aguas arriba y aguas abajo en los parámetros físicos, químicos y ecológicos. Sin embargo, también existen efectos positivos de los embalses como: regular los caudales de crecida evitando la ocurrencia de inundaciones; en tiempos de estiaje sirven como una

reserva o almacenamiento de agua, creando una diferencia de nivel para la generación de energía eléctrica. Desde el punto de vista turístico, los embalses son un lugar muy atractivo para las personas.

Los embalses son altamente dependientes de los procesos que ocurren en su entorno. Su estado trófico depende fundamentalmente de la carga de nutrientes que recibe, de su morfometría (estudio cuantitativo de las características físicas de una cuenca hidrográfica) y del tiempo de residencia del agua en el mismo (Betancourt, 2008).

La eutrofía de una masa de agua se debe a la existencia de altas concentraciones de nutrientes (nitrógeno y fósforo principalmente), que determinan un gran desarrollo de las algas (fitoplancton, sobre todo). Cuanto mayor es la eutrofía, mayor es el riesgo de anoxia en las capas profundas. Existe un proceso de sucesión natural desde la oligotrofía (aguas pobres en nutrientes) hasta la eutrofía (aguas ricas en nutrientes), pero es muy lento, durando siglos e incluso milenios (Toja, 1982). En la actualidad es posible hablar de una eutrofización cultural, provocada por la intervención del hombre, el cual debido al crecimiento de su población va transformando su entorno. Las descargas de aguas servidas son una de las más antiguas causas de la eutrofización cultural, ya que son ricas en nutrientes contribuyendo al cambio trófico del cuerpo receptor. El exceso de fertilizantes ya sean naturales o químicos es otra causa de este problema, debido a su alto contenido en fósforos. La carga de nutrientes también se ve influenciada al existir deforestación, puesto que al haber un escurrimiento y al pasar por una tierra que no tiene protección, lavan la capa fértil y llevan consigo los nutrientes de la misma (UMSS, 2003). Teniendo claro que los embalses producen cambios en los nutrientes y éstos a su vez son primordiales para la vida en los ecosistemas, se ve la importancia de estudiar el ciclo del nitrógeno y del fósforo.

2.3.1 Ciclo del nitrógeno

El nitrógeno es un nutriente fundamental del que depende la vida vegetal, microbiana y animal. El nitrógeno inorgánico, medido como la suma de nitrato más nitrito, es un indicador del grado de estrés trófico de los ecosistemas como resultado de las actividades del ser humano. Los caminos que sigue el nitrógeno al viajar por el medio ambiente son complejos. Por ser el gas más abundante en la atmósfera, llega a las cuencas mediante procesos naturales que incluyen la transformación química, el lavado (precipitaciones) y la fijación biológica (Morábito, 2009).

Estos aumentos surgen de la aplicación generalizada de fertilizantes, de los vertidos de aguas residuales de zonas domésticas e industriales, y de la materia orgánica muerta (excrementos y orina de animales), que contienen compuestos orgánicos complejos ricos en nitrógeno. Una serie de bacterias y hongos presentes en los suelos transforman el nitrógeno de los aminoácidos y proteínas, y se deshacen del nitrógeno restante en forma de iones amonio. Este proceso recibe el nombre de amonificación. Otras bacterias presentes en los suelos oxidan estos iones amonio y los transforman en iones de nitrato, desprendiendo energía en un proceso denominado nitrificación. Algunos de estos nitratos pasan a las aguas subterráneas, junto con el agua procedente de lluvias, que finalmente llegan a los ríos. Estos iones de nitrato penetran en las células de las plantas, donde son nuevamente reducidos a iones amonio y transformados en componentes que contienen carbono para producir aminoácidos y otros componentes orgánicos ricos en nitrógeno. Esta transformación se denomina aminación. Al morir las plantas, estos aminoácidos y componentes orgánicos pasan a los suelos. Igualmente pueden pasar a ella a través de los excrementos y orines de los animales que se comen las plantas. De este modo vuelve a dar comienzo el proceso inicial de amonificación (Castillo, 2014).

El nitrógeno tiene gran variedad de estados de oxidación, que va desde el +5 al -3; a continuación se presenta una tabla con los principales compuestos nitrogenados que intervienen en la calidad de las aguas:

Tabla 2-1 Compuestos Nitrogenados que intervienen en la calidad del agua y Estados de oxidación (Sales, 2008).

NOMBRE	ESTADO DE OXIDACIÓN	COMPUESTO
Amonio	-3	NH_3, NH_4^+
Nitrito	+3	NO_2^-
Nitrato	+5	NO_3^-
Nitrógeno Gas	0	N_2
Nitrógeno Orgánico	---	---

Estos compuestos pueden dividirse en dos grupos:

- Nitrógeno Orgánico: Se puede encontrar en forma disuelta o particulada.
- Nitrógeno Inorgánico Disuelto: que son amonio, nitritos y nitratos.

Principales Transformaciones Biogeoquímicas del Nitrógeno:

1. Fijación del Nitrógeno: El nitrógeno gaseoso (N_2) se puede fijar en diversos microorganismos (bacterias y cianofíceas) formando parte de la materia orgánica como Nitrógeno Orgánico (N-Org.) y por tanto incorporado al agua. Estos organismos pueden estar en forma libre siendo autótrofos o heterótrofos, pero también formando asociaciones simbióticas.
2. Amonificación o Mineralización: Este proceso se da cuando se produce la muerte celular de la materia orgánica en la cual estaba fijado el nitrógeno; se descompone y se da una liberación de amonio (NH_4^+). Los responsables de la degradación de la materia orgánica son las bacterias Heterótrofas, las cuales utilizan la misma como fuente de carbono liberando Nitrógeno Amoniacal.
3. Asimilación de Amonio: es el proceso contrario a la mineralización; es decir, los organismos consumen amonio como nutriente para su desarrollo, convirtiéndose en parte de su biomasa en forma de nitrógeno orgánico.
4. Nitrificación: es uno de los procesos más importantes en el cual se da la oxidación del amonio en dos fases, la primera fase consiste en la oxidación del amonio en nitrito producida por una bacteria autótrofa quimiosintética (bacterias aerobias) del género Nitrosomonas y la segunda fase es la oxidación del nitrito a nitratos la cual es producida por la misma bacteria pero del género Nitrobacter.

5. Reducción Asimilativa del Nitrato: aquí el nitrato es adsorbido y reducido a amonio antes de pasar a formar parte de la biomasa
6. Reducción No Asimilativa del Nitrato: por la acción de bacterias heterótrofas el nitrato es reducido en condiciones anaerobias a amonio.
7. Desnitrificación: es un proceso anóxico clave en el ciclo del nitrógeno, puesto que es una salida del sistema y hace disminuir la cantidad disponible para los productores primarios. Consiste en la reducción del NO_3^- a cualquier especie de nitrógeno gas, generalmente N_2 o N_2O (gases no utilizables y de fácil difusión en la atmósfera). Son producidos por bacterias heterótrofas facultativas del género *Pseudomonas*, *Micrococcus*, *Achromobacter* y *Bacillus*; las cuales obtienen de la materia orgánica la fuente de carbono y del nitrato en ausencia de oxígeno o del oxígeno el aceptor final de electrones.
8. Oxidación Anaeróbica del Amonio: se produce al desnitrificar nitrato utilizando amonio como dador de electrones, se conoce como Anammox (Sales, 2008).

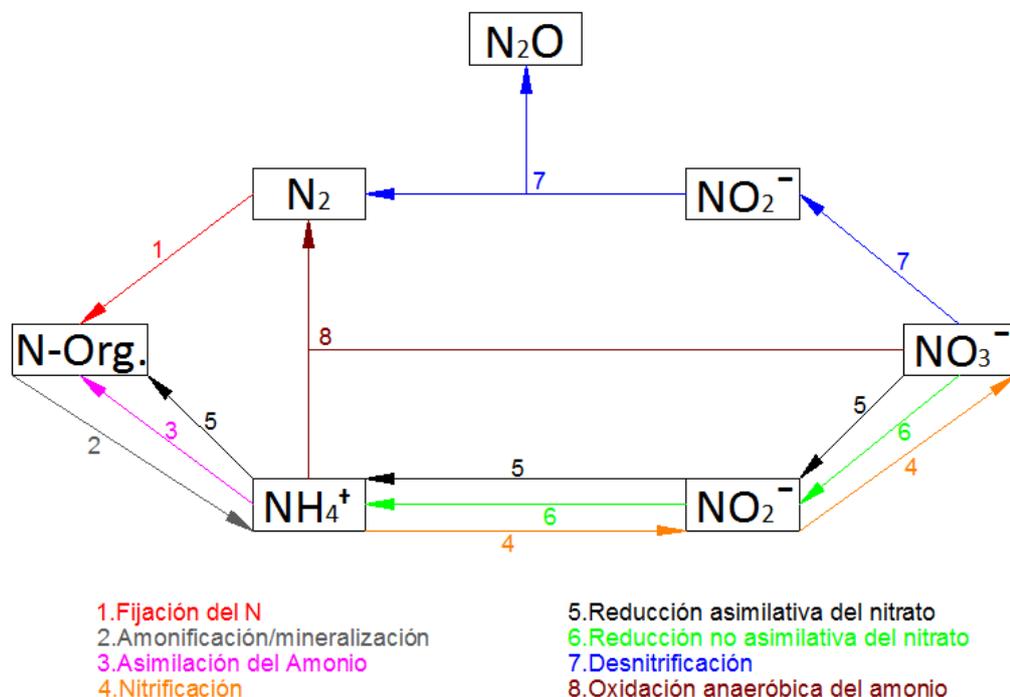


Figura 2-2 Transformaciones biogeoquímicas del Nitrógeno (Sales, 2008)

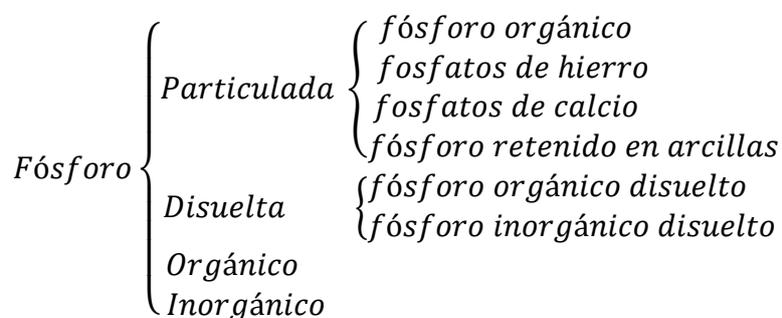


2.3.2 Ciclo del fósforo

El fósforo es un componente fundamental de los organismos vivos, ya que forma parte del ADN, ARN, Fosfolípidos, ATP y c-AMP. A diferencia del ciclo del Nitrógeno que tiene sus reservas en la atmósfera la del fósforo tiene reservas de tipo sedimentario; esto se debe a que el fósforo se encuentra en la mayoría de minerales y rocas que por disgregación y lavado llegan al agua (Sales, 2008). Además puede ser también de origen artificial encontrado en efluentes doméstico (excreciones del metabolismo humano), efluentes industriales (detergentes en aguas servidas), fertilizantes agrícolas (bosques artificiales, pastizales o áreas agrícolas) (UDELAR, 2012). Respecto a los detergentes de limpieza doméstica, son los causantes del 50% de fósforo presente en aguas contaminadas por vertidos urbanos (Marín, 2003).

El fósforo es factor limitante para el crecimiento del fitoplancton, pero su provisión en agua se agota si no se renueva, dada la imposibilidad de su fijación desde la atmósfera. Por el contrario, si el contenido de un medio hídrico en fósforo es muy alto se produce un notable incremento de la actividad fitoplanctónica, con los consiguientes problemas de agotamiento de oxígeno del agua y exceso de materia orgánica producida, los cuáles dan lugar al fenómeno de eutrofización (Marín, 2003). Por lo general se presenta en forma pentavalente; es decir, en estado de oxidación +5 llamado fosfato ($PO_4^{=}$)

Las formas en que se encuentra el fósforo son:



Ciclo del Fósforo en ecosistemas acuáticos:

1. El fitoplancton absorbe fosfatos y consume Fósforo Orgánico Disuelto (POD), pudiendo también liberar ambos tipos de compuestos al medio. [vínculos 1-8-2 respectivamente en la figura 2-3].
2. Con su muerte aumenta la Materia Orgánica Muerta Suspendida en el medio [vínculo 4 en la figura 2-3], bien de esta forma o como fitoplancton vivo o senescente que sedimenta hasta el fondo [vínculo 17 en la figura 2-3].
3. El zooplancton consume fitoplancton y bacterias; y con sus excreciones liberan fosfatos y POD; con su muerte y heces aumenta la materia orgánica muerta suspendida en el agua [vínculos 3-6-2-4-5 respectivamente en la figura 2-3].
4. Las bacterias absorben fosfatos y utilizan el POD, degradando la materia orgánica muerta suspendida. [vínculos 1-9-7 respectivamente en la figura 2-3].
5. En la autólisis bacteriana se libera fosfatos y POD [vínculo 11 en la figura 2-3].
6. La materia orgánica muerta suspendida puede llegar a sedimentar o degradarse abióticamente a POD y posteriormente a fosfatos [vínculos 14-10-10 respectivamente en la figura 2-3].
7. Los fosfatos pueden formar partículas minerales al combinarse con cationes (calcio, Hierro, etc.) o ser absorbidas en ellas; pueden formar también partículas que podrían llegar a sedimentar o producir una deserción y disolución liberando de nuevo fosfatos. [vínculos 12-14-13 respectivamente en la figura 2-3].
8. Por último se puede producir una resuspensión de los sedimentos o una liberación de fosfatos desde éstos [vínculo 15-16 respectivamente en la figura 2-3]. (Sales, 2008)

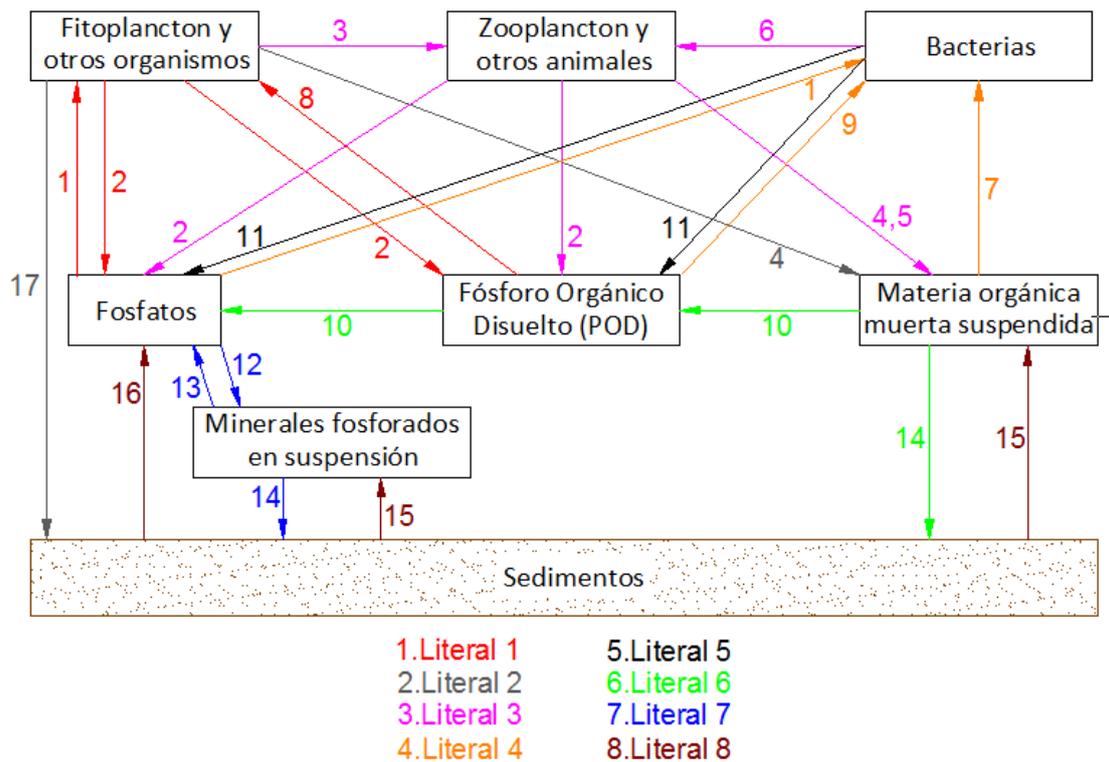


Figura 2-3 Ciclo del Fósforo en Ecosistemas Acuáticos, (Sales, 2008)

2.4 Otros procesos físico químicos ocurrentes en embalses

Otros procesos físico químicos que ocurren en los embalses es la sedimentación, degradación anaerobia de material orgánico particulado al fondo del embalse, termoclina y fotosíntesis en la capa superficial. A continuación se detalla cada uno de estos procesos:

2.4.1 Sedimentación:

Los procesos físicos químicos generados por los sedimentos tiene dos dimensiones principales:

Dimensión física: es la pérdida de la capa arable del suelo y la degradación de la tierra como consecuencia de la erosión laminar y por cárcavas, que dan lugar a niveles excesivos de turbidez en las aguas receptoras y produce repercusiones ecológicas y físicas en lugares alejados, lechos de ríos, lagos y embalses en donde se produjo la deposición. Los altos niveles de turbidez limitan la penetración de luz solar en la columna de agua, lo que impide el crecimiento de algas y de plantas acuáticas enraizadas, inclusive este

efecto nocivo se da en aguas poco profundas en estado hipertrófico (rico en nutrientes). En este sentido, la turbidez puede ser "beneficiosa" en los lagos muy eutróficos; no obstante, muchos países reconocen que esta situación es perjudicial por razones estéticas y económicas, por lo que se busca procesos para reducir la turbidez y los niveles de nutrientes. Los altos niveles de sedimentación dan lugar a la perturbación física de las características hidráulicas del cauce del cuerpo de agua, esto puede tener efectos dañinos a las funciones hidráulicas del embalse (FAO, 1997).

Dimensión química: la parte de los sedimentos constituida por limo y arcilla es transmisora primaria de productos químicos adsorbidos, especialmente fósforo, plaguicidas clorados y la mayor parte de los metales, que son transportados al sistema acuático. La contribución de los sedimentos a la contaminación química está vinculada al tamaño de sus partículas y al volumen de carbono orgánico asociado con estos. En el caso del fósforo y metales, el tamaño de las partículas es de mucha importancia, debido a la gran superficie externa de partículas muy pequeñas. Muchos de los contaminantes persistentes, bioacumulados y tóxicos, especialmente los compuestos clorados incluidos en muchos plaguicidas, están fuertemente asociados con los sedimentos y en especial con el carbono orgánico transportado como parte de la carga de sedimentos de los ríos. La degradación anaerobia de material orgánico al fondo del embalse impide la vida de los seres superiores y elimina a los organismos aerobios (FAO, 1997).

2.4.2 Degradación anaerobia de material orgánico:

Es un proceso complejo ya sea por el número de reacciones bioquímicas que tienen lugar, así como también por la cantidad de bacterias involucradas en ellas. El proceso de degradación anaerobia se divide en 4 etapas:

- a) Hidrólisis: Consiste en una transformación controlada por enzimas extracelulares, en la que las moléculas orgánicas complejas y no disueltas, se rompen en compuestos susceptibles de emplearse como fuente de materia y energía para las células de los microorganismos.

- b) Etapa fermentativa o acidogénica: Esta etapa es controlada por bacterias, consiste en la transformación de los compuestos formados en la primera etapa en otros de peso molecular intermedio; como dióxido de carbono, hidrógeno, ácidos y alcoholes alifáticos, metilamina, amoníaco y sulfhídrico
- c) Etapa acetogénica: Los ácidos y alcoholes que provienen de la acidogénesis se van transformando por la acción de bacterias en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono.
- d) Etapa metanogénica: Esta última etapa consiste en la transformación bacteriana del ácido acético y del ácido fórmico en dióxido de carbono y metano, además la formación de metano a partir de dióxido de carbono e hidrógeno (AGROWASTE, 2013).

2.4.3 Termoclina:

El agua posee una gran capacidad calorífica, donde las aguas más superficiales de los embalses tienen más sensibilidad a las variaciones de la temperatura atmosférica y tienen la tendencia de igualarla, esto provoca un desequilibrio térmico y de densidad con las capas inferiores. En la época de verano la capa superficial se calienta y se convierte en una capa menos densa sin mezclarse con las capas inferiores; en poco tiempo se llega a una situación de equilibrio en donde el embalse queda dividido en dos capas que son: las aguas superficiales (epilimnion) y las aguas profundas (hipolimnion) que se encuentran separados por una franja (termoclina), donde la temperatura del agua cambia rápidamente. La termoclina se encuentra normalmente entre los 10 y 20 metros de profundidad y se considera como tal cuando hay un gradiente de aproximadamente un grado centígrado por metro de profundidad (CITMA, 2015).

2.4.4 Fotosíntesis:

La presencia de luz es otro parámetro importante; en verano con el aumento de temperatura y abundancia de nutrientes (por la mezcla de agua) permite que las algas (en especial diatomeas y pequeñas algas en suspensión) empiecen a

proliferar a gran velocidad. Las condiciones varían completamente (se llega a la situación de estratificación), puesto que las algas microscópicas encargadas de la producción primaria situadas en la zona fótica (fitoplancton), van consumiendo nutrientes del agua. En el final del verano los recursos se vuelven más escasos ya que sin mezcla no hay resuspensión de los nutrientes del fondo y consecuentemente la producción va disminuyendo. En esta fase también proliferan especies más grandes que a causa de la baja turbulencia y del agotamiento de nutrientes, deben buscar alguna forma de permanecer en suspensión y desplazarse para poder alimentarse, como por ejemplo las algas dinoflageladas (CITMA, 2015).

La zona fótica y el epilimnion no tienen por qué coincidir, generalmente dependiendo de la turbidez del agua la luz llega hasta unos 5 metros como máximo, en donde se dan los procesos fotosintéticos. La transparencia de las aguas también vendrá condicionada por su producción, si la luz hace posible la fotosíntesis habrá crecimiento de algas, con lo cual se reducirá la capa fótica. En cambio en el hipolimnion la fotosíntesis no es posible y por lo tanto, los procesos que tienen lugar son respiratorios y de descomposición de materia orgánica que sedimenta desde la superficie, pero como el agua no se mezcla, estos quedan almacenados sin poder ser aprovechados por los productores primarios. Es así como al principio del invierno tenemos un sistema diferenciado en una capa fótica sin nutrientes y una zona más profunda con abundantes nutrientes que no pueden ser utilizados por los organismos fotosintetizadores (CITMA, 2015).

2.5 Modelación matemática en embalses

En los últimos 20 años se han desarrollado análisis empíricos y teóricos de eutrofización para ser aplicados en embalses, siendo los modelos simplificados de fitoplancton útiles para una primera estimación de los efectos potenciales de una reducción en una carga de nutrientes.

El acercamiento básico de varios de los modelos es el balance de masa del nutriente limitante. El fósforo es a menudo citado como el nutriente limitante en

el control de fitoplancton en lagos y embalses, esta conclusión deriva mayormente de estudios realizados en regiones templadas de América del Norte y Europa, por lo que se ha desarrollado la idea de que el crecimiento algal quedará limitado por el fósforo en la mayoría de lagos y embalses (González, 2012). Algunos estudios sugieren que los sistemas lacustres en la región tropical están más frecuentemente limitados por el Nitrógeno que por el Fósforo (Vincent, 1984).

Los modelos de **Fósforo Total** para predecir la respuesta trófica en embalses se basan en dos tipos de relaciones:

- La ecuación de balance de masas
- Ecuaciones empíricas aplicando los análisis de regresión linear simple.

El desempeño de este modelo se puede calificar como bueno ya que existe una alta correlación entre los valores de fósforo medidos y los calculados.

El modelo de **Clorofila "a"** es muy útil y es ampliamente utilizado para predecir la densidad de algas en los lagos, para este método se deben utilizar mínimo 30 datos para que sea confiable.

El modelo del **Nitrógeno Total** parece no existir una relación estadísticamente significativa entre la tasa de sedimentación del nitrógeno como función de la profundidad o del tiempo de retención, este modelo es considerado como preliminar y debe ser desarrollado más.

Entre los modelos más utilizados y conocidos en el mundo se pueden citar los siguientes:

- QUAL 2E: este es un modelo para calidad de agua de ríos y corrientes de flujo, es unidimensional y se puede utilizar cuando la corriente de flujo está bien mezclada longitudinalmente y transversalmente; así como la hidráulica del río es constante ya que impone un flujo constante (EPA, 2015a), este modelo es desarrollado por la EPA y es capaz de simular una serie de componentes como: Temperatura, pH, DBO, Nitrógeno

Orgánico, NH₃, NO₂, NO₃, Nitrógeno total, Fósforo Orgánico e Inorgánico, Fitoplancton y Algas de fondo (Guano, 2014).

- HSPF (Hydrological Simulation Program): este modelo simula la hidrología y la calidad de agua para contaminantes tóxicos y orgánicos, puede ser usado para modelar el destino y transporte en canales unidimensionales (Shilling, 2014). El modelo HSPF utiliza información, tal como la evolución temporal de las precipitaciones, la temperatura y la radiación solar; características de la superficie de la tierra como los patrones de uso del suelo; y las prácticas de manejo del suelo para simular los procesos que ocurren en una cuenca. El resultado final es una evolución temporal de la cantidad y calidad de la escorrentía de una cuenca urbana o agrícola; así como también la predicción de caudal, carga de sedimentos y las concentraciones de nutrientes y pesticidas (SSG, 1998).
- WASP (Water Quality Analysis Simulation Program): este modelo facilita la predicción e interpretación de la calidad de agua ante un fenómeno natural o antrópico, así como simular el comportamiento dinámico, analizar sistemas en una, dos o tres dimensiones. Además considera la variabilidad temporal de los diferentes fenómenos o procesos analizados y las condiciones presentes en las fronteras del modelo. WASP analiza también aspectos hidrodinámicos y parámetros como profundidades, velocidades, temperatura, salinidad y flujos de sedimentos (García, 2008).
- AQUATOX: es un modelo de simulación para ecosistemas acuáticos, el mismo que predice comportamiento de varios contaminantes como los nutrientes y productos químicos orgánicos, y sus efectos sobre el ecosistema, incluidos los peces, invertebrados y plantas acuáticas. Este modelo es útil para ecologistas, biólogos, modeladores de la calidad de agua y para cualquier persona que participe en la realización de evaluaciones de riesgo ecológico para los ecosistemas acuáticos (EPA, 2015b).



Los modelos matemáticos en embalses nos permiten predecir los impactos en la calidad de agua, debido a los cambios en la actividad de la cuenca y así establecer prioridades en función del uso del recurso hídrico. Para la utilización de los modelos se debe tener un buen conocimiento de las características de la cuenca y del embalse, así como las restricciones de cada modelo. Conociendo el impacto en la calidad del agua podemos seleccionar las medidas de control más pertinentes en función del uso que se quiera dar al agua (Salas, 2001).

CAPÍTULO 3: MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Descripción General del Proyecto

Los embalses Mazar y Amaluza son parte del Proyecto Hidroeléctrico Paute Integral, situado en la provincia del Azuay, en la zona sur del Ecuador.

Se encuentran ubicados en la cuenca del río Paute, la cual cubre una superficie de aproximadamente 6439 km², y se encuentra compartida en los territorios de tres provincias: Azuay (57%), Cañar (24%) y Morona Santiago (19%) (Dominguez, 2013). La topografía de la cuenca es montañosa e irregular, la temperatura media anual es de 20 °C, con una humedad relativa de 90% y una precipitación media anual de 2000 mm (Cisneros, 2013). El principal uso del suelo en esta zona son pastizales de mala calidad con un manejo inadecuado, la agricultura se basa principalmente en cultivos de maíz, frejol y tomate de árbol, los dos primeros para autoconsumo y el último con fines comerciales, también en zonas occidentales se puede encontrar plantaciones florícolas que son destinadas principalmente a la exportación. Como principales fuentes de ingresos para las familias se tienen la producción de leche y tomate de árbol (ACOTECNIC, 2006).

El proyecto Paute Integral está orientado al aprovechamiento hídrico del río Paute, haciendo uso de su gran caudal, la diferencia de niveles existentes en la zona, haciéndose aprovechable su energía potencial para la generación hidroeléctrica, este proyecto permite sustituir los recursos no renovables por fuentes renovables de generación eléctrica. Está conformado por cuatro centrales: Molino, Mazar, Sopladora y Cardenillo y la construcción de dos embalses Mazar y Amaluza para una generación hidroeléctrica de 2200 MW aproximadamente.

La Central Mazar inició su operación en el año 2010, Mazar incrementa la energía media de la Central Molino y la futura Central Sopladora en un 12%, el incremento de la generación promedio anual en la Central Molino es de 548 GWh y la generación hidroeléctrica en conjunto de la central Mazar y Molino se estima en 6175 GWh año⁻¹, el proyecto está formado por una presa de

enrocado con pantalla de hormigón que forma un embalse de 410 hm³ (CONELEC, 2010). Mazar constituye una gran fuente de sustitución de energía térmica, ya que ésta ahorra más de 100 millones de galones de combustible que generalmente son comprados a países extranjeros.

La Central Molino se encuentra aguas abajo de la central Mazar, ésta tiene una potencia de 1110 MW y una producción anual de 4900 GWh, es la Central Hidroeléctrica en operación más grande del Ecuador y la que más energía produce, generando entre el 40% y 60% del total de energía que es consumida en el territorio nacional, consta de una presa de arco gravedad y diez unidades de generación con turbinas tipo Pelton.

La Central Sopladora se encuentra aguas abajo de la Central Molino y captará un caudal turbinado de hasta 150 m³ s⁻¹ directamente de los túneles de descarga de Paute Molino. Mientras que el proyecto Cardenillo se desarrollara directamente aguas abajo de la Central Paute Sopladora, teniendo una conexión directa entre las dos centrales, por lo que las dos utilizarán el mismo caudal. Se espera una potencia de al menos 400 MW y 2200 GWh (CELEC, 2013c).

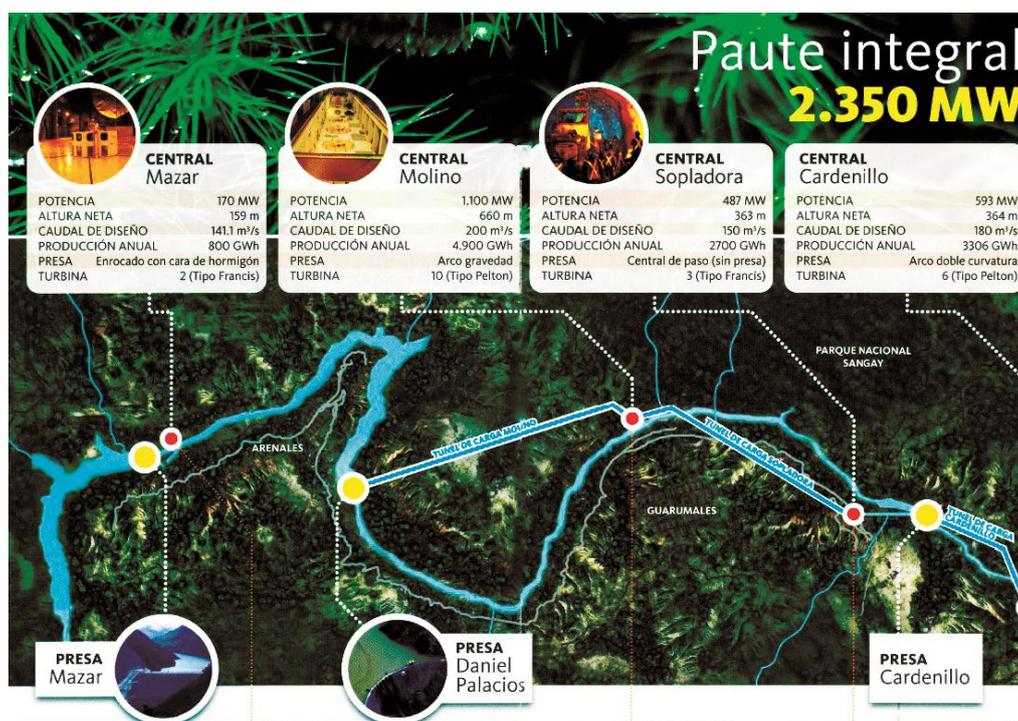


Figura 3-1 Descripción General del Proyecto Paute Integral (CELEC, 2013d)

3.1.1 Embalse Amaluza

El embalse Amaluza se encuentra en las coordenadas UTM: 770510, 9713549 (Cisneros, 2013), es parte de la Central Hidroeléctrica Paute Molino formado a partir de la Presa Daniel Palacios, el mismo se encuentra a 115 km de la ciudad de Cuenca.

Tabla 3-1 Características Generales del Embalse Amaluza (Cisneros, 2013).

Características	Unidad	
Tiempo de operación	años	29
Longitud	km	10
Profundidad máxima	m	100
Volumen	hm ³	120
Caudal de ingreso medio anual	m ³ s ⁻¹	110
Potencia	MW	1100
Producción anual	GWh año ⁻¹	4900



Figura 3-2 Central Molino, Presa "Daniel Palacios" y Embalse Amaluza (CELEC, 2010)

3.1.2 Embalse Mazar

El Embalse Mazar es parte de la central Hidroeléctrica Mazar, siendo el primer aprovechamiento aguas arriba del río Paute, se ubica en las inmediaciones de la unión del río Paute con el río Mazar. Este embalse permite una mayor regulación del caudal del río Paute, incrementa la energía firme de la central Molino y retiene los sedimentos que arrastra el río Paute (P. Alvarado, 2013).

Tabla 3-2 Características Generales del Embalse Mazar (Cisneros, 2013).

Características	Unidad	
Tiempo de operación	años	2
Longitud	km	31
Profundidad máxima	m	99
Volumen	hm ³	410
Caudal de ingreso medio anual	m ³ s ⁻¹	120
Potencia	MW	170
Producción anual	GWh año ⁻¹	800



Figura 3-3 Presa y Embalse Mazar (C. CAMINOSCA, 2005)

3.2 Modelo “*Basins*” en embalses

El modelo *Basins* (EPA, 2013b) es una herramienta informática que permite modelar la calidad del agua y evaluar las cuencas hidrográficas; aplicando herramientas de evaluación, planificación y ejecutando varios modelos de carga y de calidad del agua. *Basins* es una plataforma de modelación matemática configurada para realizar estudios ambientales y ecológicos en una cuenca hidrográfica. El sistema es flexible y puede apoyar el análisis en una variedad de escalas utilizando herramientas que van de lo simple a lo sofisticado. Puede ser utilizado también como un sistema de análisis de cargas de contaminantes totales, para lo cual se requiere un enfoque basado en las cuencas hidrográficas que integre tanto las fuentes puntuales como las no puntuales para una variedad de contaminantes.

Los métodos tradicionales que se utilizan para evaluaciones de cuencas involucran muchos pasos separados; es decir, preparar los datos, resumir la información, desarrollo de mapas, tablas y la aplicación e interpretación de modelos. Cada paso se realiza utilizando una variedad de herramientas y sistemas informáticos. La aplicación aislada de estos pasos puede resultar en una falta de integración, coordinación limitada, y ejecución que requiere mucho tiempo (EPA, 2013a).

Basins al ser una herramienta totalmente integral de gestión de las cuencas hidrográficas, puede enlazarse con cualquier sistema de información geográfica (GIS); es decir, en cualquier programa GIS puede organizarse la información espacial como mapas, tablas, gráficos, información del paisaje, etc.; y toda esta información ser llevada o exportada de una manera muy fácil a *Basins*. Con esta amplia gama de información y al poseer *Basins* un conjunto de componentes interrelacionados (PLOAD, SWMM, WASP, AQUATOX, HSPF, SWAT) para llevar a cabo análisis ambientales de diversos aspectos, se puede realizar estudios de descargas de fuente puntual o difusa, simulación de lluvia o escorrentía, modelado de sistemas acuáticos frente a fenómenos naturales y contaminación artificial, modelado de sistemas acuáticos prediciendo el destino de varios contaminantes como nutrientes y productos químicos orgánicos,

simulación continua de procesos biológicos de la superficie, simulación de la hidrología respectivamente (EPA, 2013a).

Basins al unirse al programa *Aquatox* proporciona el volumen, área, longitud, altitud, forma, pendiente, profundidad máxima, profundidad media, pendiente de los escarpes, etc., que es información importante para la modelación matemática de los contaminantes en los embalses. Además nos permite examinar los datos en varias escalas, delimitando cuencas o separando lugares de estudio; esto permite determinar áreas más problemáticas, comparar las cuencas hidrográficas o investigar con datos más a fondo a los embalses (EPA, 2013a).

3.3 Modelo “Aquatox” para modelación matemática de contaminantes en embalses

Aquatox es un modelo de simulación para los sistemas acuáticos. *Aquatox* predice el destino de varios contaminantes, como los nutrientes y productos químicos orgánicos, y sus efectos sobre el ecosistema, incluidos los peces, invertebrados y plantas acuáticas (EPA, 2014b).

Aquatox simula la transferencia de biomasa y productos químicos de un compartimento del ecosistema a otro. Lo hace calculando simultáneamente importantes procesos químicos y biológicos en el tiempo. *Aquatox* simula múltiples factores de estrés ambientales (incluyendo nutrientes, cargas orgánicas, sedimentos, productos químicos tóxicos, y temperatura) y sus efectos sobre las comunidades de algas, macrófitos, invertebrados y peces. *Aquatox* puede ayudar a identificar y entender las relaciones de causa y efecto entre la calidad química del agua, el medio ambiente físico, y la vida acuática (EPA, 2014a).

El modelo *Aquatox* es un modelo de simulación que vincula contaminantes con la vida acuática de un lago, estanque, corriente, depósito, recinto o estuario de agua; también predice los efectos de múltiples factores de estrés como los nutrientes, tóxicos orgánicos, temperatura, sedimentos suspendidos y flujo y puede ser evaluado en ambientes representativos o en un sitio específico.

Este modelo es un software libre distribuido por US EPA (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América). Es el modelo más completo y versátil descrito en la literatura (A A Koelmans, 2001). El mismo que presenta una interfaz amigable con el usuario que evita confusiones en parámetros a ingresar y en unidades de los mismos, así como también permite editar modelos ya realizados y crear modelos dinámicos de nutrientes iniciales, detritos, plantas, invertebrados, peces, volumen y caudales, temperatura, viento, carga solar, pH, químicos, cargas puntuales y no puntuales de nutrientes presentes en el estudio. Así como también permite una fácil edición de los resultados a presentarse como tablas y gráficos.

Según Wellman (2010), *Aquatox* es capaz de modelar:

- Concentraciones de nutrientes y tóxicos.
- Biomasa (plantas, invertebrados y peces).
- Clorofila “a”.
- Indicadores biológicos.
- Sólidos suspendidos totales.
- Oxígeno disuelto.
- Demanda Bioquímica de Oxígeno.
- Factores de Bio-acumulación.
- La vida media de tóxicos orgánicos.

3.4 Generación de Información para los Modelos Matemáticos

Para el estudio de los embalses Mazar y Amaluza se recopiló la información necesaria para la realización del mismo. Para la aplicación de modelos de calidad de agua se necesita una gran cantidad de datos sobre el medio a estudiar (Martínez, 2009). Por lo que se utilizaron datos meteorológicos, hidrológicos, biológicos, calidad de agua, geomorfológicos, y geográficos.

Para efecto de este estudio se segmentó el embalse Mazar en 5 partes y el embalse Amaluza en 4 partes, partiendo de los datos de los monitoreos existentes, ya que los puntos de monitoreo de los embalses se encuentran localizados en puntos de desembocadura de ríos importantes en donde se

podría dar un aporte de importante de nutrientes y de aquí radica la segmentación de los embalses. Dicha segmentación se puede observar en el capítulo de resultados en el subcapítulo 4.1

Tabla 3-3 División por tramos Embalse Mazar

Tramo #	Lugar
1	Sacre, Santul y Palmas
2	Q. Honda
3	Jordán
4	Shall
5	Presa

Tabla 3-4 División por tramos Embalse Amaluza

Tramo #	Lugar
6	Cercanía P. Sigales
7	Cercanía río Juval
8	Límite de Lechuguín
9	Pie de Presa

3.4.1 Datos Meteorológicos

Los datos meteorológicos de **Velocidad del Viento** y **Radiación Solar** fueron proporcionados por el Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales de la Universidad de Cuenca, a través de la Estación Meteorológica Estéreo sin nombre situada en la cercanía del embalse Mazar.

Tabla 3-5 Código y Coordenadas de la Estación Meteorológica.

Tipo	Código	X(m)	Y(m)
Meteorológica	MAZ_04_MT_01	755086	9718706

Los datos antes mencionados se encuentran tomados desde el 01/01/2012 hasta el 09/07/2013, fecha en la que la estación fue retirada. La mencionada estación proporcionó los datos tomados cada 5 minutos en $m\ s^{-1}$ y $KW\ m^{-2}$ para la velocidad del viento y radiación solar, respectivamente.

Se realizó el promedio de los datos de cada día, exceptuando los datos iguales a cero ya que estos indican que la estación estuvo dañada o no estuvo trabajando por alguna razón.

3.4.2 Datos Hidrológicos

Los datos de **Caudal** de salida de los dos embalses fueron obtenidos a través de la página web de la Corporación Eléctrica del Ecuador (CELEC, 2014) , la misma que lleva un registro histórico de caudales de los embalses obteniéndose datos desde el 01/01/2011 hasta el 25/11/2013 en $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ y posteriormente se pasó a $\text{m}^3 \text{d}^{-1}$ para poderlo ingresar en el modelo *Aquatox*.

Para la elaboración del presente estudio también se debía contar con el caudal de entrada de cada tramo, así como el caudal difuso generado en cada uno de estos por lo que se procedió a realizar un balance de masas, suponiendo que el caudal del río Paute es igual al 85% del caudal de salida del embalse Mazar y que el caudal de salida del embalse Mazar será el caudal de entrada del embalse Amaluza. Obteniendo la siguiente ecuación.

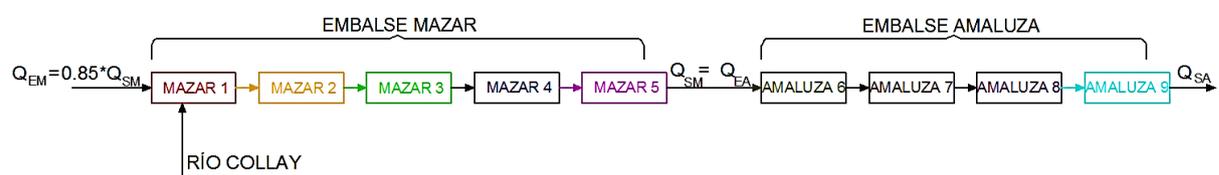


Figura 3-4 Esquema de Caudales en los embalses Mazar y Amaluza

$$Q_{dM} = Q_{SM} - Q_{EM} - Q_{Collay}$$

Q_{dM} = Caudal difuso de Mazar.

Q_{SM} = Caudal de salida de Mazar.

Q_{EM} = caudal de entrada de Mazar.

Q_{Collay} = Caudal del río Collay ($8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ en época húmeda y $3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ en época seca).



En donde el caudal difuso del embalse Mazar se divide para 31 km que es la longitud total del embalse obteniéndose un caudal difuso por km. Cuando se tiene el caudal difuso por km se incorpora a cada tramo dependiendo de su longitud.

Para el embalse Amaluza se realizó el mismo procedimiento generando la siguiente ecuación:

$$Q_{dA} = Q_{SA} - Q_{SM}$$

Q_{dA} = Caudal difuso de Amaluza.

Q_{SA} = Caudal de salida de Amaluza.

Q_{SM} = Caudal de salida de Mazar.

En donde el caudal difuso del embalse Amaluza se divide para 10 km que es la longitud total, así se obtiene un caudal difuso por km que se incorpora a cada tramo dependiendo de su longitud.

La **evaporación media anual** se obtuvo del evaporímetro situado en el embalse Amaluza siendo este valor igual a 1025 mm, o lo que equivale a 40.358 pulgadas año⁻¹ (CELEC, 2013f).

Los datos de **Volumen** al realizar la división por partes de los embalses se calcularon a partir de la cartografía generada, se obtuvo el volumen de cada tramo en el software ArcGIS 10.1 con la herramienta *Surface Volume* obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 3-6 Volumen por tramos Embalse Mazar

Tramo	Volumen (hm ³)
1	101.45
2	112.56
3	86.28
4	59.22
5	47.6
Total	407.11

Tabla 3-7 Volumen por tramos Embalse Amaluza

Tramo	Volumen (hm ³)
6	14.53
7	20.01
8	59.66
9	21.33
Total	115.53

3.4.3 Datos Biológicos

Al no contar con datos biológicos de plantas existentes en el modelo *Aquatox* se impuso datos biológicos de plantas (algas) del Informe de Factibilidad – Pacalori (PROMAS, 2012), ya que estos tipos de plantas si existen en el modelo *Aquatox*. Siendo estos:

Tabla 3-8 Datos Biológicos

Plantas	Unidad
Phyto Diatom	mg l ⁻¹ peso seco 0.0128250
Phyto Greens	mg l ⁻¹ peso seco 0.0005875
Phyto Blue green max	mg l ⁻¹ peso seco 0.0000580
Cryptomonad	mg l ⁻¹ peso seco 0.0961608

3.4.4 Datos de Calidad de Agua

Los datos de algunos importantes parámetros físico químicos de calidad de agua como **Amonio**, **Nitratos**, **Fosfatos**, **Oxígeno disuelto**, **Detritos**, **Temperatura del Agua**, **pH** se obtuvieron a través de mediciones realizadas por el equipo técnico del PROMAS – Universidad de Cuenca en 4 campañas durante los meses de abril, septiembre, noviembre del 2012 y enero del 2013 como se muestra en la Tabla 3-9 y Tabla 3-10, y realizadas en puntos representativos del embalse como se puede ver en la Tabla 3-11 y Tabla 3-12.

Tabla 3-9 Fechas de las Campañas de Muestreo Embalse Mazar.

Campaña #	Fecha
1	11/04/2012
2	12/09/2012
3	19/11/2012
4	17/01/2013

Tabla 3-10 Fechas de las Campañas de Muestreo Embalse Amaluza.

Campaña #	Fecha
1	26/04/2012
2	10/09/2012
3	21/11/2012
4	24/01/2013

Tabla 3-11 Código, Lugar y Coordenadas de los puntos de muestreo Embalse Mazar.

Código	Lugar	X(m)	Y(m)
MAZ-EMB-191112-01	Presa	763999	9711504
MAZ-EMB-191112-02	Shall	765008	9709709
MAZ-EMB-191112-03	Jordán	765113	9706871
MAZ-EMB-191112-04	Q. Honda	763965	9701620
MAZ-EMB-191112-05	Palmas	762428	9699321
MAZ-EMB-191112-06	Santul	760359	9698038
MAZ-EMB-191112-07	Sacre / Guachapala	756036	9694174

Tabla 3-12 Código, Lugar y Coordenadas de los puntos de muestreo Embalse Amaluza.

Código	Lugar	X(m)	Y(m)
AMA-EMB-211112-01	Pie de Presa	770546.4	9713109.6
AMA-EMB-211112-02	Límite Lechuguín	770759.8	9714159.2
AMA-EMB-211112-03	Cercanía río Juval	771564.3	9716884.7
AMA-EMB-061212-01	Cercanía P. Sigsales	770131.7	9716590.4

Los datos se encuentran en las siguientes unidades:

Tabla 3-13 Parámetros y Unidades de Datos de Calidad de Agua.

Parámetro	Unidad
Nitratos	mg l ⁻¹
Fosfatos	mg l ⁻¹
Oxígeno	mg l ⁻¹
Dióxido de Carbono	mg l ⁻¹
Detritos	mg l ⁻¹
Temperatura	°C
pH	-

En el caso del dióxido de carbono se impuso un valor de 0.69 mg l⁻¹, este valor se obtuvo de mediciones realizadas en el embalse El Peñol – Guatapé en su primera estación (Plaza, 1998). El lugar en donde se encuentra el embalse tiene características como clima, longitud, función similares al área del presente estudio.

3.4.5 Datos Geomorfológicos

Los datos geomorfológicos como el **Área**, **Profundidad Media**, **Profundidad Máxima**, se obtuvieron por medio del software *Basins* obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 3-14 Datos Geomorfológicas Embalse Mazar

Tramo #	Longitud (km)	Área (m ²)	Profundidad Media (m)	Profundidad Máxima (m)
1	18.62	7062325	39	78
2	5.6	2257175	54	108
3	3.03	1391375	57	114
4	1.96	808475	62	124
5	1.79	656500	77	154
Total	31	8527300		

Tabla 3-15 Datos Geomorfológicos Embalse Amaluza

Tramo #	Longitud (km)	Área (m ²)	Profundidad Media (m)	Profundidad Máxima (m)
6	4.6	605888	7	14
7	1.4	692568	9	18
8	3.34	1200972	35	70
9	0.67	280204	46	92
Total	10	2779632		

3.4.6 Datos Geográficos

Los datos de **latitud** del embalse se obtuvieron a través del software “CoordTrans” (FransonTechnology, 2014). Obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 3-16 Coordenadas y Latitud de los Embalses Mazar y Amaluza

Embalse	X(m)	Y(m)	Latitud
Amaluza	770510	9713549	-2.5892461
Mazar	763999	9711504	-2.6078431

3.5 Generación Cartográfica de los Embalses

A partir de las batimetrías y topografías de los embalses proporcionada por CELEC EP (Corporación Eléctrica del Ecuador HIDROPAUTE) y PROMAS (Programa para el Manejo del Agua y Del Suelo) respectivamente, se construyó los modelos cartográficos de los embalses, con el procedimiento explicado en el siguiente acápite:

3.5.1 Generación Cartográfica del Embalse Mazar

La información cartográfica de este embalse proporcionada por CELEC EP, consta de un documento en formato DWG (Formato AutoCAD 2010), que contiene la batimetría del embalse a escala 1:1000; con curvas de nivel cada 5 metros y van desde la cota más alta 2200 msnm hasta la cota más baja 2015



msnm. Otros datos obtenidos es la cota de talón o cota más baja del embalse 2000 msnm (CELEC, 2013f) y volumen del mismo 410 hm³ (CELEC, 2013b).

Se mejoró la batimetría del embalse Mazar, con el fin de obtener un volumen del embalse aproximado al volumen proporcionado por CELEC EP que es de 410 hm³, para ello se utilizó el programa AutoCAD Civil 3D 2013 (Autodesk, 2013) y se realizó los siguientes pasos:

- Se generó una superficie del embalse con curvas de nivel cada 2 metros, con lo cual se logró una topografía con mayor detalle del mismo.
- De la superficie generada se obtuvo los atributos de cada curva de nivel como son: área, perímetro y cota.
- Con estos atributos obtenidos en AutoCAD Civil 3D se realizó una hoja de cálculo en Excel, con la cual se encontró una distancia aproximada entre curvas de nivel, con el propósito de generar los 16 metros faltantes para llegar a la cota 2000 msnm que es la cota de fondo del embalse Mazar. Este procedimiento se realizó porque los datos entregados por CELEC EP son incompletos y constan hasta la cota 2016 msnm. Se calculó el volumen del embalse y se aproximó a los 410 hm³ que es el volumen deseado.

Para la siguiente parte del tratamiento de datos se utilizó la ayuda del programa ARCGIS 10.1(ESRI, 2012), el cual es un Sistema de Información Geográfica (GIS) que nos permite la creación y el uso de mapas; la compilación de datos geográficos, analizar la información mapeada, etc. Con el objetivo de:

- Georeferenciar las curvas de nivel con el sistema de coordenadas “WGS 1984 UTM Zone 17S”, que es el correspondiente al Sur del Ecuador.
- Eliminar el exceso de puntos, con la finalidad de generar una superficie más real, conservando la forma esencial del embalse.
- Obtener un Modelo Digital de Elevaciones (DEM) del embalse, modificando el tamaño del pixel deseado y eliminando toda

imperfección como por ejemplo limpiar de las cuencas los sumideros.

Una vez dado todo este tratamiento se asume que la topografía está lista para ser utilizada en el programa “*Basins*”.

3.5.2 Generación Cartográfica del Embalse Amaluza

La información que se obtuvo de este embalse fue proporcionada por la empresa CELEC EP, el cual constaba de un Informe sobre la Sedimentación del Embalse Amaluza y la Batimetría de Diciembre 2013 (CELEC, 2013e). De este Informe se obtuvo la batimetría del embalse (perfil longitudinal), ubicación de los perfiles batimétricos y el resumen de la distribución de volúmenes. La topografía fue proporcionada por PROMAS a una escala 1:25000.

A pesar de utilizar los mismo programas (AutoCAD Civil 3D 2013 y ARCGIS 10.1) el tratamiento de esta topografía fue diferente al realizado en el Embalse Mazar, ya que la cota más baja disponible es 2000 msnm, sin embargo para el embalse Amaluza la cota de inicio es 1991 msnm; es decir, no se dispone de topografía alguna del embalse. Con el análisis batimétrico realizado por CELEC EP y basándose en la topografía existente, se modeló y construyó la topografía del embalse. Se realizó los siguientes pasos:

- Se generó la superficie del embalse con curvas de nivel cada 2 metros y se ubicaron los perfiles batimétricos entregados por CELEC EP, con la finalidad de ajustar las curvas de nivel generadas con los valores de los perfiles longitudinales existentes
- Se fue modificando el ancho del embalse generado, para obtener un volumen aproximado de 120 Hm³. Este volumen a diferencia del embalse Mazar se obtuvo con el programa ARCGIS 10.1.
- Los pasos siguientes en ARCGIS 10.1 como exportar curvas, georeferenciar, simplificar líneas, crear DEM y eliminar imperfecciones, son los mismos que se realizaron para el embalse Mazar.

Con estos pasos la Topografía del Embalse Amaluza está lista para ser llevada al programa *Basins*.

3.6 Metodología utilizada en la modelación de los embalses

Para la realización del modelo una vez obtenidos los datos meteorológicos, hidrológicos, biológicos, de calidad de agua, geomorfológicos y geográficos se procedió a crear los segmentos individuales en *Aquatox* de cada embalse, 5 en el caso del embalse Mazar y 4 en el caso de Amaluza; cada segmento posee condiciones iniciales de nutrientes, detritos y plantas; así como características físicas, químicas y biológicas propias de cada sección. Las concentraciones del río Paute que es el principal aporte de nutrientes y del río Collay también fueron obtenidas.

Se unió las diferentes partes segmentadas de ambos embalses con la opción del programa *Aquatox* llamada “*Linked Simulation*”, la cual está diseñada para unir segmentos individuales que contienen las mismas variables en una sola simulación. Las variables pueden pasar de un segmento a otro a través de la migración activa, corriente pasiva, difusión o transporte de carga de fondo. Dentro de esta opción se puede correr el modelo en modo “*Cascade*” o en modo “*feedback*”, para la realización del presente estudio se corrió el modelo en modo “*Cascade*”, este modo es unidireccional, no considera que el flujo pueda tener retroalimentación, los segmentos que están unidos por modo “*Cascade*” se modelan individualmente de arriba a abajo modelando entre si las diferentes variables, este modo es más eficiente computacionalmente para ríos, embalses y arroyos. Las variables pasivas como los nutrientes se mueven en los segmentos a través del flujo de agua. La metodología se muestra a continuación en la siguiente figura:

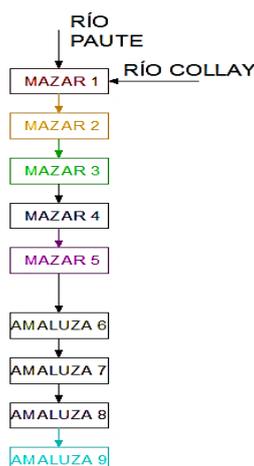


Figura 3-5 Esquema del modelo Aquatox en modo “Cascade”.

3.7 Calibración y Validación del modelo “Aquatox”

Con la calibración del modelo se pretende ajustar algunas variables que intervienen en la modelación para que el comportamiento sea lo más parecido posible a la realidad; para ello se calibraron las variables de **detritos** y **plantas**.

Para la calibración de los detritos es importante distinguir sus distintas clases, las cuales en el programa “Aquatox” son:

- Refractory detritus: representa la materia orgánica que se descompone a una tasa relativamente lenta.
- Labile detritus: representa la materia orgánica que se descompone en una tasa relativamente rápida.

Debido a que no se cuentan con estudios que determinen el fraccionamiento de los detritos presentes, el modelo se fue calibrando hasta que los valores de oxígeno disuelto se parezcan lo más posible a las mediciones realizadas en campo siendo los porcentajes encontrados:

- Refractory detritus: 70%
- Labile detritus: 30%

Estos porcentajes deberán ser comprobados en laboratorio con muestras de futuros monitoreos a los embalses.

Una vez calibrados los porcentajes de detritus se calibraron los valores de las plantas que se encuentran en mg l^{-1} , ya que los valores obtenidos no corresponden a concentraciones medidas en los embalses sino a otro estudio

que se tomó como referencia, esta calibración se realizó para que los valores obtenidos de clorofila “a” en el modelo *Aquatox* se aproximen a los valores del mismo parámetro medidos en campo.

Tabla 3-17 Plantas y concentraciones iniciales de plantas

Plantas	Unidad	Valor condición inicial
Phyto Diatom	mg l ⁻¹ peso seco	0.0128250
Phyto Greens	mg l ⁻¹ peso seco	0.0005875
Phyto Blue green max	mg l ⁻¹ peso seco	0.0000580
Cryptomonad	mg l ⁻¹ peso seco	0.0961608

La mejor aproximación se presentó cuando las concentraciones se aumentaron en un 500% con respecto a las concentraciones iniciales, presentando como resultado los siguientes valores:

Tabla 3-18 Plantas y concentraciones finales para el modelo calibrado

Plantas	Unidad	500% del valor inicial
Phyto Diatom	mg l ⁻¹ peso seco	0.0641250
Phyto Greens	mg l ⁻¹ peso seco	0.0029374
Phyto Blue green max	mg l ⁻¹ peso seco	0.0002900
Cryptomonad	mg l ⁻¹ peso seco	0.4808042

Por lo que ajustando estos dos parámetros el modelo se aproxima en sus valores al comportamiento que tienen estos dos embalses en la realidad.

3.8 Análisis de escenarios

Una vez calibrado el modelo se procedió a crear diferentes escenarios de los embalses, siendo estos:

- Los embalses como se encuentran en el presente y su desarrollo hasta el año 2016.
- El desarrollo de los embalses hasta el año 2016, en el caso que las ciudades de Azogues, Paute, Gualaceo y Biblián; tuvieran una planta de tratamiento con una eficiencia similar a la “Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Ucubamba” de la ciudad de Cuenca.

- Los embalses proyectando la población hasta el año 2030, manteniendo las condiciones actuales de descarga de efluentes domésticos en los ríos tributarios del río Paute.
- Los embalses proyectando la población hasta el año 2030, en el caso que las ciudades de Azogues, Paute, Gualaceo y Biblián; tuvieran una planta de tratamiento con una eficiencia similar a la “Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Ucubamba” de la ciudad de Cuenca.
- Los embalses cuando la Carga Orgánica sea alta y estos empiecen a tornarse anóxicos.

En la proyección de las poblaciones se estableció que estas tienen un crecimiento lineal obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla 3-19 Datos de Poblaciones Censos 2001 y 2010 (INEC, 2015) y Poblaciones Proyectadas 2012 y 2030

RESUMEN POBLACIONES				
CIUDAD	2001	2010	2012	2030
GUALACEO	38587	42709	43625	51869
PAUTE	23106	25494	26025	30801
AZOGUES	64910	70064	71209	81517
BIBLIÁN	20727	20817	20837	21017
CUENCA	417632	505585	525130	701036
POBLACION TOTAL	564962	664669	686826	886240

Para el análisis de los escenarios es necesario obtener las concentraciones diluidas de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Nitrógeno Amoniacal, Nitrógeno Orgánico, Nitritos más Nitratos y Fósforo; que son las variables principales que afectan al ciclo de nutrientes de los embalses en el estudio. Por esta razón se obtuvo la caracterización de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Ucubamba:

Tabla 3-20 Caracterización Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Ucubamba, Afluente.

Caracterización Ucubamba Afluente		
Parámetros	Unidad	Año 2010
DBO	mg l ⁻¹	118
Nitrógeno Amoniacal	mg l ⁻¹	12
Nitrógeno Orgánico	mg l ⁻¹	9.6
Nitritos + Nitratos	mg l ⁻¹	0.41
Fósforo	mg l ⁻¹	5.2

Tabla 3-21 Caracterización Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Ucubamba, Efluente.

Caracterización Ucubamba Efluente		
Parámetros	Unidad	Año 2010
DBO	mg l ⁻¹	26
Nitrógeno Amoniacal	mg l ⁻¹	16
Nitrógeno Orgánico	mg l ⁻¹	5.8
Nitritos + Nitratos	mg l ⁻¹	0.15
Fósforo	mg l ⁻¹	3

La planta de tratamiento tiene un Caudal Efluente en el año 2012 de 1.2 m³ s⁻¹ y se proyecta que para la población del año 2030 tenga un Caudal Efluente de 2 m³ s⁻¹ que es su capacidad máxima de funcionamiento; esto se debe no solo al incremento de la población, sino también a la incorporación de nuevas áreas de aporte y a la creación de interceptores; es decir, se produciría un crecimiento de la red, provocando que la planta trabaje al máximo de su capacidad.

El caudal de aguas residuales está directamente relacionado con el consumo de agua. En Cuenca se estima que el consumo de agua es aproximadamente 210 l hab⁻¹ día; mientras que en las ciudades de Gualaceo, Paute, Azogues y Biblián se aproxima un consumo de 150 l hab⁻¹ día (A. Alvarado, 2014).

Con los datos de caracterización de la planta de tratamiento (PTAR) Ucubamba, las poblaciones proyectadas y el consumo de agua se logró

establecer cargas per-cápita de cada variable, para luego calcular un total de cargas que están ingresando a los embalses en cada caso.

Tabla 3-22 Total de cargas contaminantes afluentes al embalse en los diferentes escenarios.

TOTAL CARGAS CUENCA, GUALACEO, PAUTE, AZOGUES Y BIBLIÁN					
Variable	Unidad	2012 Con PTAR	2030 Con PTAR	2030 Sin PTAR	DBO Alta Población = 2E6 hab.
DBO	kg día ⁻¹	3772.6	5726.3	7770.9	25328.2
Nitrógeno Amoniacoal	kg día ⁻¹	2027.5	3187.1	3098.2	4883.7
Nitrógeno Orgánico	kg día ⁻¹	760.5	1184.5	1268.9	2697.3
Nitritos + Nitratos	kg día ⁻¹	20.5	31.5	37.3	98.3
Fósforo	kg día ⁻¹	394.5	614.0	662.9	1436.6

Las concentraciones de los parámetros una vez descargados en el río Paute se muestran en la **Tabla 3-23**

Tabla 3-23 Concentración Diluida por fechas para los diferentes escenarios.

CONCENTRACIONES DILUIDAS					
2012 CON PTAR					
FECHA dd/mm/aa	DBO mg l⁻¹	Nitrógeno Amoniacoal mg l⁻¹	Nitrógeno Orgánico mg l⁻¹	Nitritos + Nitratos mg l⁻¹	Fósforo mg l⁻¹
30/03/2012	0.520408	0.279690	0.104901	0.002821	0.054416
19/07/2012	0.176959	0.095106	0.035670	0.000959	0.018504
09/11/2012	1.106863	0.594876	0.223115	0.006000	0.115738
17/01/2013	1.278484	0.687113	0.257709	0.006931	0.133683
2030 CON PTAR					
30/03/2030	0.789909	0.439640	0.163393	0.004350	0.084693
19/07/2030	0.268600	0.149495	0.055560	0.001479	0.028799
09/11/2030	1.680067	0.935076	0.347523	0.009251	0.180136
17/01/2031	1.940566	1.080061	0.401407	0.010686	0.208066
2030 SIN PTAR					
30/03/2030	1.071959	0.427377	0.175043	0.005147	0.091438
19/07/2030	0.364508	0.145325	0.059522	0.001750	0.031093
09/11/2030	2.279962	0.908993	0.372301	0.010947	0.194481
17/01/2031	2.633476	1.049935	0.430028	0.012644	0.224636
DBO FUERTE, POBLACIÓN = 2E6 hab.					
30/03/2012	3.493905	0.673676	0.372083	0.013562	0.198168
19/07/2012	1.188065	0.229076	0.126523	0.004612	0.067385
09/11/2012	7.431229	1.432851	0.791388	0.028845	0.421486
17/01/2013	8.583457	1.655017	0.914094	0.033318	0.486838

CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSION

4.1 Modelación GIS de los embalses

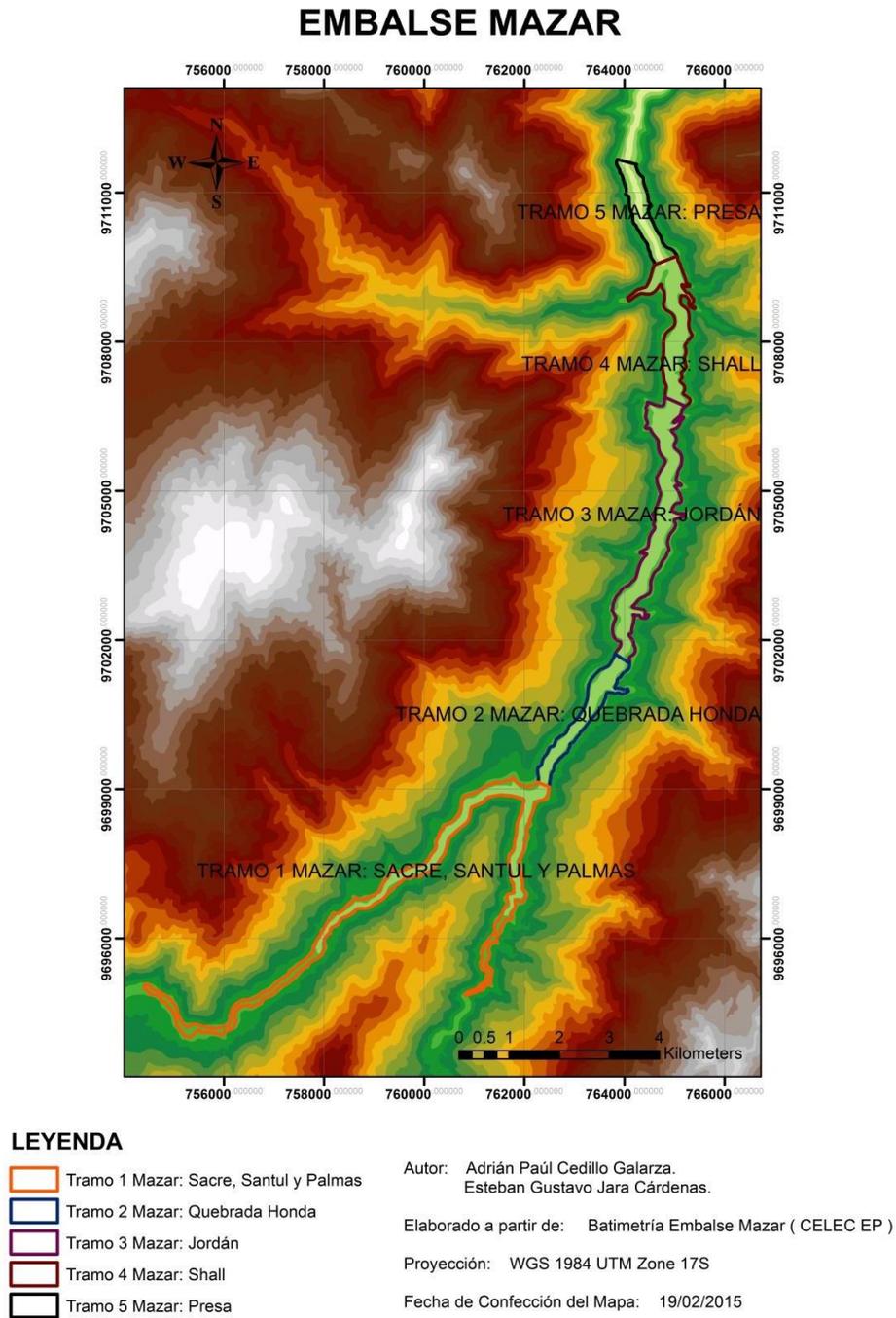
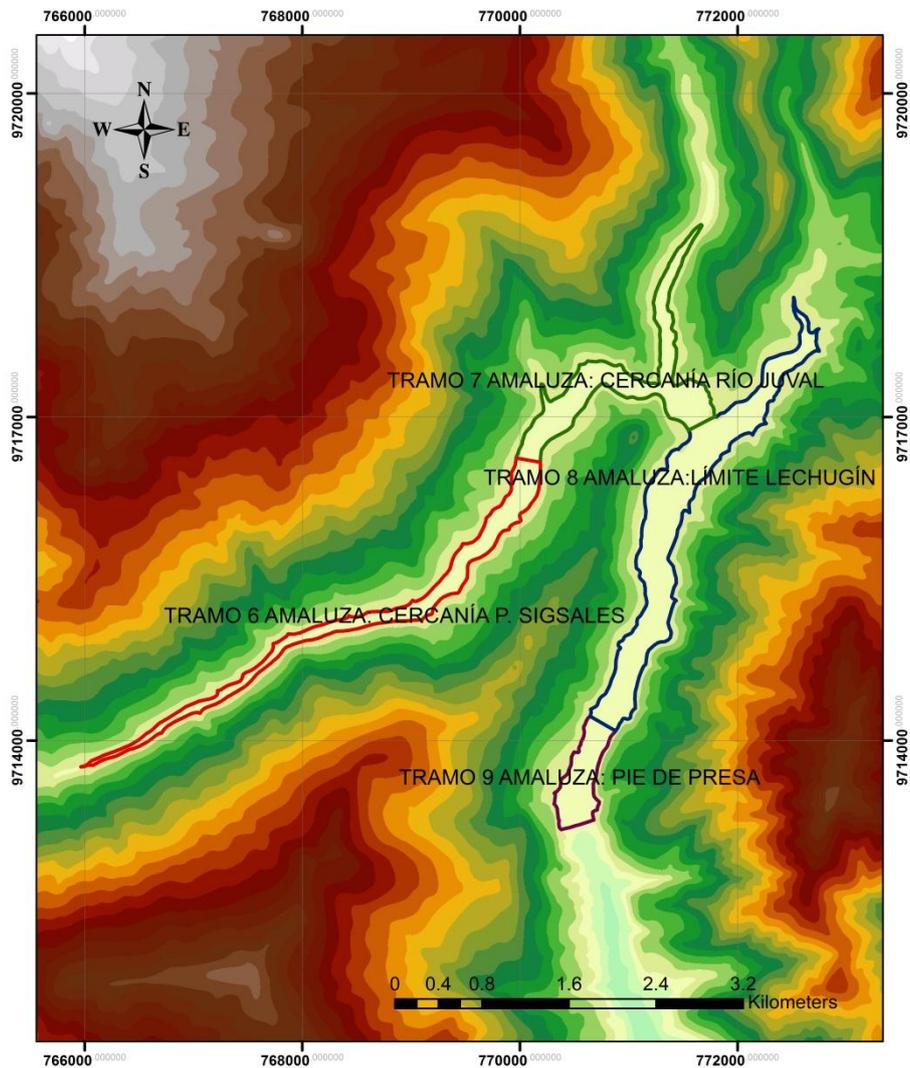


Figura 4-1 Cartografía Embalse Mazar

EMBALSE AMALUZA



LEYENDA

- Tramo 6 Amaluzá: Cercanía P. Sigsales
- Tramo 7 Amaluzá: Cercanía Río Juval
- Tramo 8 Amaluzá: Límite Lechugín
- Tramo 9 Amaluzá: Pie de Presa

Autor: Adrián Paúl Cedillo Galarza.
Esteban Gustavo Jara Cárdenas.

Elaborado a partir de: Batimetría Embalse Mazar (CELEC EP)
Topografía 1:25000 (PROMAS)

Proyección: WGS 1984 UTM Zone 17S

Fecha de Confección del Mapa: 19/02/2015

Figura 4-2 Cartografía Embalse Amaluzá

4.2 Análisis de escenarios de potencial eutrofización en los embalses.

4.2.1 Escenarios en el presente y su desarrollo hasta el año 2016.

En el siguiente acápite se expondrá los resultados de los parámetros analizados en el estudio para cada escenario y se representará de la siguiente manera:

- Los embalses como se encuentran en el presente y su desarrollo hasta el año 2016 (*Sin Tratamiento*).
- El desarrollo de los embalses hasta el año 2016, en el caso que las ciudades de Azogues, Paute, Gualaceo y Biblián; tuvieran una planta de tratamiento con una eficiencia similar a la “Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Ucubamba” de la ciudad de Cuenca (*Con Tratamiento*).

En el escenario sin tratamiento se manejó los datos medidos en campo del río Paute entregado por PROMAS y con la incertidumbre de no conocer el caudal real de dilución, se utilizó únicamente de esta información las concentraciones de los parámetros analizados; mientras que en el escenario con tratamiento al no tener la caracterización se impuso un caudal generado por balance de masas, siendo esta la variable que afecta las concentraciones en los escenarios, produciendo un desfase entre ellos.

4.2.1.1 Oxígeno

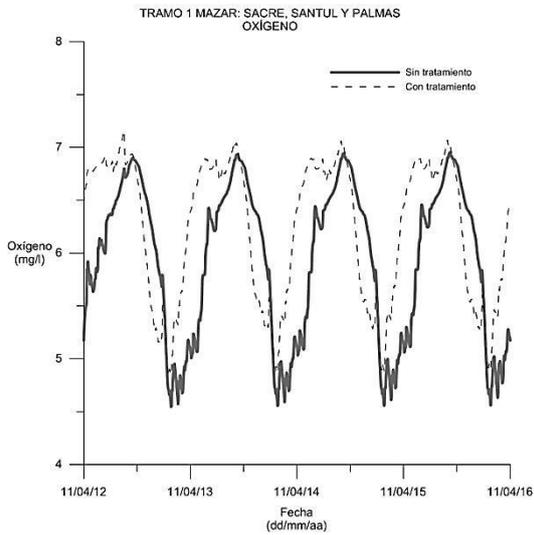


Figura 4-3 Oxígeno Tramo 1 - Mazar

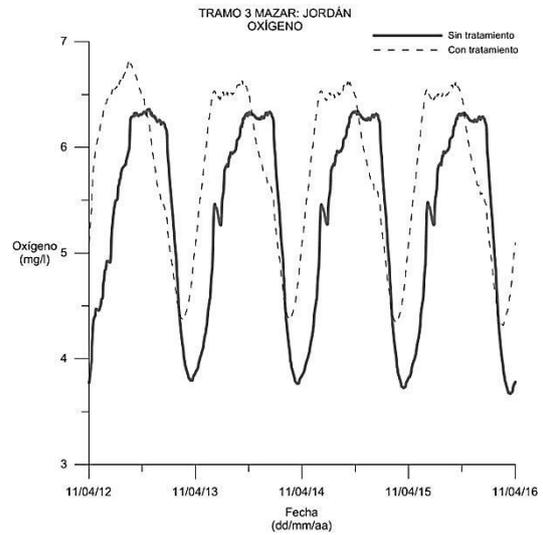


Figura 4-4 Oxígeno Tramo 3 – Mazar

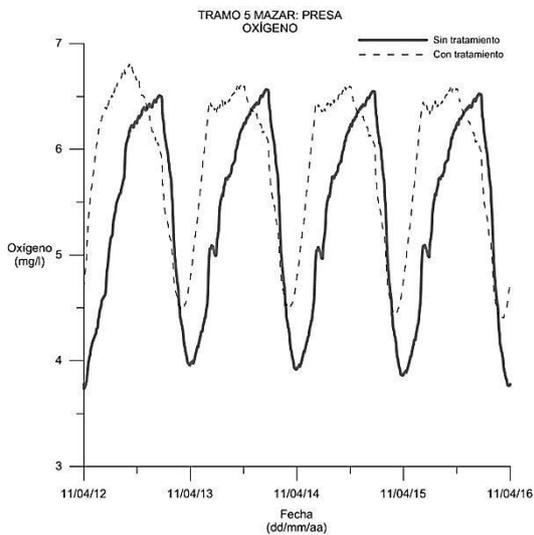


Figura 4-5 Oxígeno Tramo 5 – Mazar

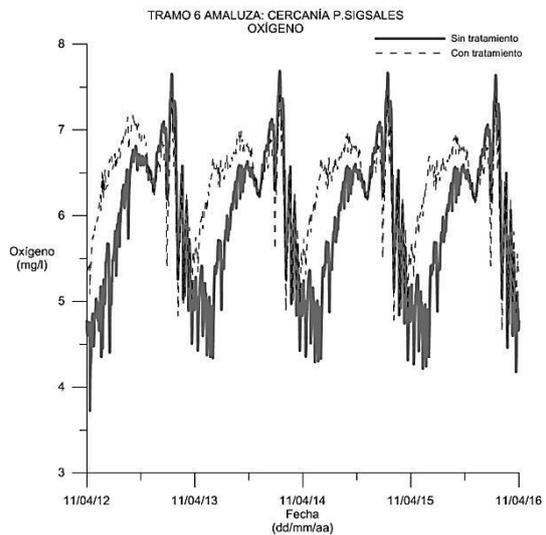


Figura 4-6 Oxígeno Tramo 6 - Amaluza

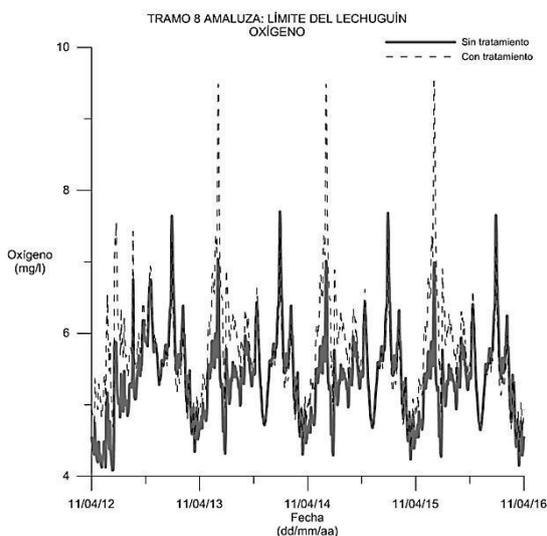


Figura 4-7 Oxígeno Tramo 8 – Amaluzá

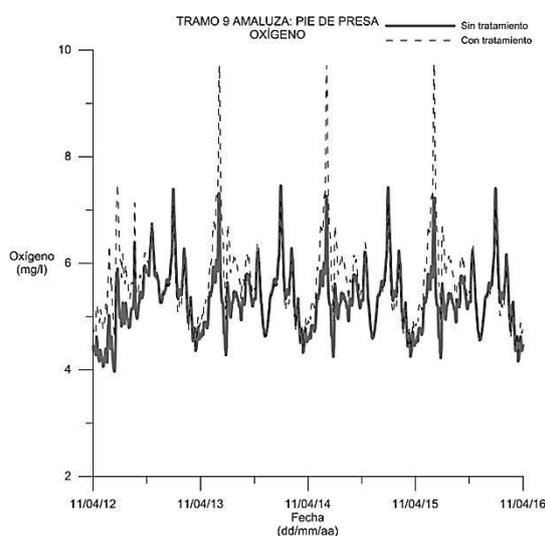


Figura 4-8 Oxígeno Tramo 9 - Amaluzá

La concentración de oxígeno disuelto en todos los segmentos del estudio, ya sean en los escenarios con o sin tratamiento tiene un comportamiento cíclico que se repite anualmente en todo el periodo analizado, además se observa que poseen un mismo orden de magnitud. Se presentan picos bajos y altos producidos por varios factores como la variación anual de los caudales, a pesar que las cargas que alimentan los embalses se mantienen relativamente constantes, la dilución con mayor caudal va a ser mucho más; es decir, los embalses tienen mayor capacidad de autodepuración. Este factor implicaría en un mayor o menor consumo de oxígeno disuelto en la estabilización de la materia orgánica y por ende variación en el cuerpo del embalse. Otra de las causas se debe a que los microorganismos en épocas de mayor disponibilidad de radiación solar producen mayor cantidad de oxígeno durante la fotosíntesis.

4.2.1.2 Amonio

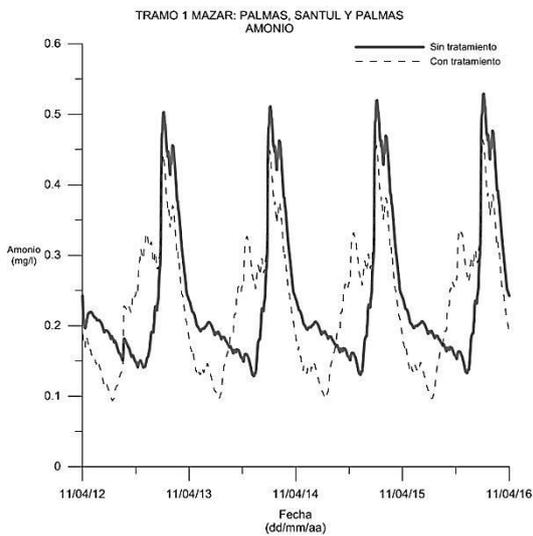


Figura 4-9 Amonio Tramo 1 – Mazar

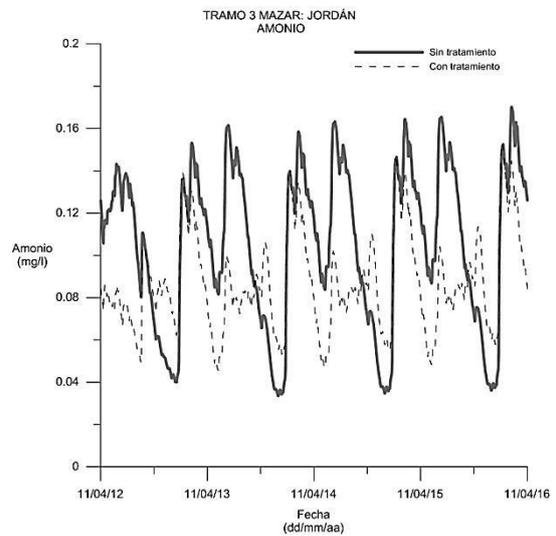


Figura 4-10 Amonio Tramo 3 – Mazar

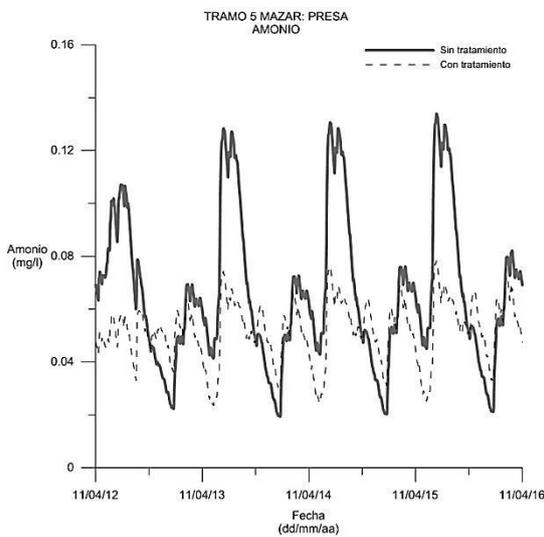


Figura 4-11 Amonio Tramo 5 – Mazar

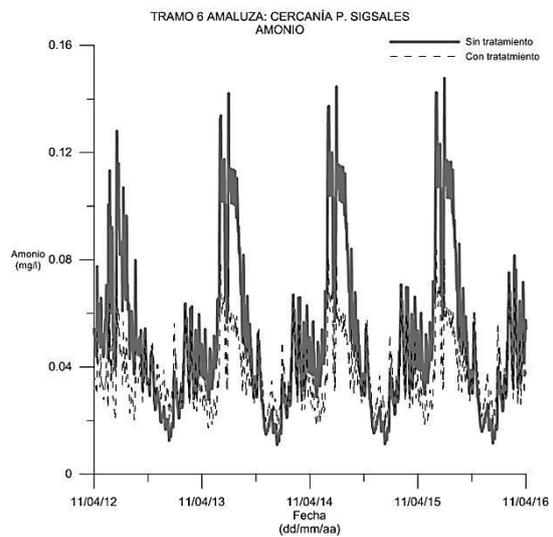


Figura 4-12 Amonio Tramo 6 - Amaluza

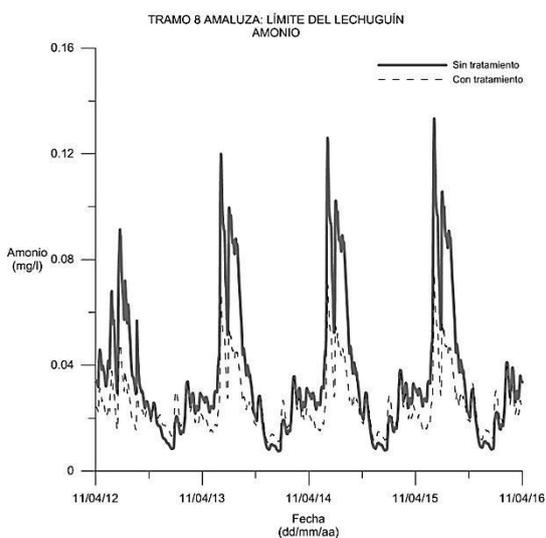


Figura 4-13 Amonio Tramo 8 – Amaluzá

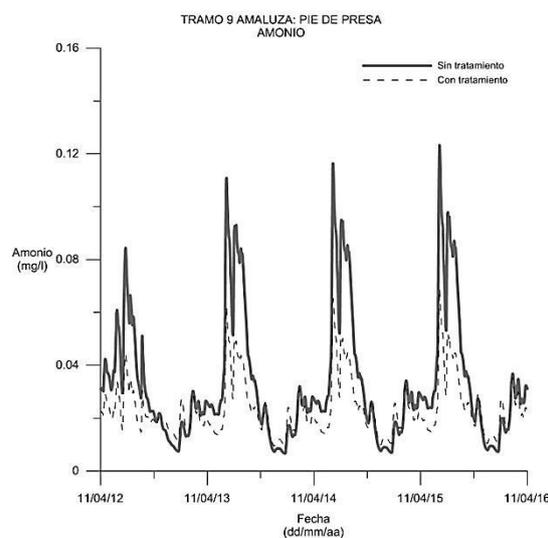


Figura 4-14 Amonio Tramo 9 - Amaluzá

El amonio al igual que el oxígeno presenta un comportamiento cíclico, así como una tendencia creciente a lo largo de los años en sus picos superiores e inferiores, debido al crecimiento de la población a lo largo del tiempo, generando una mayor descarga de efluentes domésticos, lo cual influye directamente en el aumento de su concentración. Además presenta altas concentraciones en la Cola del Embalse Mazar debido a que es el tramo inicial y no existe un volumen acumulado que permita diluir este contaminante; mientras que en los siguientes tramos presenta una tendencia a disminuir sus concentraciones, ya sea por su capacidad de autodepuración o por los procesos de volatilización y nitrificación. En las gráficas existe una diferencia significativa entre los escenarios con y sin tratamiento, ya que al aplicar el mismo una parte es retenida, por lo que llega en menos cantidad al cuerpo receptor.

4.2.1.3 Clorofila

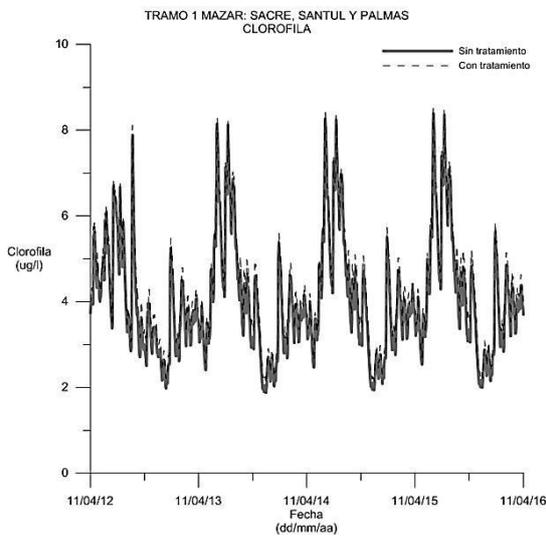


Figura 4-15 Clorofila Tramo 1 – Mazar

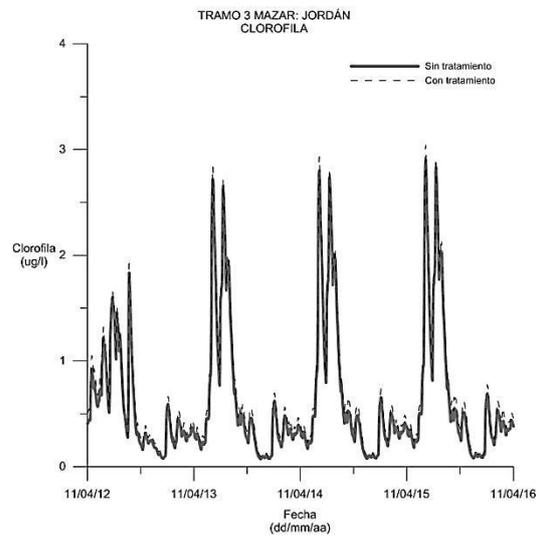


Figura 4-16 Clorofila Tramo 3 – Mazar

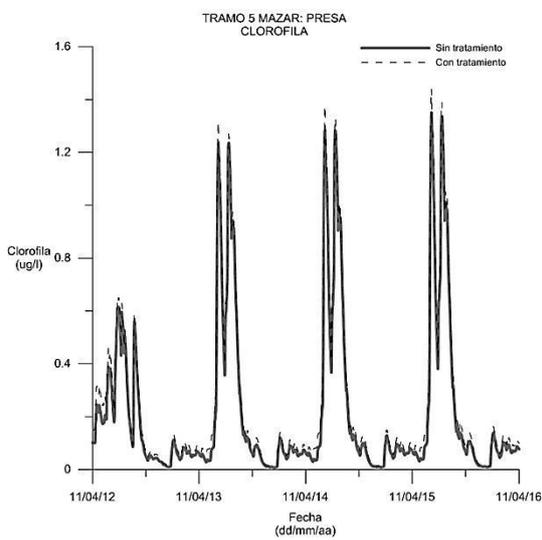


Figura 4-17 Clorofila Tramo 5 – Mazar

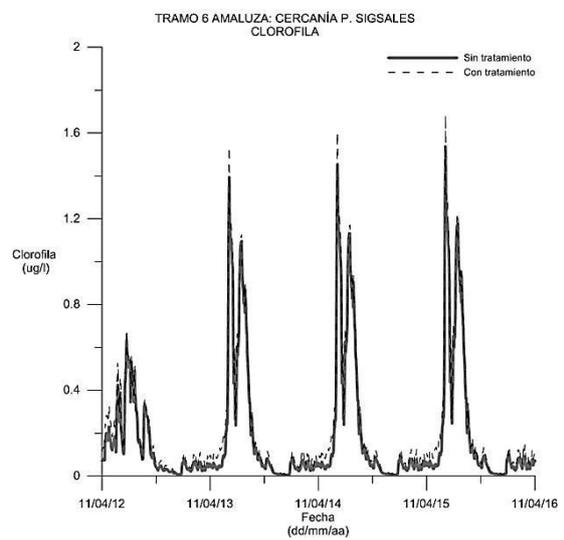


Figura 4-18 Clorofila Tramo 6 – Amaluz

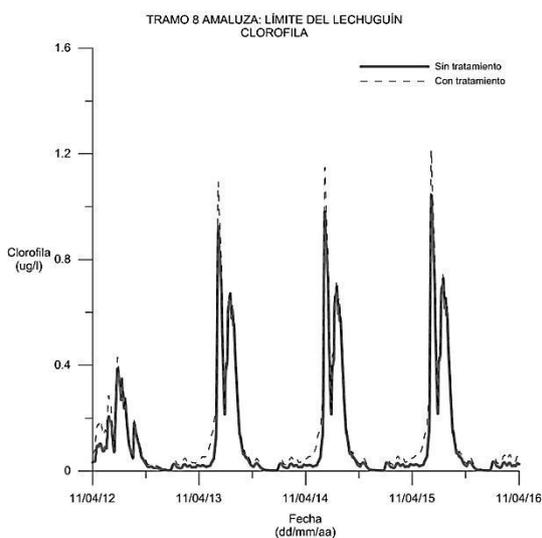


Figura 4-19 Clorofila Tramo 8 – Amaluza

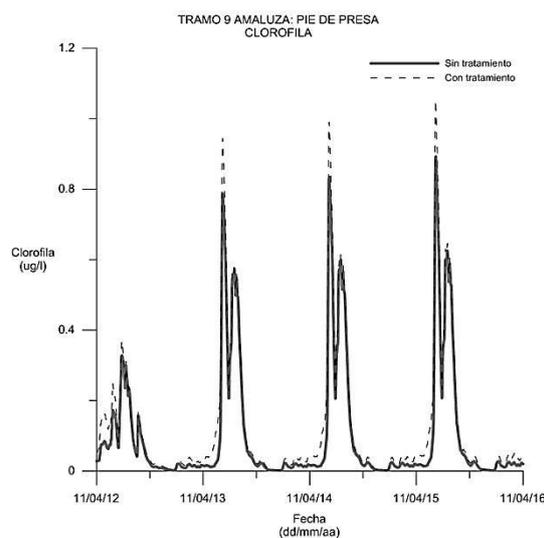


Figura 4-20 Clorofila Tramo 9 – Amaluza

Posee un comportamiento cíclico con puntos superiores bien marcados en la época de verano, esto se debe al aumento de fitoplancton; los cuales al tener una actividad fotosintética y teniendo las condiciones en los embalses adecuadas de oxígeno y de nutrientes para la vida de la mayoría de organismos acuáticos, produce una explosión de vida de estos. Los puntos bajos se deben a la disminución de oxígeno y de nutrientes en épocas de invierno, lo cual produce la muerte de ciertas especies. En cada uno de los embalses se observa que hay mayor concentración de clorofila en la cola de los embalses, llegando a tener valores menores en los lugares cercanos a las presas, ya que a mayor profundidad no se da el proceso de fotosíntesis. Analizando los escenarios con y sin tratamiento no existe diferencia entre estos porque la cantidad de nutrientes tratados es insignificante a los ya existentes en los embalses; es decir, la producción de clorofila no se ve alterada por los nutrientes eliminados.

4.2.1.4 Nitratos

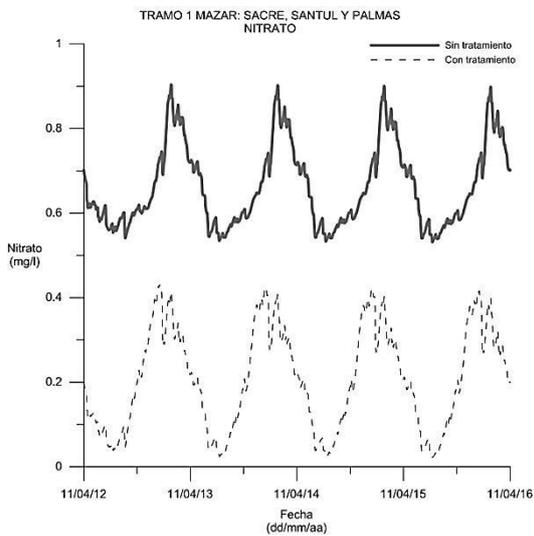


Figura 4-21 Nitratos Tramo 1 – Mazar

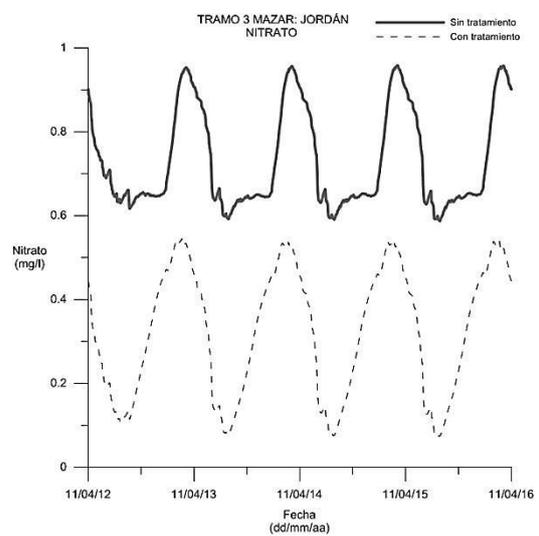


Figura 4-22 Nitratos Tramo 3 – Mazar

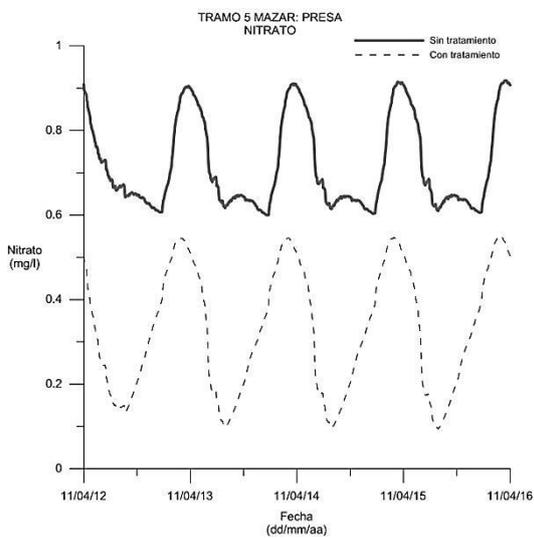


Figura 4-23 Nitratos Tramo 5 – Mazar

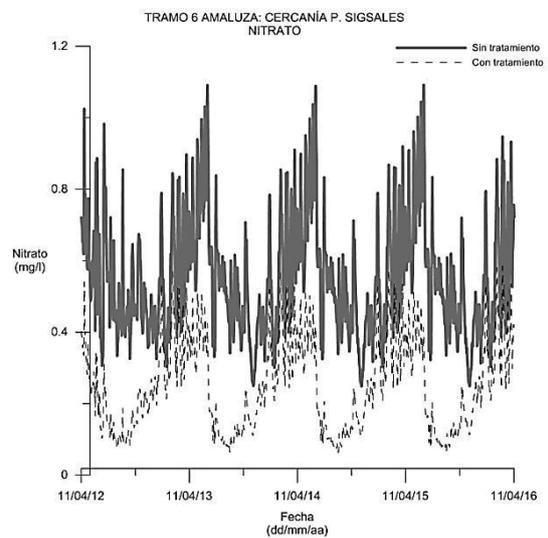


Figura 4-24 Nitratos Tramo 6 – Amaluza

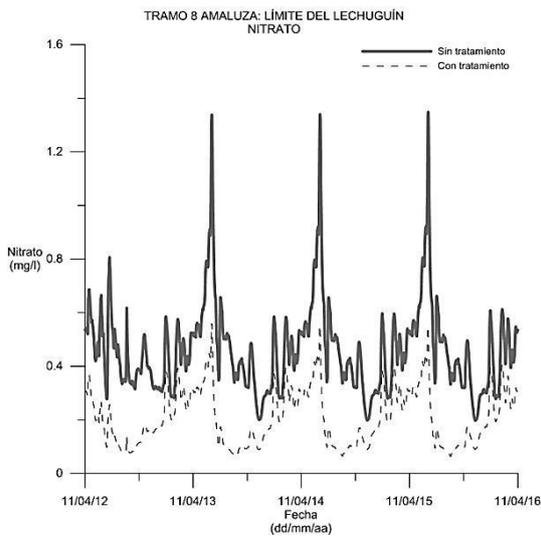


Figura 4-25 Nitratos Tramo 8 – Amaluzá

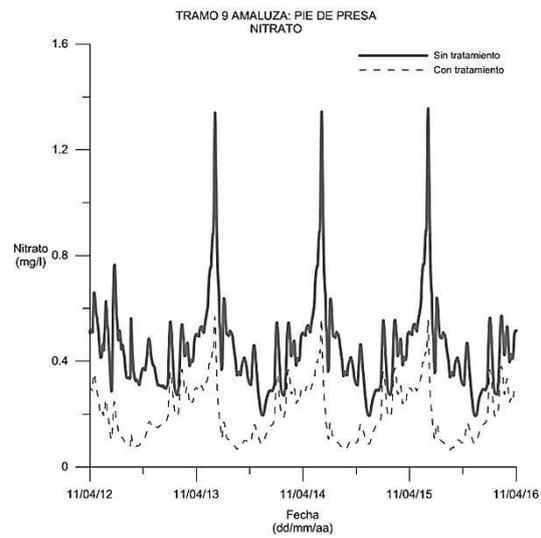


Figura 4-26 Nitratos Tramo 9 – Amaluzá

Los nitratos tienen un comportamiento cíclico, mantienen un mismo orden de magnitud. El análisis por años y por tramos va a tener el mismo comportamiento del amonio, ya que este al disminuir también disminuyen los nitritos y nitratos, que son productos de la nitrificación. Se observa una gran diferencia entre aplicar un tratamiento o no a los embalses esto podría deberse a que está ocurriendo el proceso de nitrificación antes de ingresar al embalse, que al sumarse con el ya existente marca altos valores en el escenario sin tratamiento.

4.2.1.5 Fósforo

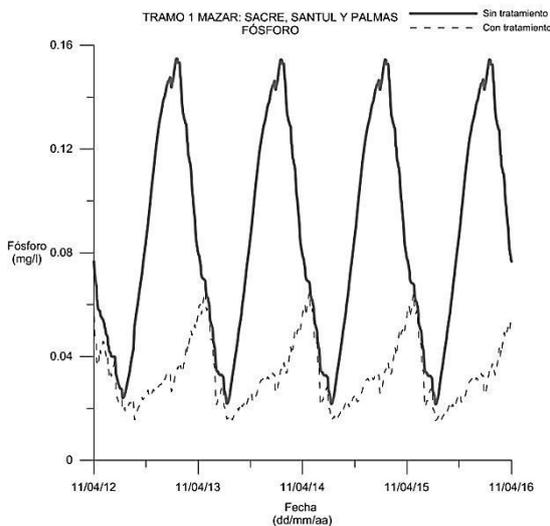


Figura 4-27 Fósforo Tramo 1 – Mazar

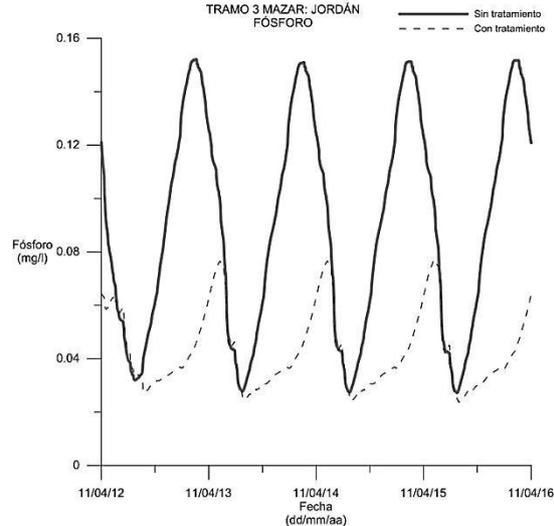


Figura 4-28 Fósforo Tramo 3 – Mazar

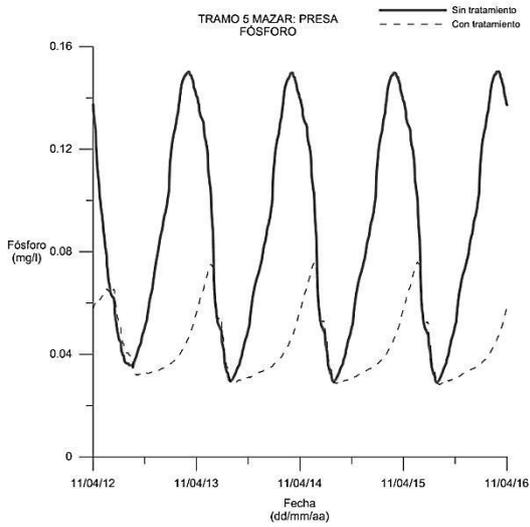


Figura 4-29 Fósforo Tramo 5 – Mazar

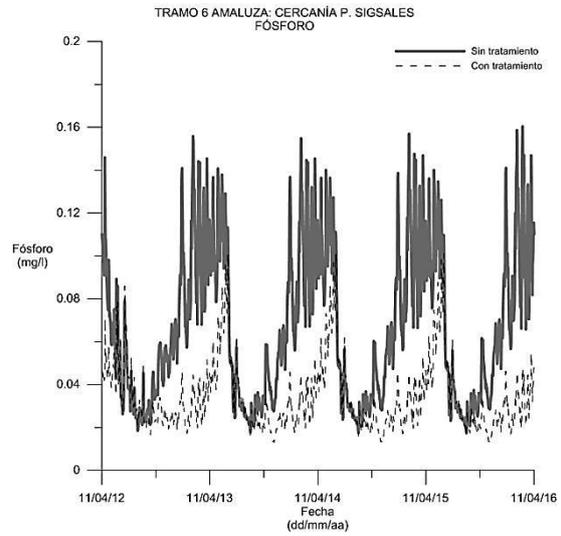


Figura 4-30 Fósforo Tramo 6 – Amaluz

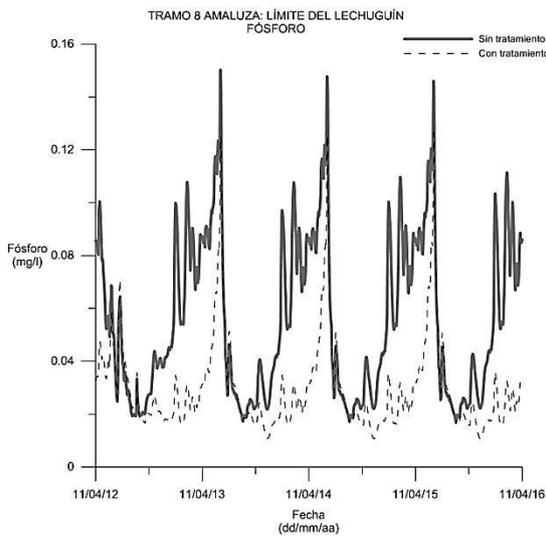


Figura 4-31 Fósforo Tramo 8 – Amaluz

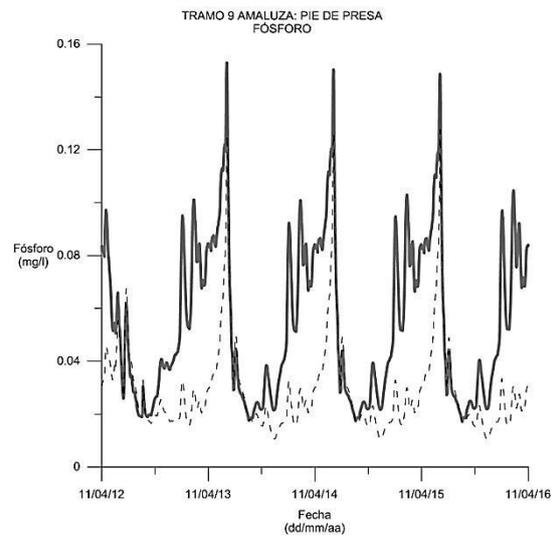


Figura 4-32 Fósforo Tramo 9 – Amaluz

Se observa en este caso que al aplicar un tratamiento las concentraciones son mucho menores, ya que se retiene gran parte de este nutriente y si se desea una mejor remoción de fósforo se puede aplicar un tratamiento mediante precipitación química, la misma que resulta ser cara a comparación de la remoción biológica. Las concentraciones obtenidas son constantes a lo largo de los embalses y manteniendo un comportamiento cíclico en todos sus tramos.

4.2.2 Escenarios Con Y Sin Tratamiento 2030

En el siguiente acápite se expondrá los resultados de los parámetros analizados en el estudio para cada escenario y se representará de la siguiente manera:

- Los embalses proyectando la población hasta el año 2030, manteniendo las condiciones actuales de descarga de efluentes domésticos en los ríos tributarios del río Paute (*Sin Tratamiento*).
- Los embalses proyectando la población hasta el año 2030, en el caso que las ciudades de Azogues, Paute, Gualaceo y Biblián; tuvieran una planta de tratamiento con una eficiencia similar a la “Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Ucubamba” de la ciudad de Cuenca (*Con Tratamiento*).

4.2.2.1 Oxígeno

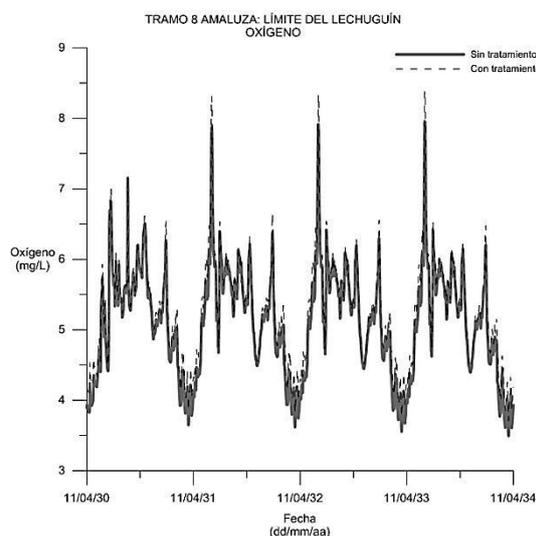
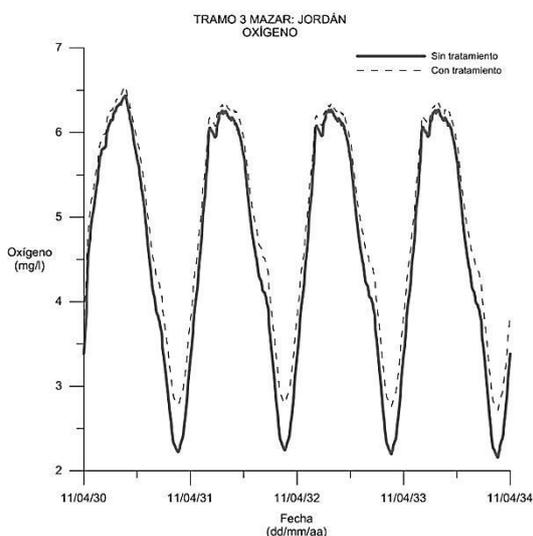


Figura 4-33 Oxígeno 2030 Tramo 3 – Mazar **Figura 4-34 Oxígeno 2030 Tramo 8 – Amaluz**

El oxígeno tiene un comportamiento cíclico. Se puede observar una disminución de las concentraciones de oxígeno tanto en los picos superiores como inferiores de todos los segmentos, esto se debe a que existe una mayor carga orgánica producida por una mayor población sin llegar a un estado anóxico en ningún momento del análisis en el periodo especificado. La diferencia de aplicar o no un tratamiento es insignificante, debido a que los

embalses al ser un volumen tan grande de agua tienen una alta capacidad de depuración; por ello los valores de oxígeno disuelto no presentan una considerable variación. Además no se debe olvidar que los ríos afluentes son ríos de montaña y vienen cargados con oxígeno disuelto a niveles prácticamente de saturación. En los niveles bajos de oxígeno de los embalses se produce Hipoxia, lo que quiere decir que se producirá la desaparición de organismos y especies sensibles (Goyenola, 2007).

4.2.2.2 Amonio

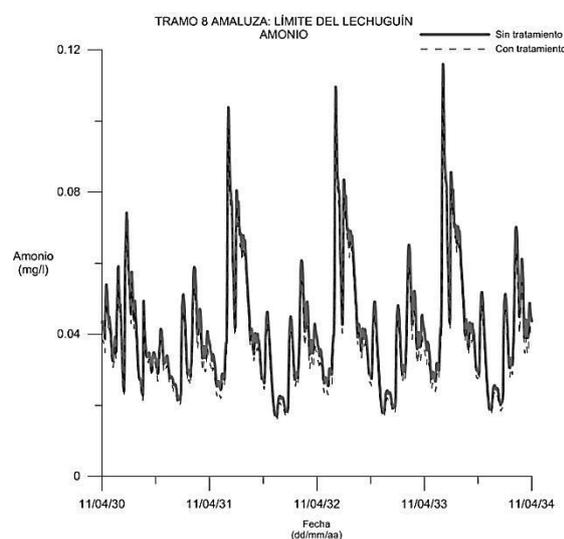
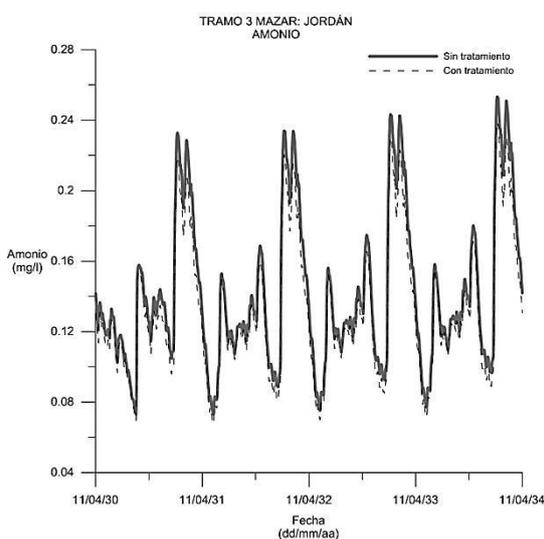


Figura 4-35 Amonio 2030 Tramo 3 – Mazar **Figura 4-36 Amonio 2030 Tramo 8 – Amaluzza**

En el caso del Amonio se observa un crecimiento en las concentraciones con respecto al escenario del embalse en la actualidad, así mismo este nutriente presenta un comportamiento cíclico con tendencia a seguir aumentando sus concentraciones picos superiores e inferiores, a lo largo de cada año en todos los segmentos que forman de parte de los embalses. A lo largo de los embalses se presenta claramente una contaminación del agua por bacterias, descargas de aguas residuales domésticas y residuos de animales que se encuentran a las orillas de los embalses; así como también contaminación por procesos agropecuarios. También se puede observar que las concentraciones de Amonio van disminuyendo a lo largo de los embalses siendo mayor en la cola del embalse Mazar y siendo menor en el pie de presa del embalse

Amaluza. Se observa que no hay una diferencia significativa en implementar o no un tratamiento en las concentraciones de Amonio a lo largo de los embalses por su gran capacidad de depuración.

4.2.2.3 Clorofila

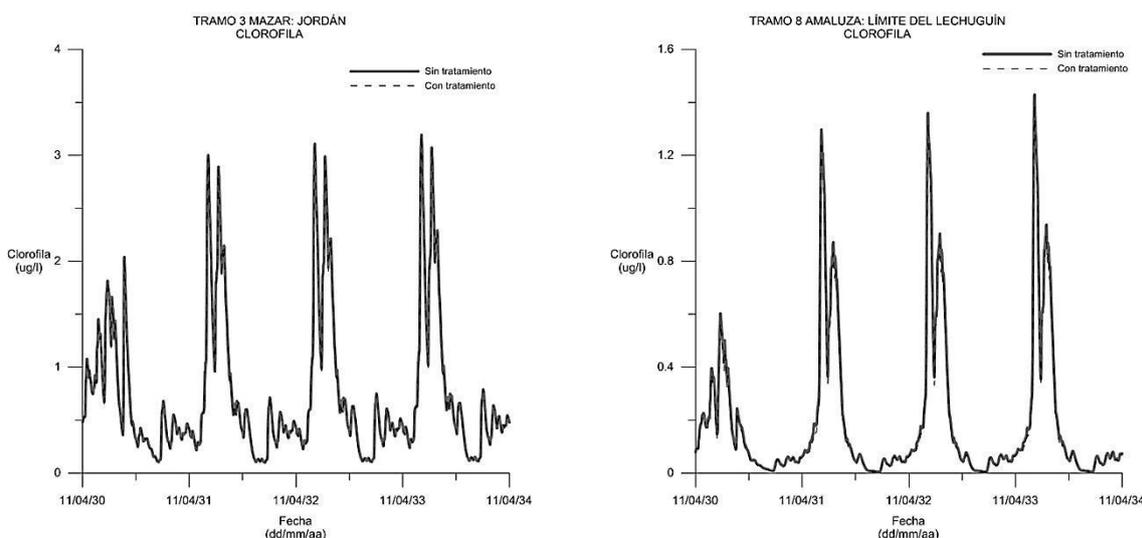


Figura 4-37 Clorofila 2030 Tramo 3 – Mazar Figura 4-38 Clorofila 2030 Tramo 8 – Amaluza

La clorofila nos indica la concentración de fitoplancton (algas microscópicas y otros organismos), se observa que tiene un comportamiento cíclico a lo largo de todos los segmentos de ambos embalses, con picos superiores bien definidos en los meses de Junio y Julio pertenecientes a la época de verano, cuando existe concentraciones favorables de nutrientes y de temperatura; puede haber un crecimiento exagerado y repentino de fitoplancton, apareciendo fuera de la tendencia normal. Se observa que las concentraciones son mayores en el embalse Mazar y que crecen cada año, lo que indica que el fitoplancton tiende a aumentar sus concentraciones. No se encuentran variaciones significativas en los valores de clorofila en los escenarios con tratamiento y sin tratamiento.

4.2.2.4 Nitratos

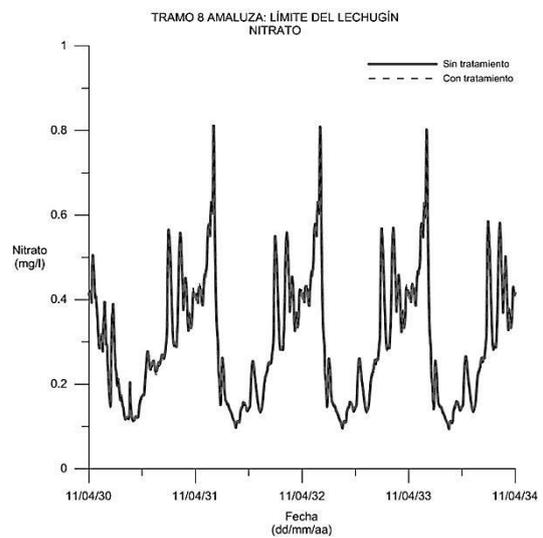
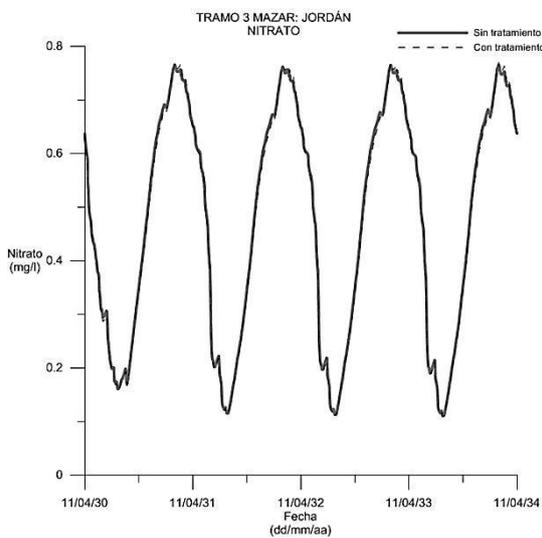


Figura 4-39 Nitratos 2030 Tramo 3 – Mazar **Figura 4-40 Nitratos 2030 Tramo 8 – Amaluz**

Se puede observar que los nitratos en los embalses ya sean con tratamiento o sin tratamiento tienen un comportamiento cíclico; además se visualiza que las gráficas son prácticamente iguales; por lo que no existe diferencia entre aplicar o no un tratamiento, esto se debe a que en el caso con tratamiento, los nitratos ingresados son prácticamente insignificantes a comparación de los nitratos ya existentes en los embalses.

4.2.2.5 Fósforo

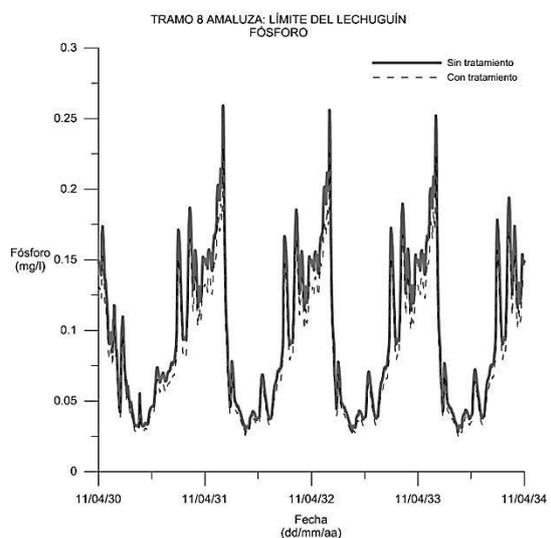
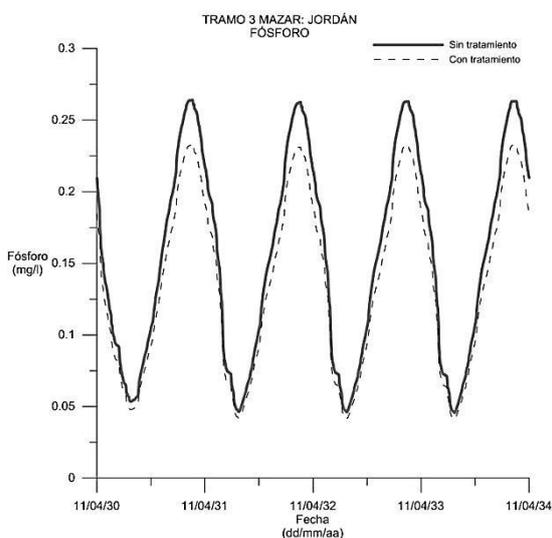


Figura 4-41 Fósforo 2030 Tramo 3 – Mazar **Figura 4-42 Fósforo 2030 Tramo 8 – Amaluz**

Se observa un aumento en las concentraciones de fósforo. Esta puede ser de origen natural que se va produciendo lentamente, o de origen humano lo cual acelera este proceso hasta convertirlo en la mayoría de veces en un grave problema de contaminación. En este escenario es una eutrofización de origen humano, ya que los vertidos humanos, ganaderos y agrícolas al aumentar la población y no implementar procesos más eficientes de tratamiento, regulación de uso de suelos o la creación de normativas, permiten que estos contaminantes vayan hacia los ríos y posteriormente lleguen a los embalses.

4.2.3 Escenario con carga orgánica alta – ambiente anóxico

Este escenario se planteó de una forma regresiva, en donde se determina una población que genere una carga orgánica alta, de tal manera que el embalse se torne anóxico; para llegar a esta condición se impuso una población de 2 millones de habitantes.

4.2.3.1 Oxígeno

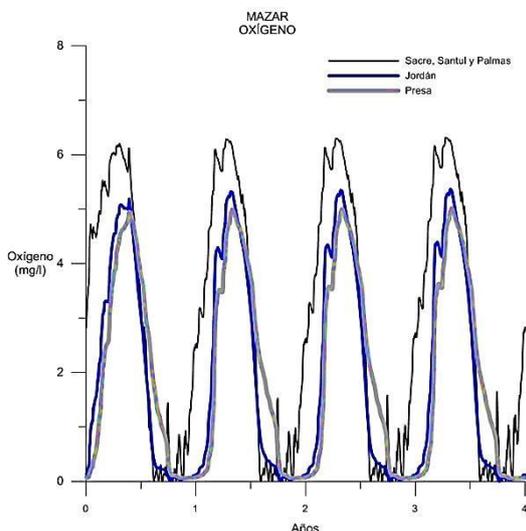


Figura 4-43 Oxígeno 2E6 hab. Mazar

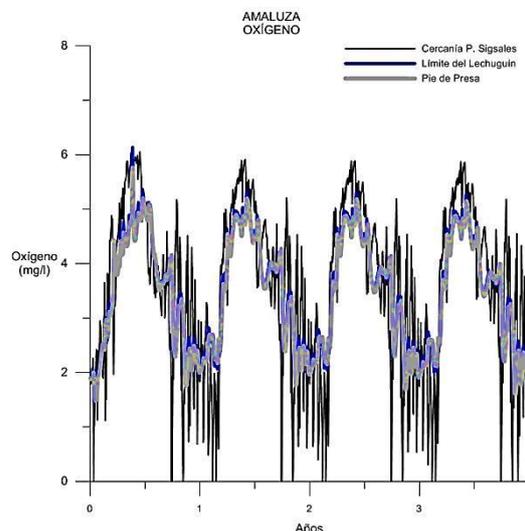


Figura 4-44 Oxígeno 2E6 hab. Amaluza

Se observa en las gráficas que en los distintos tramos de Mazar y Amaluza los niveles de oxígeno disminuyen drásticamente produciéndose en algunas épocas del año escenarios con condiciones de Anoxia (oxígeno disuelto < 0.05 mg/L), Hipoxia (0.05 mg/L < oxígeno disuelto < 5 mg/L) y condiciones

aceptables ($5 \text{ mg/L} < \text{oxígeno disuelto} < 12 \text{ mg/L}$) en todos los tramos; lo que produce consecuencias como la muerte masiva de organismos aerobios, desaparición de organismos y especies sensibles, y condiciones adecuadas para la vida de la gran mayoría de especies de organismos acuáticos respectivamente (Goyenola, 2007),

Esto altos y bajos valores de oxígeno podría deberse a un crecimiento algal excesivo, las cuales al morir y posteriormente en su proceso de descomposición dan como resultado una alta demanda o consumo de oxígeno, agotándolo de los embalses.

4.2.3.2 Amonio

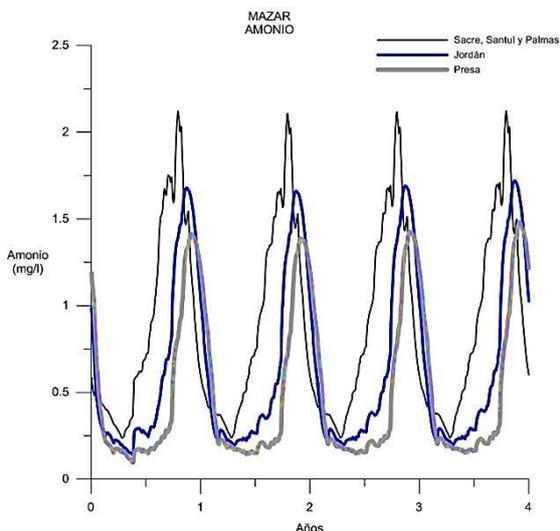


Figura 4-45 Amonio 2E6 hab. Mazar

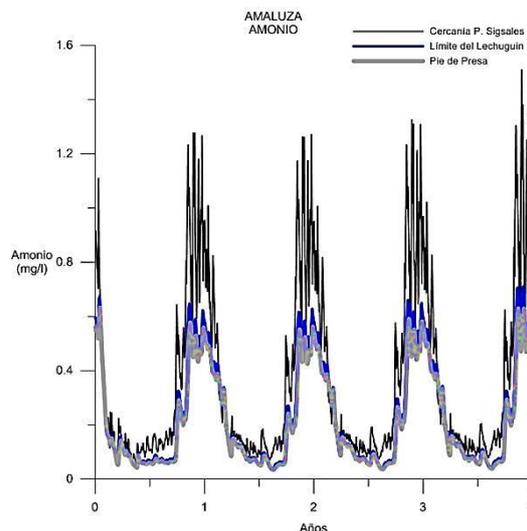


Figura 4-46 Amonio 2E6 hab. Amaluz

En este escenario se observa con gran notoriedad un aumento drástico en las concentraciones del amonio en los dos embalses; estos altos valores pueden ser un indicador de una posible gran contaminación del agua con bacterias. Se produciría un problema en la desinfección del agua, en caso de que el agua de los embalses sea utilizada para el consumo humano; así como también afectar las propiedades organolépticas dando a los embalses un aspecto desagradable para los sentidos. Puede ocasionar la formación de nitritos y nitratos.

Se puede observar que a lo largo de los embalse los valores de carga de amonio van bajando hasta tener los valores más bajos en el pie de presa de

Amaluza; esto se debe a que el amonio puede irse eliminando de varias formas, por ejemplo por la oxidación anaerobia del amonio en la que directamente pasa a nitrógeno gas, sin pasar por procesos de desnitrificación y nitrificación. Otra forma puede ser la volatilización en que el ión amonio NH_4 que se encuentra en forma acuosa, a valores altos de pH y temperatura favorable, se convierte en amoniaco NH_3 gas, escapando al ambiente.

4.2.3.3 Clorofila

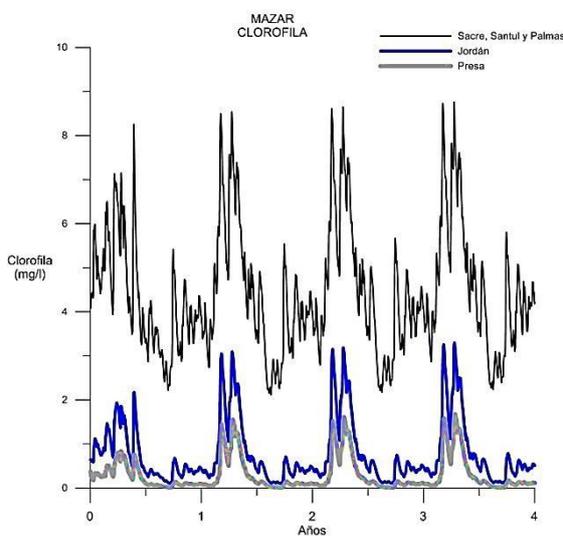


Figura 4-47 Clorofila 2E6 hab. Mazar

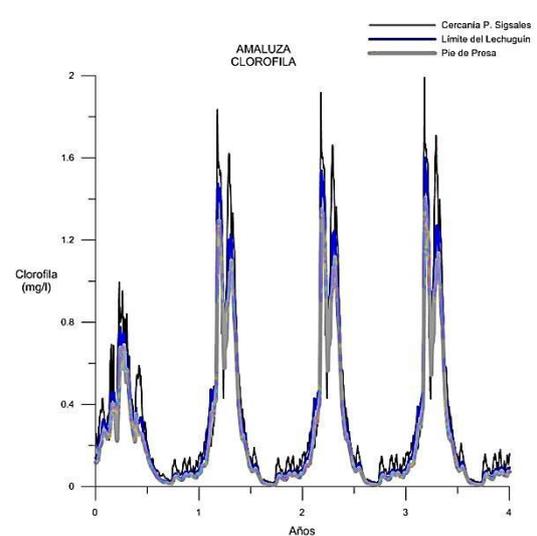


Figura 4-48 Clorofila 2E6 hab. Amaluza

La clorofila tiene una alta concentración especialmente en la cola del embalse Mazar y disminuyendo su valor en la presa del mismo; mientras que en el embalse Amaluza se mantiene los valores casi constantes a lo largo de este. Este aumento en la clorofila implicaría un aumento en el fitoplancton.

4.2.3.4 Nitratos

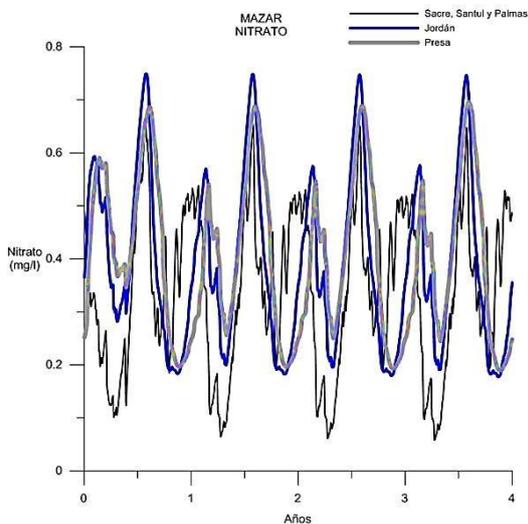


Figura 4-49 Nitratos 2E6 hab. Mazar

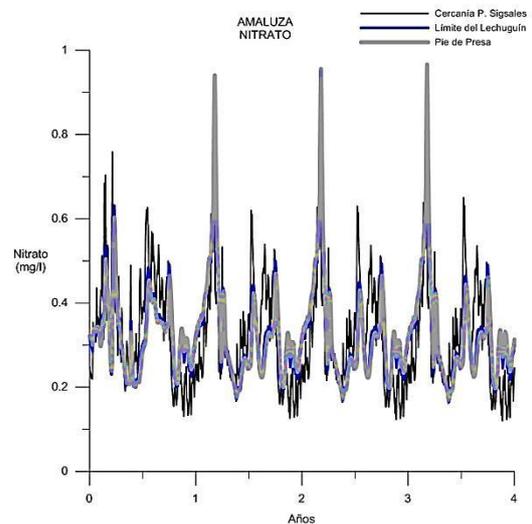


Figura 4-50 Nitratos 2E6 hab. Amaluza

Como se observa en este escenario los valores de nitrato tienen unos picos elevados, sin embargo en estas concentraciones no son nocivos para los peces; en cambio el tener valores de nitritos en pequeñas concentraciones es mortal para ellos. Además al tener los embalses zonas anóxicas los nitratos se convertirán en alguna especie de nitrógeno gas, generalmente N_2 ó N_2O , gases no utilizables y de fácil difusión en la atmósfera, estos son producidos por bacterias heterótrofas, liberándose el Nitrógeno a la atmósfera.

4.2.3.5 Fósforo

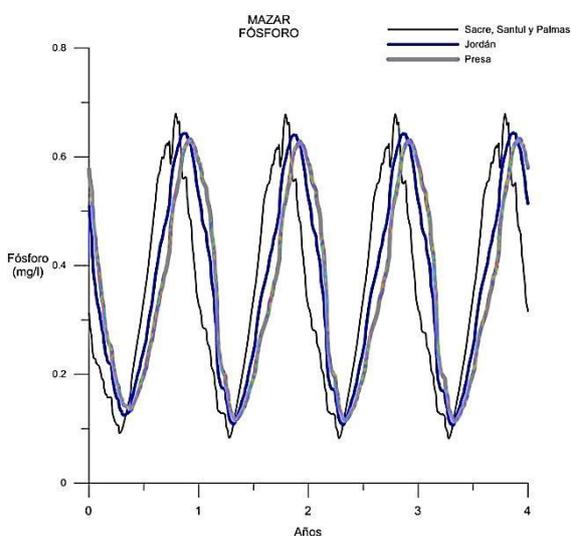


Figura 4-51 Fósforo 2E6 hab. Mazar

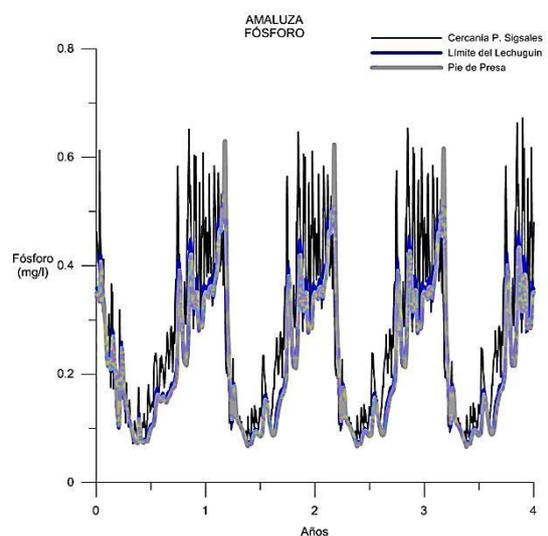


Figura 4-52 Fósforo 2E6 hab. Amaluza



El aumento en la concentración de fósforo se debe a la restitución que desde el sedimento se produce como consecuencia del estado anóxico. Además al aumentar la población va a haber una mayor descarga en los embalses de este nutriente, sin llegar a tener problemas por acumulación del mismo.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES

5.1 Conclusiones generales

En la generación cartográfica se obtuvieron datos de volúmenes de agua muy aproximados a la realidad, obteniendo en el caso del Embalse Mazar 407.11 hm³ y en el embalse Amaluza 115. 53 hm³, en comparación con los 410 hm³ y 120 hm³ que son los volúmenes de referencia respectivamente; esto se logró considerando todos los datos disponibles en formato digital e impreso. Los modelos SIG resultantes servirán para múltiples aplicaciones futuras que involucren el análisis con el volumen real de los embalses y su morfología. Sin embargo, se recomienda que los modelos cartográficos resultantes sean actualizados con datos reales de batimetrías y levantamientos de sitios específicos de los embalses.

El modelo GIS *Basins* es una herramienta muy versátil para definir puntos de contaminación, forma de la cuenca, datos geomorfológicos (área, longitud, volumen, profundidad media y máxima), además de la capacidad de incorporar la funcionalidad del modelo *Aquatox* para el análisis integral de la calidad del agua de las cuencas hidrográficas.

El modelo *Aquatox* resulto ser una herramienta de modelación de fácil manejo, edición de datos y visualización de resultados; pero uno de los inconvenientes en su operación es la gran cantidad de parámetros que se necesitan ingresar: meteorológicos, hidrológicos, biológicos, calidad de agua, geomorfológicos y geográficos. En el caso de los embalses Mazar y Amaluza muchos de estos datos no han sido medidos ni tomados en campo; por ejemplo, los datos meteorológicos fueron tomados de una estación cercana, los datos hidrológicos fueron obtenidos a partir del caudal de salida mediante un balance de masas, datos de calidad de agua como el dióxido de carbono se impusieron de un embalse con similares características y función que los embalses del presente estudio, especies y concentraciones de algas, así como de nitratos en los ríos se obtuvo de un estudio exterior; además se calibro los porcentajes de detritos ya sean de descomposición lenta o rápida. En el caso del nitrato no se

obtuvieron valores semejantes a la realidad, ya que el 60% de los datos medidos en campo se encuentra fuera del rango obtenido en el estudio, por lo que se concluye que puede existir algún mecanismo de inhibición de la nitrificación que esté ocurriendo en los embalses y se desconoce, o un agente tóxico que inhiba estos procesos, pero que en el modelo matemático no está siendo considerado. En el caso de los organismos fotosintéticos se ha reportado picos de crecimiento descontrolado en lagunas naturales y artificiales del país debido a condiciones muy favorables de temperatura y radiación solar. Estos fenómenos son difíciles de representar en el modelo.

El modelo construido en esta investigación presenta una buena aproximación cualitativa, puesto que la cantidad y calidad de los datos experimentales no permiten en las condiciones actuales realizar una calibración rigurosa de los modelos matemáticos presentados en esta tesis.

5.2 Análisis de Escenarios

- Al analizar los escenarios 2012 y 2030 se observó que el aplicar o no un tratamiento de efluentes domésticos a las ciudades de Gualaceo, Paute, Azogues y Biblián no representa una diferencia sustancial en cuanto a la calidad de los embalses ya que estos al tener un gran volumen tienen una gran capacidad de autodepuración.
- Al aumentar la población los niveles de oxígeno disminuyen, los nutrientes (amonio, nitratos y fósforo) aumentan y no existen cambios significativos en los valores de clorofila; si al llegar a una situación donde los habitantes lleguen a 2 millones, se obtendrán épocas anóxicas en todos los tramos de los embalses, convirtiéndolos en lugares desagradables en donde no se puede implantar ninguna clase de actividad.
- El desarrollo del modelo ayudó a observar el comportamiento de los parámetros existentes según la época del año, ya que a diferentes temperaturas (verano e invierno) marcaban de manera precisa su dinámica en el embalse.

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- A A Koelmans, A. V. D. H., L M Knijff, R H Aalderin. (2001). INTEGRATED MODELLING OF EUTROPHICATION AND ORGANIC CONTAMINANT FATE & EFFECTS IN AQUATIC ECOSYSTEMS. A REVIEW. *Water Research*, 35, 3517-3536.
- ACOTECNIC. (2006). PROYECTO HIDROELÉCTRICO MAZAR ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL DEFINITIVO (EIAD): HIDROPAUTE S.A.
- AGROWASTE. (2013). Digestión Anaerobia (pp. 9). Murcia, España.
- Alvarado, A. (2014). Caudal de Aguas Residuales.
- Alvarado, P. (2013). *FACTIBILIDAD DEL USO DE LECHUGUÍN DEL EMBALSE MAZAR PARA LA ELABORACION DE COMPOST*. (Msc), Universidad del Azuay. Retrieved from <http://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/466/1/09390.pdf>
- ASTEC. (1987). PROYECTO HIDROELÉCTRICO AGOYÁN (P. HIDROELÉCTRICOS, Trans.): ASTEC.
- Autodesk. (2013). AutoCAD Civil 3D 2013 (Version 2013). United State.
- Avilés, A. C. (2008). Generación Hidroelectrica en el Ecuador: Posibles Beneficios en los Mercados De Carbono: Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
- Betancourt, S., Toledo. (2008). Ciclo anual del nitrógeno y el fósforo en el embalse Paso Bonito, Cienfuegos, Cuba. 80.
- CAMINOSCA. (2010). Daule Peripa (213 MW). Retrieved from Daule Peripa (213 MW) website: http://www.caminosca.com/index.php?option=com_content&view=article&id=51%3Adaule-peripa-213-mw-&catid=37%3Ahidroelectricidad&Itemid=1
- CAMINOSCA, C. (2005). MAZAR (160 MW). Hidroelectricidad. CARDNO CAMINOSCA. Retrieved from http://www.caminosca.com/index.php?option=com_content&view=article&id=56:mazar-160-mw-&catid=37:hidroelectricidad&Itemid=1
- Castillo, M. (2014). Los Ciclos Biogeoquímicos. http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/ciencias/2000088/lecciones/seccion1/capitulo04/tema05/01_04_05.htm
- CELEC. (2010). 30 años de la Central Paute Molino, Una historia para ser contada. Retrieved 1/09/2014, 2014, from <https://www.celec.gob.ec/hidropaute/index.php/perfil-corporativo/resena-historica>
- CELEC. (2011). HIDROAGOYAN. Retrieved from CELEC-EP website: https://www.celec.gob.ec/index.php?option=com_content&view=article&id=111:hidroagoyan&catid=47
- CELEC. (2013a). 25 AÑOS Presa Daule-Peripa. *HIDRONACION*, 1, 100.
- CELEC. (2013b). Embalse Mazar. from <https://www.celec.gob.ec/hidropaute/index.php/centrales/embalse>
- CELEC. (2013c). Hidropaute:La Unidad de Negocio. Retrieved 10/11/2014, 2014, from https://www.celec.gob.ec/index.php?option=com_content&view=article&id=197:hidropaute&catid=42:generacion-hidroelectrica

- CELEC. (2013d). INFORME DE RENDICION DE CUENTAS 2013 (pp. 34).
- CELEC. (2013e). INFORME SOBRE LA SEDIMENTACIÓN DEL EMBALSE AMALUZA - BATIMETRÍA DE DICIEMBRE 2013 (U. d. N. Hidropaute, Trans.). Cuenca, Ecuador: Corporación Eléctrica del Ecuador.
- CELEC. (2013f). Presa y Túneles. from <https://www.celec.gob.ec/hidropaute/index.php/centrales/presa-y-tuneles>
- CELEC. (2013g). Proyectos Hidráulicos. Retrieved 5/8/2014, 2014, from https://www.celec.gob.ec/index.php?option=com_content&view=article&id=116&Itemid=233
- CELEC. (2014). Caudales y Niveles. from <http://hpaforms.celec.com.ec/hidropaute/graficaproduccion/default.aspx>
- Cisneros, J. F. (2013). INFORME FINAL: ESTUDIO BIOLÓGICO MONITOREO DE CALIDAD DE AGUA DEL SISTEMA DE GENERACIÓN HIDROELECTRICA "PAUTE INTEGRAL" (pp. 45): PROMAS- UNIVERSIDAD DE CUENCA.
- CITMA. (2015). Los Lagos y Embalses (T. Y. M. A. CONSELLERIA DE INFRAESTRUCTURAS, Trans.) *La dinámica de los lagos y embalses: GENERALITAT VALENCIANA*.
- CONELEC. (2010). CENTRAL HIDROELÉCTRICA PAUTE MAZAR. Retrieved 1/11/2014, 2014, from <http://www.conelec.gob.ec/contenido.php?cd=1336>
- Chiriboga, P. R. (2013). Hidroeléctrica | CIE. Retrieved 1/1/2014, 2014, from http://www.energia.org.ec/cie/?page_id=41.
- Dominguez, I. C. (2013). *EVALUACIÓN DE LA GESTION TERRITORIAL DE LA CUENCA DEL RIO PAUTE, ESTRATEGIAS Y LINEAS DE ACCIÓN PARA SUPERARLAS*. (Msc), Universidad de Cuenca.
- EPA. (2013a). BASINS4.1 Manual. United States: EPA.
- EPA. (2013b). Better Assessment Science Integrating point and Nonpoint Sources (Version 4.1) [GIS]. United States: EPA.
- EPA. (2014a). About AQUATOX. Retrieved 22/8/2014, 2014, from <http://www2.epa.gov/exposure-assessment-models/aquatox-basic-information>
- EPA. (2014b). AQUATOX. Retrieved 14/08/2014, 2014, from <http://www2.epa.gov/exposure-assessment-models/aquatox>
- EPA. (2015a). River and Stream Water Quality Model (QUAL2E). from <http://epa.gov/athens/wwqtsc/html/qual2k.html>
- EPA. (2015b). What does AQUATOX do? , from <http://www2.epa.gov/exposure-assessment-models/what-does-aquatox-do>
- EPEC. (2012). Centrales Hidroeléctricas: Empresa Provincial de Energía de Córdoba.
- ESRI. (2012). ArcGIS 10.1 (Version 10.1). United Station.
- FAO. (1997). CONTAMINACIÓN PROVOCADA POR LOS SEDIMENTOS (D. d. D. Sostenible, Trans.). Burlington, Canadá: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FransonTechnology. (2014). FransonCoordTrans (Version 2.3).
- García, H. (2008). *MODELACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA EN CORRIENTES NATUR*

- ALES MEDIANTE SISTEMAS NO LINEALES ACOPLADOS. (Msc), PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA, Bogotá, Colombia. Retrieved from <http://repository.javeriana.edu.co/bitstream/10554/3809/1/GarciaQuinteroHermesAlfonso2008.pdf>
- González, J. R. R. (2012). *ESTABLECIMIENTO DEL NUTRIENTE LIMITANTE CON BASE EN LOS CAMBIOS DE LA ESTRUCTURA DEL ENSAMBLAJE FITOPLANCTÓNICO EN UN EMBALSE TROPICAL COLOMBIANO*. Universidad de Antioquia, Colombia.
- Goyenola, G. (2007). Oxígeno Disuelto (pp. 3). Uruguay: Universidad de la República Uruguay.
- Guano, M. (2014). *MANUAL BÁSICO PARA LA MODELACIÓN NUMÉRICA DE LA CALIDAD DEL AGUA EN RÍOS: PROGRAMA COMPUTACIONAL HEC-RAS VERSIÓN 4.0. EJEMPLO DE APLICACIÓN A UN TRAMO DEL RÍO MACHÁNGARA DENTRO DE LA ZONA DE INFLUENCIA DE LA CIUDAD DE QUITO*. (Ingeniero Ambiental), Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador. Retrieved from <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/8556/1/CD-5767.pdf>
- INEC. (2015). Población y Demografía.
- INP. (2013). ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL DEFINITIVO EMBALSE DE LA REPRESA DE TAHUÍN: INSTITUTO NACIONAL DE PREINVERSIÓN.
- Kenyon, G. F. (2013). THE ENVIRONMENTAL EFFECTS OF HYDROELECTRIC PROJECTS. *Canadian Water Resources Journal /Revue canadienne des ressources hydriques*, 309-314.
- Marín, R. (2003). *Fisicoquímica y Microbiología de los Medios Acuáticos: Tratamiento y Control de Calidad de Aguas*. Madrid, España.
- Martínez, A. (2009). *ESTUDIO Y ANÁLISIS DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL EMBALSE DE BELLÚS MEDIANTE EL DESARROLLO DE UN MODELO DE EUTROFIZACIÓN*. (Msc), POLITÉCNICA DE VALENCIA, Valencia.
- MCSE. (2013). Sectores Estratégicos (pp. 4): Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos.
- Morábito, S., Filippini, Bermejillo, Lavié. (2009). Presencia de Nitratos en las Aguas de los Ríos Mendoza y Tunuyán Superior. 2.
- Plaza, P. (1998). ALGUNOS ASPÉCTOS ECOLÓGICOS DE LAS ESPECIES ÍCTICAS MÁS IMPORTANTES EN EL EMBALSE EL PEÑOL-GUATAPÉ. *Actualidades Biológicas*, 20, 13-20.
- PROMAS. (2012). Informe de Factibilidad-Pacalori.
- Salas, I. H. J. (2001). METODOLOGÍAS SIMPLIFICADAS PARA LA EVALUACIÓN DE EUTROFICACION EN LAGOS CÁLIDOS TROPICALES (D. d. S. y. A. O. R. d. I. O. M. d. I. S. (OMS), Trans.) (pp. 16-33): Organización Panamericana de la Salud (OPS)
- Sales, M. J. (2008). *Transferencia de Nutrientes Entre Columna de Agua Y El Sedimento Bajo Condiciones Anaerobias En El Embalse de Beniarrés (Alicante)*. Universidad Politécnica de Valencia. Retrieved from http://riUNET.upv.es/bitstream/handle/10251/13044/Tesina_Master.pdf?sequence=1



- Shilling, F. (2014). California Watershed Assessment Manual (Volumes I and II) (D. o. E. S. a. Policy, Trans.). California, United State: University of California.
- SSG. (1998). HSPF Model Overview. Utah, United Station: Scientific Software Group.
- Toja, D. J. (1982). Control de la eutrofía en embalses por utilización selectiva de agua a distintas profundidades. *Revista de Obras Públicas*, 223.
- UDELAR. (2012). Limnología Básica 2012 (D. d. Ecología, Trans.): Universidad de la República Uruguay.
- UMSS. (2003). Eutrofización de cuerpos de agua (F. d. Tecnología, Trans.) (pp. 10). Cochabamba, Bolivia: Universidad Mayor de San Simón.
- Vincent, W. W., Connie Vincent, P. J. Richerson (1984). Seasonal dynamics of nutrient limitation in a tropical high-altitude lake (Lake Titicaca, Peru-Bolivia): Application of physiological bioassays *Limnology and Oceanography*, 29, 540-552.
- Wellman, R. A. P. J. S. C. M. C. (2010). *AQUATOX Short Course*. Paper presented at the SETAC Meeting, Portland Oregon.
- YELA, H. (2004). "ESTUDIO FISICO QUIMICO Y BIOLOGICO DEL PROCESO DE EUTROFIZACION DEL EMBALSE DE POZA HONDA Y SU INCIDENCIA EN LA FORMACION DE TRIHALOMETANOS EN EL SISTEMA REGIONAL DE AGUA POTABLE DE POZA HONDA". (Dr.), UNIVERSIDAD DE GUAYAQUIL. Retrieved from <http://repositorio.uq.edu.ec/bitstream/redug/3333/1/Proyecto%20Poza%20Onda.pdf>