



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**ELABORACIÓN DE UN SIMULADOR PARA EL CÁLCULO DE LA DISPERSIÓN DE
CONTAMINANTES EN RÍOS EN FUNCIÓN DE LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO Y
EL OXÍGENO DISUELTO**

Luis Miguel Martínez Morales

Asesorado por el Ing. Jorge Mario Estrada Asturias

Guatemala, agosto de 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ELABORACIÓN DE UN SIMULADOR PARA EL CÁLCULO DE LA DISPERSIÓN DE
CONTAMINANTES EN RÍOS EN FUNCIÓN DE LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO Y
EL OXÍGENO DISUELTO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

LUIS MIGUEL MARTÍNEZ MORALES

ASESORADO POR EL ING. JORGE MARIO ESTRADA ASTURIAS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, AGOSTO DE 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

| | |
|------------|---------------------------------------|
| DECANA | Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada |
| VOCAL I | Ing. José Francisco Gómez Rivera |
| VOCAL II | Ing. Mario Renato Escobedo Martínez |
| VOCAL III | Ing. José Milton de León Bran |
| VOCAL IV | Br. Christian Moisés de la Cruz Leal |
| VOCAL V | Br. Kevin Armando Cruz Lorente |
| SECRETARIO | Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez |

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

| | |
|-------------|---------------------------------------|
| DECANA | Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada |
| EXAMINADOR | Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía |
| EXAMINADORA | Inga. Adela María Marroquín Gonzales |
| EXAMINADOR | Ing. Mario José Mérida Meré |
| SECRETARIO | Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez |

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

ELABORACIÓN DE UN SIMULADOR PARA EL CÁLCULO DE LA DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES EN RÍOS EN FUNCIÓN DE LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO Y EL OXÍGENO DISUELTO

Tema que me fue asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 7 de mayo de 2015.

Luis Miguel Martínez Morales

Guatemala, 21 de mayo de 2020

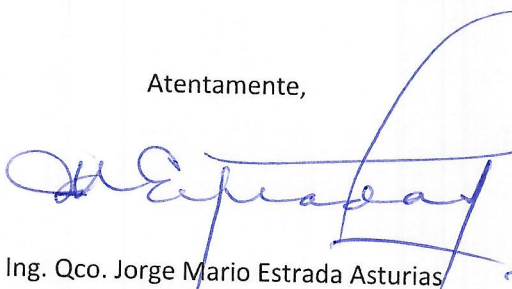
Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Respetable Ingeniero Álvarez:

Esperando que tenga éxitos en sus actividades laborales, por este medio hago de su conocimiento que, en mi calidad de asesor del trabajo de graduación del estudiante de Ingeniería Química LUIS MIGUEL MARTINEZ MORALES, quien se identifica con carne número 2009-24755 y CUI 2459 07203 0502, he revisado el informe final de trabajo de graduación, titulado **“ELABORACIÓN DE UN SIMULADOR PARA EL CÁLCULO DE LA DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES EN RÍOS EN FUNCIÓN DE LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO Y OXÍGENO DISUELTO”**. Por lo que considero que el presente informe cumple con los requisitos necesarios para ser presentado antes las autoridades de la Escuela de Ingeniería Química y lo doy por aprobado.

Por lo tanto, dejo a su consideración que el estudiante continúe con los trámites pertinentes para la defensa y aprobación del mismo ante la terna evaluadora y su persona.

Atentamente,



Ing. Qco. Jorge Mario Estrada Asturias
Numero colegiado 685
Asesor

Jorge Mario ESTRADA ASTURIAS
M. Sc. Ingeniero Químico Col. 685
PROFESOR TITULAR
Facultad de Ingeniería
Registro USAC 20080059



Guatemala, 5 de agosto de 2020.

Ref. EIQ.205.2020

Aprobación del informe final del trabajo de graduación

Ingeniera
Aurelia Anabela Cordova Estrada
Decana
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Revisado el INFORME FINAL DEL TRABAJO DE GRADUACIÓN DENOMINADO **ELABORACIÓN DE UN SIMULADOR PARA EL CÁLCULO DE LA DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES EN RÍOS EN FUNCIÓN DE LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO Y EL OXÍGENO DISUELTO**, del(la) estudiante Luis Miguel Martínez Morales, se conceptúa que el documento presentado, reúne todas las condiciones de calidad en materia administrativa y académica (rigor, pertinencia, secuencia y coherencia metodológica), por lo tanto, se procede a la autorización del mismo, para que el(la) estudiante pueda optar al título de Ingeniería Química.

"Id y Enseñad a Todos"


Ing. Williams G. Álvarez Mejía / M.I.D. / M.U.
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química



Cc. Archivo
WGAM/wgam



ACAAI

Asociación Centroamericana de Acreditación
Organización de Acreditación y de Calidad



Formando Ingenieros Químicos en Guatemala desde 1939



**NO SALGAS
QUÉDATE EN
CASA**



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Decanato
Facultad de Ingeniería
24189101 - 24189102

DTG. 171.2020

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **ELABORACIÓN DE UN SIMULADOR PARA EL CÁLCULO DE LA DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES EN RÍOS EN FUNCIÓN DE LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO Y EL OXÍGENO DISUELTO**, presentado por el estudiante universitario: **Luis Miguel Martínez Morales**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Inga. Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, agosto de 2020

AACE/selene

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Creador de vida y dador de la sabiduría, quien me ha dado la fe, fortaleza y esperanza para lograr esta meta y por cumplir su propósito en mi vida al permitirme llegar a este momento.
- Mi madre** María Luisa Morales Gatica, por concederme el privilegio más grande que es la vida, por tu ejemplo, tu apoyo, por siempre creer en mí y darme la oportunidad de convertirme en un profesional, sobre todo por tu amor incondicional.
- Mi padre** Rubén Darío Martínez Avilés, por todo el esfuerzo y trabajo hecho para el bienestar de nuestra familia, por todos tus consejos, por guiarme en el camino del bien y por ser la mejor persona que como padre, Dios me pudo dar.
- Mis hermanos** Rubén Darío y Claudia Ivonne Martínez Morales, por siempre inspirarme y ser mi motivación para seguir adelante, por enseñarme a compartir el amor de familia, a ambos siempre los llevo en el corazón.

Mi familia

Por su apoyo en los buenos y malos momentos, por su ejemplo de lucha, por su motivación y cariño.

**Señor presidente de
la República de
Guatemala**

Dr. Alejandro Giammatei, por sus sabios consejos e incondicional apoyo, ejemplo de perseverancia y esmero, por su lucha diaria y su trabajo incansable en la construcción de un país desarrollado.

AGRADECIMIENTOS A:

USAC

Por brindarme la educación, valores con sentido social y la oportunidad de conocer a grandes compañeros y profesionales dentro de esta institución. Orgullosa de ser sancarlista.

Facultad de Ingeniería

Por brindarme una formación personal, académica y profesional de calidad con herramientas necesarias para desempeñarme como profesional.

Mis docentes

Por sus enseñanzas y por su invaluable apoyo a lo largo de mi formación como profesional, muy especialmente al Ing. Jorge Mario Estrada, Dr. Adolfo Gramajo, Inga. Adela Marroquín, Ing. William Álvarez, Ing. Anabela Cordova e Ing. Víctor Monzón.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|--|------|
| ÍNDICE DE ILUSTRACIONES..... | V |
| LISTA DE SÍMBOLOS..... | VII |
| GLOSARIO..... | IX |
| RESUMEN..... | XIII |
| OBJETIVOS | XV |
| Hipótesis..... | XVI |
| INTRODUCCIÓN..... | XIX |
| | |
| 1. ANTECEDENTES GENERALES..... | 1 |
| | |
| 2. MARCO TEÓRICO..... | 5 |
| 2.1. Contaminación ambiental | 5 |
| 2.2. Contaminación en agua superficial | 6 |
| 2.3. Contaminación en aguas receptoras | 6 |
| 2.4. Descargas de desagües cloacales y residuales..... | 8 |
| 2.5. Calidad del agua..... | 11 |
| 2.5.1. Criterios de calidad del agua..... | 11 |
| 2.5.1.1. Parámetros físicos | 12 |
| 2.5.1.2. Parámetros químicos | 14 |
| 2.6. Modelación matemática..... | 17 |
| 2.6.1. Tipos de modelos..... | 18 |
| 2.6.1.1. Modelo de Streeter-Phelps (Curva SAG)..... | 25 |

| | | |
|----------|--|----|
| 3. | DISEÑO METODOLÓGICO..... | 31 |
| 3.1. | Localización | 31 |
| 3.2. | Variables | 31 |
| 3.3. | Recursos humanos disponibles..... | 32 |
| 3.4. | Recursos materiales disponibles | 33 |
| 3.4.1. | Software estadístico | 33 |
| 3.5. | Técnica cualitativa o cuantitativa | 34 |
| 3.6. | Recolección y ordenamiento de la Información | 35 |
| 3.6.1. | Obtención de muestras..... | 36 |
| 3.6.2. | Datos para la simulación de escenarios | 39 |
| 3.7. | Tabulación y ordenamientos de datos | 41 |
| 3.8. | Análisis estadístico..... | 44 |
| 3.8.1. | Verificación del modelo..... | 44 |
| 3.8.2. | Análisis de sensibilidad..... | 46 |
| 3.8.2.1. | Prueba de Tukey | 47 |
| 4. | RESULTADOS | 49 |
| 4.1. | Modelo de regresión para cada escenario simulado | 49 |
| 4.2. | Estadísticas de regresión para cada escenario simulado | 51 |
| 4.3. | Pruebas hipótesis..... | 55 |
| 4.3.1. | Prueba de hipótesis de correlación (r) para cada escenario simulado..... | 56 |
| 4.3.2. | Prueba de hipótesis de medias (μ_1, μ_2, μ_3) según sus constantes (k_1, k_2) | 56 |
| 5. | INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS | 59 |

CONCLUSIONES63
RECOMENDACIONES.....65
BIBLIOGRAFÍA.....67
ANEXOS69

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

| | | |
|-----|---|----|
| 1. | Representación del ciclo de un modelo de simulación | 25 |
| 2. | Curva SAG de oxígeno disuelto | 29 |
| 3. | Ubicación del área de estudio | 31 |
| 4. | Curva de agotamiento del oxígeno | 34 |
| 5. | Descripción gráfica del modelo elemental de la calidad del agua | 35 |
| 6. | Visualización de los puntos a muestrear | 37 |
| 7. | Modelo ajustado de la curva SAG del escenario A | 50 |
| 8. | Modelo ajustado de la curva SAG del escenario B | 50 |
| 9. | Modelo ajustado de la curva SAG del escenario C | 51 |
| 10. | Modelo simulado vrs ajustado del escenario A | 53 |
| 11. | Modelo simulado vrs ajustado del escenario B | 54 |
| 12. | Modelo simulado vrs ajustado del escenario C | 55 |

TABLAS

| | | |
|-------|---|----|
| I. | Datos calculados de OD (mg/l) con la fórmula 1 | 15 |
| II. | Valores típicos de la constante de desoxigenación | 28 |
| III. | Valores típicos de la constante de reaeración | 29 |
| IV. | Variables Independientes | 32 |
| V. | Variables dependientes | 32 |
| VI. | Recursos materiales disponibles | 33 |
| VII. | Datos experimentales | 38 |
| VIII. | Clasificación de cuerpos de agua según OD (mg/l) | 39 |

| | | |
|--------|--|----|
| IX. | Valores de mínimos promedios y máximos de las constantes k_1 y k_2 para la simulación..... | 41 |
| X. | Modelo de regresión por cada escenario simulado..... | 41 |
| XI. | Resultados del análisis de regresión por cada escenario simulado. ... | 42 |
| XII. | Indicadores estadísticos para la validación de cada escenario simulado..... | 42 |
| XIII. | Análisis para la prueba de hipótesis de correlación (r) por escenario simulado..... | 43 |
| XIV. | Resultados del análisis de varianza de un factor. | 43 |
| XV. | Prueba post Hoc de Tukey | 44 |
| XVI. | Datos estimados de cada simulación..... | 49 |
| XVII. | Estadísticas de regresión del escenario A | 52 |
| XVIII. | Estadísticas de regresión del escenario B | 53 |
| XIX. | Estadísticas de regresión del escenario C | 54 |
| XX. | Indicadores de verificación por modelo simulado..... | 55 |
| XXI. | Análisis para la prueba de hipótesis de correlación (r) por escenario simulado..... | 56 |
| XXII. | Resultados del Análisis de Varianza de un Factor. | 56 |
| XXIII. | Prueba Post Hoc de Tukey | 57 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| Símbolo | Significado |
|----------------------|--------------------|
| Q | Caudal |
| °C | Grados Celsius |
| h | Hora |
| Km | Kilometro |
| m | Metro |
| m³ | Metro cúbico |

GLOSARIO

| | |
|--------------------------------------|---|
| Análisis de varianza | Técnica estadística que se puede utilizar para decidir si las medias de dos o más poblaciones son iguales. |
| Caudal | Cantidad de agua que lleva una corriente o que fluye de un manantial o fuente. |
| Coefficiente de correlación | Medida que permite conocer el grado de asociación lineal entre dos variables. |
| Constante de reaireación | Constante que expresa el paso del oxígeno del aire al agua, este proceso se lleva a cabo por el contacto agua-aire |
| Criterios de información | Medida de la calidad relativa para la selección de modelos estocásticos para un comportamiento. |
| Demanda bioquímica de oxígeno | Parámetro que mide la cantidad de oxígeno consumido al degradar la materia orgánica de una muestra orgánica. |
| Demanda química de oxígeno | Parámetro que mide la cantidad de sustancias susceptibles de ser oxidadas por medios químicos que hay disueltas o en suspensión en una muestra líquida. |

| | |
|--------------------------------|---|
| Desviación estándar | Medida que ofrece información sobre la dispersión media de una variable. La desviación estándar es siempre mayor o igual que cero. |
| Estadística inferencial | Rama de la estadística que mide el promedio de los errores al cuadrado, es decir, la diferencia entre el estimador y lo que se estima. |
| Fotosíntesis | Proceso químico que tiene lugar en las plantas con clorofila y que permite, gracias a la energía de la luz, transformar un sustrato inorgánico en materia orgánica rica en energía. |
| Media | La media es el valor promedio de un conjunto de datos numéricos, calculada como la suma del conjunto de valores dividida entre el número total de valores. |
| Oxígeno disuelto | Oxígeno presente en un cuerpo de agua, este se produce gracias a la fotosíntesis y se consume gracias a la respiración de los organismos, además de la descomposición de material orgánico y otras sustancias químicas. |
| Prueba de hipótesis | Realizar una afirmación acerca del valor del parámetro de la población bajo estudio puede tomar. Esta afirmación puede estar basada en alguna creencia o experiencia pasada que será contrastada |

con la evidencia que se desea obtener a través de la información que se obtiene.

Simulación

Proceso de diseñar un modelo de un sistema real y llevar a término experiencias con él, con la finalidad de comprender el comportamiento del sistema o evaluar nuevas estrategias -dentro de los límites impuestos por un cierto criterio o un conjunto de ellos -para el funcionamiento del sistema.

Temperatura

Grado o nivel térmico de un cuerpo o de la atmósfera.

RESUMEN

Este estudio brinda información preliminar de la autodepuración de los efluentes que son contaminados por industrias que vierten sus residuos líquidos al paso del río. El objetivo de esta investigación es elaborar un simulador para el cálculo de dispersión de contaminantes en ríos, en función de la demanda bioquímica de oxígeno y de la distancia entre puntos. De esta forma se obtendrá un diagnóstico rápido de la demanda química y bioquímica de oxígeno en el río que sea objeto del estudio.

Se considera un río específico para realizar el estudio del que se tomarán muestras en distintos puntos previamente ubicados a determinadas distancias, se harán pruebas en el laboratorio para la obtención de los distintos resultados necesarios para la elaboración de los modelos que nos permitirán elaborar gráficos que muestren la disminución de la demanda bioquímica de oxígeno en el agua estudiada.

El simulador tendrá la capacidad de mostrar gráficamente un modelado de la dispersión de contaminantes en los distintos puntos del río estudiado, gráficas que se obtendrán a partir de los resultados que nos brinden la ecuación clásica de Streeter-Phelps. Se podrá lograr una caracterización completa y proponer estrategias para la reducción de la contaminación.

OBJETIVOS

General

Elaborar un simulador para el cálculo de dispersión de contaminantes en ríos en función de la disminución de la demanda bioquímica de oxígeno, oxígeno disuelto y de la distancia recorrida, en un tramo del río Pantaleón ubicado en el municipio de Siquinalá, departamento de Escuintla.

Específicos

- Obtener la curva SAG (modelo Streeter-Phelps) de oxígeno disuelto del río Pantaleón en función de la distancia recorrida (km).
- Determinar los valores críticos de oxígeno disuelto (mg/L) y la DBO((mg/L) según su distancia crítica (km) y tiempo crítico (horas) por escenario.
- Obtener el modelo de regresión lineal que explique el comportamiento del oxígeno disuelto del río Pantaleón en función de la distancia recorrida (km), a partir de la modelación de escenarios.
- Determinar la verificación y validación del modelo de regresión lineal que explica el comportamiento del oxígeno disuelto del río Pantaleón en función del tiempo (horas).
- Deducir a partir de los resultados obtenidos si el río Pantaleón se encuentra actualmente contaminado.

Hipótesis

Es posible construir un modelo para estimar el comportamiento del oxígeno disuelto (mg/l) del río Pantaleón en función de la distancia recorrida (km), a partir de la modelación de escenarios.

Hipótesis nula:

H_{O_1} : la correlación de oxígeno disuelto (mg/l) del río Pantaleón en función de la distancia recorrida en kilómetros para los 3 escenarios posibles (A, B y C) es igual a cero, a un nivel de significancia del 5 %.

$$H_{O_1}: r = 0$$

H_{O_2} : no existe diferencia significativa en la evaluación para la construcción de los 3 escenarios posibles (A, B y C) a diferentes k_1 y k_2 para estimar el comportamiento del oxígeno disuelto (mg/l) del río Pantaleón en función de la distancia recorrida en km, a un nivel de significancia del 5 %.

$$H_{O_2}: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$$

Hipótesis alterna:

H_{a_1} : la correlación de oxígeno disuelto (mg/l) del río Pantaleón en función de la distancia recorrida en kilómetros para los 3 escenarios posibles (A, B y C) no es igual a cero, a un nivel de significancia del 5 %.

$$H_{a_1}: r \neq 0$$

H_{a_2} : existe diferencia significativa en la evaluación de la construcción de escenarios posibles (A, B y C) a diferentes k_1 y k_2 para estimar el comportamiento del oxígeno disuelto (mg/l) del río Pantaleón en función de la distancia recorrida en kilómetros, a un nivel de significancia del 5 %.

$$H_{a_2}: \exists \text{ al menos una } \mu_k \neq 0; k = 1, 2,$$

INTRODUCCIÓN

Las aguas superficiales escurren o se almacenan sobre la superficie terrestre, en este estudio se evaluarán las vertientes de aguas dulces; por su importancia es imprescindible que sean objetos de una gestión integral para obtener el máximo provecho de este, con equidad y con el fin de evitar el abuso en la contaminación y al mismo tiempo promover su conservación para las generaciones futuras.

Los beneficios esperados se pueden agrupar en finales e intermedios, entre los primeros se pueden mencionar el aprovechamiento para la generación de energía eléctrica a través de las hidroeléctricas, el mejoramiento de la calidad de vida, como suministro de agua potable y el mejoramiento y conservación de lagos y ríos los cuales son utilizados entre otras actividades para la agricultura la cual es una de las actividades que más aprovecha este tipo de efluentes.

El agua es tan abundante, tres cuartas partes de la tierra se encuentran cubiertas de agua. Es el principal componente de todos los organismos vivos, sin este elemento no es posible la vida. El agua es la sustancia que ayuda a digerir los alimentos, distribuye el calor absorbido en el cuerpo humano y mantiene su temperatura normal, es esencial para la circulación de la sangre y la eliminación de los desechos.

Una de las principales y mayores causas de la contaminación de aguas, es la falta de tratamiento de afluentes industriales antes de verterlos en los ríos, mares u océanos, bajo este contexto, los ríos operan como verdaderos filtros y

emplean sus características hidráulicas para tratar de diluir las aguas residuales de las industrias.

Los contaminantes vertidos tienden a dispersarse en el curso de agua de una manera influenciada por diferentes factores, tales como la geometría del curso de agua, el caudal y las características fisicoquímicas del agua, características medio ambientales, entre otros.

Esta dispersión es susceptible de modelaciones que permitan predecir, tanto la migración y dilución de contaminantes, como las concentraciones de estos en puntos específicos, lo que ayudara a la toma de decisiones en materia de gestión del recurso hidráulico.

El presente estudio versará sobre la disminución de la demanda bioquímica de oxígeno en el agua para la elaboración de modelos que nos permitan crear gráficas para generar un simulador el cual tendrá la capacidad de mostrar la dispersión de contaminantes en los distintos puntos del río estudiado, esto a través de la ecuación básica de Streeter-Phelps.

1. ANTECEDENTES GENERALES

En el 2001 se desarrolla una metodología de modelización de los procesos difusivos en condiciones de régimen estacionario, de contaminantes y nutrientes de origen superficial y puntual, aportados por los tributarios al Embalse Frontal de Termas de Río Hondo (*Provincias de Tucumán y Santiago del Estero, República Argentina*). El modelo analógico-digital, genera isolíneas de potencial V (curvas equipotenciales) o bien superficies reticuladas, que se corresponden con la dispersión espacial de contaminantes y nutrientes, en el medio líquido, cuando se emplea la Concentración C como parámetro distribuido. En los procesos de difusión y mezclado, en medio isótropo, con conductividad eléctrica O , independiente de la posición r , es posible emplear un sistema análogo de conducción eléctrica continua óhmica descrito por la ecuación de Laplace ($\nabla^2 V(r) = O$). El modelo, electro-analógico bidimensional, fue construido a escala con papel semiconductor, respetando la planimetría del Embalse Frontal de Termas de Río Hondo, cuando el espejo alcanza la cota máxima. Se obtuvieron valores de tensión o potencial eléctrico y de este modo, se generaron soluciones para la ecuación de Laplace.

En el 2013 se llevó a cabo en la Universidad de El Salvador para la Facultad de Ingeniería y Arquitectura un trabajo de investigación con el tema *Caracterización hidrodinámica y dispersión de contaminantes de la parte alta del Río Suquiapa, Santa Ana* por los investigadores Roberto Leandro Espinoza Rivas, Allan Vinicio Merino y Rebeca María Zavaleta Lemus, con el objetivo de la evaluación de los principales parámetros hidrodinámicos y la evaluación del coeficiente de dispersión de un tramo de aproximadamente 10 km de la parte alta del río Suquiapa. La obtención de los parámetros hidrodinámicos se realizó

mediante la técnica de aforo por vadeo, utilizando un molinete hidrométrico tipo Gurley y mediante un experimento de pulso de trazadores utilizando cloruro de sodio y tomando como parámetro de campo la conductividad eléctrica con un medidor multiparamétrico de calidad de agua. Los resultados que obtuvieron mediante la técnica de aforo por vadeo fueron valores de caudal, velocidad media, perímetro mojado, radio hidráulico, profundidad, área de sección transversal y coeficientes de dispersión obtenidos con la ecuación empírica de Fischer.

Si se parte de la premisa que la mayoría de los ríos que se encuentran dentro de nuestro territorio han sido evaluados como aguas contaminadas, y que estos poseen diversos usos para los habitantes de las zonas aledañas a ellos, como lo puede ser: riego, bebedero para ganado, usos domésticos, recreación, generación de energía eléctrica y punto de descarga de aguas residuales. Se hace imprescindible el conocer a ciencia cierta la cantidad de contaminantes que puede soportar un río.

El estudio permanente de los ríos y sus contaminantes, por medio de la determinación de los niveles de la demanda bioquímica de oxígeno y la demanda química de oxígeno que necesita un río para satisfacer su autodepuración, definitivamente podría contribuir a controlar y disminuir la contaminación.

Esto se podría lograr, y es el motivo del presente trabajo, al contar con un modelo que muestre los niveles de autodepuración que cada vertiente es capaz de hacer naturalmente. Esto a su vez proporcionaría la información necesaria para medir la dispersión de los contaminantes que se le están introduciendo al agua del río objeto de estudio y contribuir a que los procesos de auto-regeneración puedan ser una realidad en la cuenca estudiada.

Los estudios que nos indiquen los niveles de la DBO y la DQO nos darían una idea de las medidas correctivas que se deben tomar para evitar que exista un daño permanente en la cuenca del río en estudio. Como este daño incide en la calidad de vida tanto de la flora y fauna como de los habitantes que residen alrededor de dicha vertiente.

Como se sabe las fuerzas naturales de autodepuración, físicas, químicas y biológicas, son múltiples y variables, y se encuentran relacionadas entre sí y resultan ser mutuamente dependientes.

Entonces, cuando se vierte una carga importante de materia orgánica biodegradable en una corriente limpia, la luz solar no puede llegar a las profundidades y mueren las plantas verdes y algas, que mediante la fotosíntesis proporcionan oxígeno que se disuelve en el agua formando con la mezcla del agua y el aire el oxígeno disuelto (OD). Los organismos que se alimentan de los nutrientes aumentan su actividad y esta se refleja en la magnitud de la demanda bioquímica de oxígeno. Se utiliza para satisfacer esa demanda bioquímica de oxígeno (DBO), el OD existente en el agua. Debemos tener en cuenta que en las descargas pueden existir sustancias inorgánicas que se oxidan, produciendo una demanda química de oxígeno (DQO), que también se satisface del OD existente.

Con el transcurso del tiempo los microorganismos van consumiendo los nutrientes y el agua se aclara con lo que aparecen las plantas verdes y algas de nuevo, reiniciando la incorporación del oxígeno en el agua, es decir, aumenta el OD y disminuye el requerimiento de la DBO.

El problema real, estriba en que no se puede determinar con certeza la longitud del río en la que se dispersarán los contaminantes y se logrará la

autodepuración del río. Por lo que el uso del simulador podrá ser una herramienta para estimar empíricamente esas distancias, que servirán para la toma de decisiones en materia de gestión ambiental.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Contaminación ambiental

Se considera que la contaminación ambiental es la que produce alteraciones al medio ambiente, dañándolo de manera leve, grave o destruyéndolo por completo. También se debe tener en cuenta el factor tiempo, ya que el daño puede ser temporal o continuo. Se tendrá entonces todas las combinaciones posibles, desde un daño leve y temporal, hasta la destrucción continuada en el tiempo, misma que impide la natural recuperación del medio ambiente.

El medio ambiente tiene una capacidad de autodepuración o biodegradación de los contaminantes que se vuelcan en él. Esta capacidad de autodepuración es diversa y característica de cada tipo y condición del medio ambiente. No es lo mismo la capacidad de autodepuración de un arroyo que la de un río, ni tampoco puede considerarse similar a la de un lago o laguna ya que sus mecánicas biológicas son distintas.

La capacidad de carga, es la cantidad de contaminante que puede ser volcado al medio por unidad de tiempo y que dicho medio puede aceptar sin sufrir cambios apreciables en el transcurrir del tiempo. Determinar cuál es la capacidad de carga para un contaminante es bastante difícil por la cantidad de ensayos que deben realizarse. Debido a esto, se toman los contaminantes considerados peligrosos y se determina la capacidad de carga del medio ambiente.

2.2. Contaminación en agua superficial

Las aguas superficiales, son las comprendidas por los arroyos, ríos, lagos, lagunas, mares y océanos. Estas son las aguas que más uso tienen por parte de los hombres y animales, por lo que son las más fáciles de contaminar. Estas aguas se contaminan fundamentalmente por las acciones antrópicas, ya sean industriales, agrícolas, ganaderas o residenciales.

Los volcados de efluentes de las industrias y los desagües cloacales a las aguas superficiales, pueden derivar en que las mismas sean contaminadas de tal manera que las vuelvan inapropiadas para ser reutilizadas y en algunos casos totalmente nocivas.

También a esta contaminación contribuye la actividad agrícola, ya que el uso de fertilizantes industriales y agroquímicos o pesticidas, que se depositan en el suelo, estos pueden ser arrastrados por la lluvia a las aguas superficiales.

Además, hay que tener en cuenta que no solo por las actividades del hombre se contaminan las aguas superficiales, sino también aportan las lluvias los componentes inorgánicos que componen los suelos, por lo que las características de las aguas, varía de acuerdo a la composición de los suelos que la rodean, están presentes entonces: calcio, magnesio, sulfatos, nitratos, sodio y potasio como los elementos más comunes.

2.3. Contaminación en aguas receptoras

El agua se contamina cuando se descargan residuos que perjudican el equilibrio ecológico natural. Los contaminantes pueden ser organismos

patógenos, materia orgánica, sustancias inorgánicas, disueltas o en partículas sólidas, nutrientes, sustancias tóxicas, color, calor y materiales radiactivos.

- Patógenos surgen cuando se descargan los desagües cloacales domiciliarios.
- Materia orgánica (DBO) cuando mayor es la DBO (demanda bioquímica de oxígeno) mayor es la cantidad de materia orgánica que puede ser biodegradada por las bacterias, que necesitan oxígeno para realizar ese trabajo. Esta situación hace descender el OD (oxígeno disuelto) del agua y puede llevarlo a valores tan críticos que provoque la mortandad de peces. Si el OD baja, se pueden producir olores por la actividad bacteriológica anaeróbica.
- Sólidos las partículas de materia orgánica e inorgánica pueden ser sólidos sedimentables, flotantes y en suspensión capaz de formar depósitos de variadas características, pero generalmente con olor y color desagradable, mientras que el particulado en suspensión reduce la penetración de la luz solar en el agua, afectando procesos biológicos que dependen de ella.
- Nutrientes los nitratos y fosfatos que proceden de aguas cloacales son nutrientes inorgánicos que favorecen el crecimiento de plantas y algas. Además de su efecto antiestético por su color y aspecto, las algas pueden ser tóxicas, perjudicar el sabor del agua, obstruir los filtros y aumentar las necesidades químicas en el tratamiento del agua.
- Sustancias tóxicas y peligrosas pequeñas concentraciones de ácidos, cianuros, arsénicos, metales pesados y numerosas sustancias químicas son tóxicas para los organismos incluyendo a los humanos, y por supuesto

a la población bacteriana que se utiliza en el tratamiento de líquidos residuales. Los materiales radiactivos son dañinos para la vida biológica y son bioacumulativos, pero como estos materiales son empleados con muchas normas de seguridad, es muy raro encontrarlos en el agua.

- Otros contaminantes el color y el calor son algunos ejemplos de otros contaminantes que causan problemas. El color (tinturas que se usan en la industria textil) no solo es objetable por razones estéticas, sino que limita la penetración de la luz solar. Las descargas térmicas, (calor) causan un mayor requerimiento de oxígeno por el aumento de la masa biológica que se ve favorecida en su crecimiento por una mayor temperatura del agua.

2.4. Descargas de desagües cloacales y residuales

Alrededor de las descargas de desagües cloacales y los residuales industriales, se forman cuatro zonas de contaminación o influencia del desagüe, cuyas formas geométricas varían según sean las características de las aguas receptoras. Por ejemplo, si fuera un lago en donde no existen prácticamente corrientes de agua, las zonas concéntricas, con centro en el desagüe, mientras si la descarga se realiza en un curso de agua, la forma geométrica toma el sentido de la corriente de agua con forma parecida a un cono con su vértice en el desagüe, y la velocidad de dispersión depende de la velocidad del caudal del curso receptor.

- Zona de degradación: esta zona se encuentra normalmente alrededor del punto de descarga. En esta zona, las cualidades físicas y químicas del agua son deterioradas rápidamente, y las formas de vida microbianas reemplazan a las otras formas de vida más complejas. El límite de esta zona corresponde aproximadamente cuando la cantidad de oxígeno

disuelto cae hasta llegar al 45 % con respecto a la saturación. En esta zona de degradación aumenta la flora bacteriana, se producen depósitos de lodo de alto contenido de materia orgánica, decrece muy rápidamente el oxígeno disuelto y se incrementa el anhídrido carbónico. En cuanto a la descomposición, los hongos acuáticos reemplazan a las plantas verdes y microorganismos superiores.

- Zona de activa descomposición: esta zona se caracteriza por la ausencia de oxígeno disuelto y condiciones sépticas, marcado color gris oscuro, con olor característico a descomposición, depósito de lodo viscoso de color negro y desprendimiento de burbuja de gas. Al establecerse la descomposición anaeróbica, se incrementa el anhídrido carbónico, el amoníaco y las bacterias anaeróbicas reemplazan a las aeróbicas, descomposición que permanecen hasta que la DBO es menor que la tasa de aeración.
- Zona de recuperación: en esta zona, las características son opuestas a la zona de degradación. Hay una gradual clarificación del agua, el oxígeno disuelto se incrementa hasta el punto de saturación, disminuye el anhídrido carbónico mientras que los nitritos y nitratos aumentan. No hay burbujas. El recuento bacteriano disminuye a medida que baja el alimento del agua y se desarrollan los protozoarios rotíferos y crustáceos.
- Zona de aguas claras: esta zona se caracteriza por una similitud con las aguas naturales. Es atractiva en apariencia y tiene vida animal y vegetal, hay bacterias aeróbicas junto con otros microorganismos y comienzan a estar presentes los peces. En general las aguas de los desagües cloacales también llamadas aguas negras, son una mezcla muy compleja que contiene una gran cantidad de agua, en general un 99 %, mezclada

con los contaminantes orgánicos e inorgánicos, tanto en suspensión como disueltos.

Las aguas residuales provenientes de las industrias, varían de acuerdo al tipo de las mismas y en general tienen residuos de los procesos que estos realizan, como así también las aguas de los procesos de enfriamiento y calentamiento en el caso que existan. Las más preocupantes son las que provienen con residuos de los procesos, ya que suelen no ser muy abundantes de agua y por ello con una alta concentración de contaminantes y nutrientes.

Este contraste con las aguas cloacales domiciliarias, implica que deba hacerse variados estudios para realizar los procesos de tratamiento de las mismas. Pero hay una manera de compararlas con las aguas domiciliarias y es el llamado equivalente de población en base por ejemplo a la DBO. Es decir, se compara el DBO de las aguas domiciliarias con la DBO del efluente industrial y eso proporciona el equivalente de población que debería vivir en una ciudad para producir la misma contaminación que la industria compara.

Los desagües de la precipitación lluvias, fusión de nieve, lavado de calles y veredas, está mucho menos contaminada que las dos anteriores, salvo casos muy excepcionales. Hay que tener en cuenta que tienen un gran volumen y poca contaminación, por lo que contribuyen a diluir los mismos y al volcarse en algunos casos junto con los desagües domiciliarios, lo diluyen de similar forma. Esto es válido cuando se volca directamente a un curso de agua, pero si los desagües son tratados en plantas específicas, este gran volumen causa enormes perturbaciones en la eficiencia de la misma, llegando a la imposibilidad de tratar los

desagües cloacales, por lo que si existen planta de tratamiento, no pueden desaguarse en conjunto los pluviales y cloacales.

2.5. Calidad del agua

El criterio de calidad de agua es una determinada concentración de un parámetro que, si se logra, se espera que se pueda dar al agua un beneficio.

2.5.1. Criterios de calidad del agua

La calidad del agua, como cuantificación científica del estado ambiental de un cuerpo de agua sometido a diferentes impactos o condiciones ambientales, es una herramienta muy importante, ya que constituye una estrategia fundamental en el diseño e implementación de soluciones en el manejo de los recursos hídricos. Relacionados estrechamente con tal concepto están la capacidad de asimilación y autodepuración del cuerpo receptor, variables afectadas directamente por factores que inciden de manera determinante en la calidad del agua, tales como el uso del suelo, la producción industrial, el tratamiento aplicado a los efluentes vertidos, y a la cantidad de agua que corre por el cauce.

Los parámetros que determinan la calidad del agua se clasifican en físicos y químicos.

2.5.1.1. Parámetros físicos

- Temperatura

Es una medida relativa de la cantidad de calor contenida en el agua. Esta propiedad termodinámica influye notablemente en las características físicas, químicas y biológicas de los cuerpos de agua. Afecta a la flora y faunas acuáticas, la velocidad de reacción bioquímica, y la transferencia de gases. Así, por ejemplo, al incrementarse la temperatura, la velocidad de biodegradación de los compuestos orgánicos, también se incrementa, pero la solubilidad del oxígeno en el agua disminuye. Por esto es importante su determinación en cualquier intento por evaluar la calidad de las aguas.¹

- Sólidos suspendidos

“Se define a los sólidos como los residuos que quedan una vez que la parte líquida se ha evaporado y el remanente se ha secado a peso constante a 103 °C”². Además, se distingue entre sólidos disueltos y sólidos en suspensión, luego de evaporación de muestras filtradas de agua a 180 °C, siendo las sustancias no disueltas las que se conocen como sólidos suspendidos.

Luego, “la cantidad de materia orgánica es determinada, a través de la calcinación la muestra a 550 °C ± 50 °C en una mufla, para obtener por volatilización los sólidos volátiles, y como residuo a los sólidos fijos.”³

De todos ellos, los sólidos suspendidos (SS) son los más importantes en relación con las aguas superficiales, puesto que altos niveles de ellos producen en el cuerpo de agua receptor, efectos tales como: turbidez, bloqueo del paso para la radiación solar necesaria para la vegetación acuática, y obstrucción de las branquias de los peces. “Además, su sedimentación puede acumular

¹ RAMOS, Rubén y VILLALLOBOS, Francisco. *El agua en el medio ambiente: muestreo y análisis*. p. 20.

² HENRY, G., y HEINKE, G.W. *Ingeniería ambiental*. p. 423.

³ ROMERO; R. *Calidad del agua*. p. 400.

materia orgánica en depósitos de lodos que ejercen una demanda de oxígeno en el cuerpo de agua receptor.”⁴

- Conductividad eléctrica

La conductividad del agua es una expresión numérica de su habilidad para transportar una corriente eléctrica, que depende de la concentración total de sustancias disueltas ionizadas en el agua y de la temperatura a la que se haga la determinación. Por tanto, cualquier cambio en la cantidad de sustancias disueltas, implica un cambio en la conductividad. Por esta razón, el valor de la conductividad se usa mucho en análisis de aguas para obtener un estimativo rápido del contenido de sólidos disueltos.

La conductividad eléctrica del agua suele expresarse en $\mu\text{mho/cm}$ o en $\mu\text{S/cm}$, teniendo en cuenta que $1 \text{ mho} = 1 \text{ siemens}$, y empíricamente se ha determinado que el valor de “la conductividad en $\mu\text{mho/cm}$ multiplicado por un factor que oscila entre 0,55 y 0,7, dependiendo de los iones en solución en el agua y la temperatura, da como resultados el contenido de sólidos disueltos, en $\text{mg/}.$ ”⁵

- Turbidez

Acercas de la turbidez, el término “turbio se aplica a las aguas que contienen materia en suspensión que interfiere con el paso de la luz a través del agua, y que la turbidez o turbiedad puede ser causada por una gran variedad de materiales en suspensión.”⁶

⁴ CHIN, David. *Water-Quality Engineering in Natural Systems*. p.200

⁵ RAMOS, Rubén y VILLALLOBOS, Francisco. *El agua en el medio ambiente: muestreo y análisis*. p. 114.

⁶ ROMERO; R. *Calidad del agua*. p. 400.

2.5.1.2. Parámetros químicos

- Oxígeno disuelto

En condiciones ambientales normales, las aguas superficiales tienen concentraciones de oxígeno disuelto (OD) muy cercanas a la saturación, por lo que hay un equilibrio del ecosistema acuático con la vida que alberga, de modo que “el oxígeno es consumido por los organismos vivos, y producido por las plantas verdes acuáticas durante el día, incluyendo el proceso natural de reoxigenación.”⁷

Acerca de la solubilidad del oxígeno en el agua dulce a 1 atmósfera de presión, Sawyer, Mc.Carty y Parkin (2001) indican que varía desde 14,6 mg/l a 0 °C, hasta aproximadamente 7 mg/l a 35 °C. En la práctica de la ingeniería ambiental, las condiciones críticas relacionadas con deficiencia del “oxígeno disuelto ocurren con mayor frecuencia en los meses de verano, cuando la temperatura es alta la solubilidad del oxígeno es mínima.”⁸

Además, añaden que, en condiciones críticas, el nivel máximo de oxígeno disuelto es aproximadamente 8 mg/l. Sin embargo, una ecuación más compacta, expresada en función de la temperatura en grados Celsius, T , que a veces se usa es

$$OD_{sat} = \frac{468}{31.5 + T} \quad (\text{Ecu. 1, Ref. 1})$$

El oxígeno disuelto es en el movimiento de las aguas en su discurrir reoxigena las aguas de modo que la carga contaminante vertida disminuye por biooxidación, “tendiendo la concentración de oxígeno disuelto a recuperar la

⁷ GIL, Manuel. *Depuración de aguas residuales: modelización de procesos de lodos activos*. p. 400

⁸ , *Op.cit.* p 423.

saturación, a la vez que se degrada la materia microbiana, denominándose a este proceso autodepuración.”⁹ A continuación, en la tabla 1 la concentración de oxígeno disuelto, según su temperatura (°C) calculada con la ecuación 1.

Tabla I. **Datos calculados de OD (mg/l) con la fórmula 1**

| Temperatura (°C) | OD(mg/l) | Temperatura (°C) | OD(mg/l) |
|------------------|----------|------------------|----------|
| 0 | 14.6 | 16 | 9.9 |
| 1 | 14.2 | 17 | 9.7 |
| 2 | 13.8 | 18 | 9.6 |
| 3 | 13.5 | 19 | 9.3 |
| 4 | 13.1 | 20 | 9.1 |
| 5 | 12.8 | 21 | 8.9 |
| 6 | 12.5 | 22 | 8.7 |
| 7 | 12.1 | 23 | 8.6 |
| 8 | 11.8 | 24 | 8.4 |
| 9 | 11.6 | 25 | 8.3 |
| 10 | 11.3 | 26 | 8.1 |

Fuente: elaboración propia, empleando ecuación 1.

- **Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)**

La mayoría de los métodos para determinar la materia orgánica en aguas se basan en la cantidad de oxígeno que se necesita para convertir el material oxidable en productos finales estables. Así, al ser el oxígeno consumido por los microorganismos, proporcional a la materia degradable aeróbicamente, la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), ciertamente se constituye en el parámetro más importante en el control de la contaminación orgánica del agua. “LA DBO se define como la cantidad de oxígeno que requieren las bacterias durante la estabilización de la materia.”¹⁰

⁹ GIL, Manuel. *Depuración de aguas residuales: modelización de procesos de lodos activos*. pp. 51-52.

¹⁰ HENRY, G., y HEINKE, G.W. *Ingeniería ambiental*. p. 150.

- Ph

Sobre el concepto del pH, es: la fuerza de un ácido o base se puede indicar por su concentración molar de iones hidrógeno. Sin embargo, se ha establecido la convención de expresar la concentración de ión hidrógeno en términos de su logaritmo negativo, que se conoce como el pH de la solución. Una solución acuosa neutra (es decir ni ácida ni básica) tiene por definición concentraciones iguales de iones H_3O^+ y OH^- , y a 25 °C su $pH = pOH = 7$. “Las soluciones acuosas con un pH menor de 7 se describen como ácidas, y aquellas con un pH mayor de 7 se conocen como básicas o alcalinas.”¹¹

$$pH = -\log [H_3O^+] \text{ (Ecu. 2, Ref. 1)}$$

- Nitrógeno

La oxidación de las distintas formas del nitrógeno puede consumir grandes cantidades de oxígeno. En los cuerpos agua existe una gran variedad de compuestos del nitrógeno, que incluyen: (1) el nitrógeno orgánico (proteínas, aminoácidos y urea); (2) el nitrógeno amoniacal, NH_4^+ y NH_3 ; (3) el nitrito, NO_2^- ; el nitrato, NO_3^- ; y (4) “el gas nitrógeno disuelto, N_2 ; siendo el nitrógeno total Kjeldahl (NTK), la suma del nitrógeno orgánico con el nitrógeno amoniacal”¹². Con respecto a los cambios en las formas del nitrógeno en el agua: la mayor parte del nitrógeno inicialmente está presente en forma de nitrógeno orgánico (proteína) y amoniaco. A medida que el tiempo pasa, el nitrógeno orgánico se convierte gradualmente a nitrógeno amoniacal, y más tarde, si existen condiciones aeróbicas, ocurre la oxidación del amoniaco a nitritos y nitratos.

¹¹ HENRY, G., y HEINKE, G.W. *Ingeniería ambiental*. p. 150.

¹² CHIN, David. *Water-Quality Engineering in Natural Systems*. p. 16.

Por lo que se concluye lo siguiente, sobre el cambio de las formas del nitrógeno y su relación con la contaminación del agua: se considera que un agua de polución reciente, y por consiguiente de gran peligro potencial, contiene la mayoría del nitrógeno como nitrógeno orgánico y amoniacal. “Así mismo, aguas en que la mayor parte del nitrógeno está en la forma de nitratos son consideradas de polución ocurrida un largo tiempo antes del momento de efectuarse el análisis.”¹³.

- Metales pesados

Los metales pesados más importantes que suelen encontrarse en cuerpos de agua contaminados son el arsénico (Ar), el cadmio (Cd), el cobre (Cu), el cromo (Cr), el plomo (Pb), el mercurio (Hg), el níquel (Ni), y el zinc (Zn), los cuales tienden a acumularse en los sedimentos del fondo y, dependiendo del pH, la temperatura y la salinidad, “pueden ser más o menos solubles, de modo que a niveles tóxicos pueden afectar adversamente la salud humana.”¹⁴

2.6. Modelación matemática

Un modelo matemático es uno de los tipos de modelos científicos que a través de proposiciones sustantivas de hechos, variables, parámetros, entidades y relaciones entre las mismas describen, “explican y predicen el comportamiento de un fenómeno natural o componentes del mismo en un entorno social.”¹⁵

¹³ ROMERO; R. *Calidad del agua*. p. 138.

¹⁴ *Op. cit.* p. 20.

¹⁵ FRAUME Néstor. *Diccionario ambiental*. p 25.

Un modelo matemático de calidad de agua es una herramienta matemática que representa o simula los procesos que ocurren dentro de un cuerpo de agua. Generalmente, considera tres factores: transporte hidrodinámico, ingresos externos y las reacciones químicas y biológicas que ocurren dentro del sistema. Incorporan aspectos tales como el mezclado, las fuentes puntuales y no puntuales, la fotosíntesis, “la temperatura del agua, la dinámica del oxígeno disuelto, el comportamiento de varios nutrientes, los efectos de las cargas atmosféricas y la demanda de oxígeno por los sedimentos.”¹⁶

2.6.1. Tipos de modelos

“Una simulación de eventos es un conjunto de relaciones lógicas y matemáticas que integran el comportamiento de un sistema bajo estudio cuando se pretenda un evento determinado.”¹⁷

Según García, Dunna para realizar un estudio de simulación se debe de seguir la siguiente secuencia, es de resaltar que en la mayoría de situaciones será necesario agregar o suprimir algunos de los pasos aquí enumerados:

- Definición del sistema bajo estudio

Esta etapa es necesario conocer el sistema a modelar. Para ello se requiere saber qué origina el estudio de simulación y establecer los supuestos del modelo: es conveniente definir con claridad las variables de decisión del modelo: determinar las interacciones entre estas, y establecer con precisión los alcances y limitaciones que aquel podría llegar a tener.

¹⁶ FRAUME Néstor. *Hydrodynamics and water quality: modeling rivers, lakes, and estuaries*. p. 385.

¹⁷ GARCÍA, Dunna. *Simulación y análisis de sistemas con ProModel*. p.4

Antes de concluir este paso es recomendable contar con la información suficiente para lograr establecer un modelo conceptual o un mapa mental del sistema bajo estudio, el cual debe incluir sus fronteras y todos los elementos que lo componen, además de las interacciones entre ellos, los flujos de productos, las personas y los recursos, así como las variables de mayor interés para el problema.

- Generación de modelos de simulación base

Una vez definido el sistema en términos de un modelo conceptual, la siguiente etapa del estudio consiste en la generación de un modelo de simulación base. No es preciso que este modelo sea demasiado detallado, pues se requiere mucha más información estadística sobre el comportamiento de las variables de decisión del sistema. La generación de este modelo es el primer reto para el programador de la simulación, ya que debe traducir a un lenguaje de simulación la información que se obtuvo en la etapa de definición del sistema, e incluir las interrelaciones de todos los posibles subsistemas que existan en el problema a modelar. En caso de que se requiera una animación, este también es un buen momento para definir qué gráfico puede representar mejor el sistema que se modela.

- Recolección y análisis de datos.

Es posible comenzar la recopilación de la información estadística de las variables del modelo de manera paralela a la generación del modelo base. En esta etapa se debe establecer qué información es útil para la determinación de la simulación del modelo. De no contar con la información requerida o en caso de desconfiar de la disponible, será necesario realizar un estudio estadístico del comportamiento de la variable que sea identificar, para luego incluirla en el

modelo. Al finalizar la recolección y análisis de datos para todas variables del modelo, se tendrán las condiciones para generar una versión preliminar del problema que se está simulando.

- Generación del modelo preliminar.

En esta etapa se integra la información obtenida a partir del análisis de los datos, los supuestos del modelo y todos los datos necesarios para crear un modelo lo más cercano posible a la realidad del problema bajo estudio. En algunos casos sobre todo cuando se trata del diseño de un nuevo proceso esquema de trabajo no se cuenta con información estadística, por lo que debe estimarse un rango de variación o determinar (con ayuda del cliente) valores constantes que permitan realizar el modelado. Si éste es el caso, el encargado de la simulación puede, con base en su experiencia, realizar algunas sugerencias de distribuciones de probabilidad que comúnmente se asocian al tipo de proceso que se desea incluir en el modelo. Al finalizar esta etapa el modelo está listo para su primera prueba: su verificación o, en otras palabras, la comparación con la realidad.

- Verificación del modelo

Una vez que se han identificado las variables del modelo y se han implantado los supuestos acordados, es necesario realizar un proceso de verificación de datos para comprobar la propiedad de la programación del modelo, y comprobar que todos los parámetros usados en la simulación funcionen correctamente. Ciertos problemas, en especial aquellos que requieren muchas operaciones de programación o que involucran distribuciones de probabilidad difíciles de programar, pueden ocasionar que el comportamiento del sistema sea muy diferente del que se esperaba. Por otro

lado, no se debe descartar la posibilidad de que ocurran errores humanos al alimentar el modelo con la información. Incluso podría darse el caso de que los supuestos iniciales hayan cambiado una o varias veces durante el desarrollo del modelo. Por lo tanto, debemos asegurarnos de que el modelo que se va a ejecutar esté basado en los más actuales.

Una vez que se ha completado la verificación, el modelo está listo para su comparación con la realidad del problema que se está modelando. A esta etapa se le conoce también como validación del modelo.

- Validación del modelo.

El proceso de validación del modelo consiste en realizar una serie de pruebas al mismo, utilizando información de entrada real para observar su comportamiento analizar sus resultados. Si el problema bajo simulación involucra un proceso que se desea mejorar, el modelo debe someterse a prueba con las condiciones actuales de operación, lo que nos dará como resultado un comportamiento similar al que se presenta realmente en nuestro proceso. Por otro lado, si se diseñan nuevos procesos la validación resulta más complicada. Una manera de validar el modelo en este caso, consiste en introducir algunos escenarios sugeridos por el cliente y validar que el comportamiento sea congruente con las expectativas que se tienen de acuerdo con la experiencia. Cualquiera que sea las situaciones importantes que el analista conozca bien el modelo, de manera que pueda justificar aquellos comportamientos que sean contrarios a las experiencias de los especialistas en el proceso que participan de su validación.

- Generación del modelo final.

Una vez que el modelo se ha validado, el analista está listo para realizar la simulación y estudiar el comportamiento del proceso. En caso de que se desee comparar escenarios diferentes para un mismo problema, éste será el *modelo raíz*; en tal situación, el siguiente paso es la definición de los escenarios a analizar.

- Determinación de los escenarios para el análisis

Tras validar el modelo es necesario acordar con el cliente los escenarios que se quiere analizar. Una manera muy sencilla de determinarlos consiste en utilizar un escenario pesimista, uno optimista y uno intermedio para la variable de respuesta más importante. Sin embargo, es preciso tomar en cuenta que no todas las variables se comportan, igual ante los cambios en los distintos escenarios, por lo que tal vez sea necesario que más de una variable de respuesta se analice bajo las perspectivas pesimista, optimista e intermedia.

El riesgo de esta situación radica en que el analista podría caer en un diseño de experimentos capaz de generar una gran cantidad de réplicas, lo que redundaría en un incremento considerable de costo, análisis y tiempo de simulación. Es por ello que muchos paquetes de simulación cuentan con herramientas para realizar este proceso, eliminando la animación y acortando los tiempos de simulación. Estas herramientas permiten realizar varias réplicas del mismo escenario para obtener resultados con estadísticas importantes respecto de la toma de decisiones (por ejemplo, los intervalos de confianza).

Por su parte, el analista también puede contribuir a la selección de escenarios, sugiriendo aquellos que considere más importantes; al hacerlo dará pie a que se reduzca el número de combinaciones posibles.

- Análisis de sensibilidad.

Una vez que se obtienen los resultados de los escenarios es importante realizar pruebas estadísticas que permitan comparar los escenarios con los mejores resultados finales. Si dos de ellos tienen resultados similares será necesario comparar sus intervalos de confianza respecto de la variable de respuesta final. Si no hay intersección de intervalos podremos decir con certeza estadística que los resultados no son iguales; sin embargo, si los intervalos se traslapan será imposible determinar, estadísticamente hablando, que una solución es mejor que otra. Si se desea obtener un escenario "ganador" en estos casos, será necesario realizar más réplicas de cada modelo y/o incrementar el tiempo de simulación de cada corrida. Con ello se busca acortar los intervalos de confianza de las soluciones finales y, por consiguiente, incrementar la probabilidad de diferenciar las soluciones.

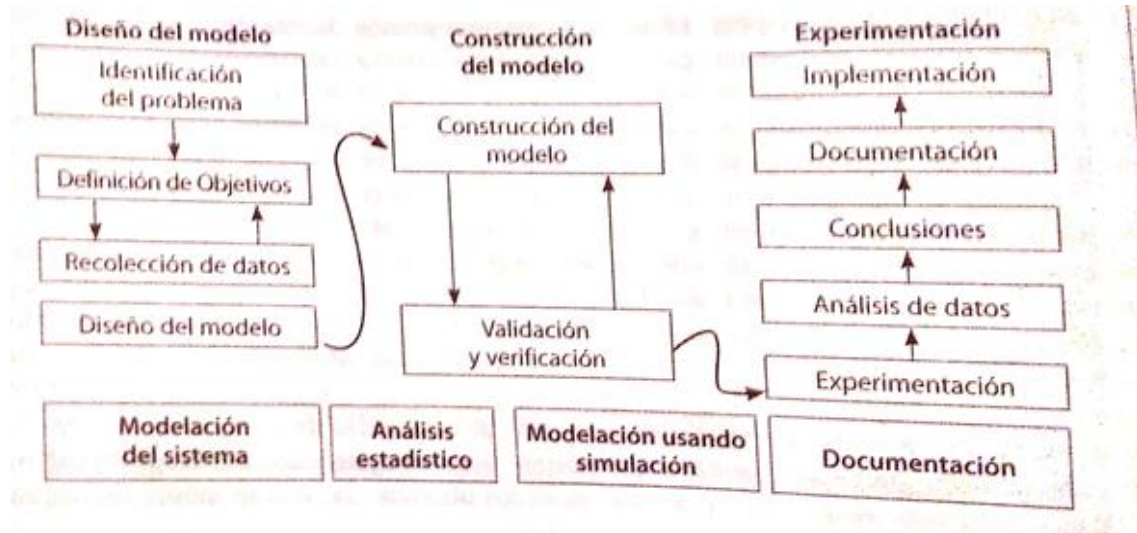
- Documentación del modelo, sugerencias y conclusiones.

Una vez realizado el análisis de los resultados, es necesario efectuar toda la documentación del modelo. Esta documentación es muy importante, pues permitirá el uso del modelo generado en caso de que se requieran ajustes futuros. En ella se deben incluir los supuestos del modelo, las distribuciones asociadas a sus variables, todos sus alcances y limitaciones y, en general, la totalidad de las consideraciones de programación. También es importante incluir sugerencias tanto del uso del modelo como sobre los resultados obtenidos, con el propósito de realizar un reporte más completo. Por último,

deberán presentarse asimismo las conclusiones del proyecto de simulación, a partir de las cuales es posible obtener los reportes ejecutivos para la presentación final.

Por lo que se puede decir que la realización de un modelo de simulación implica tres grandes fases. El diseño del modelo del problema a realizar, la construcción y la experimentación que se puede realizar con este. La figura 2 ilustra una manera alternativa de presentar este mismo proceso.

Figura 1. Representación del ciclo de un modelo de simulación



Fuente: GARCÍA, Eduardo. *Simulación y análisis de sistemas con PromModel*. p 16.

Los modelos matemáticos de calidad de agua podrían clasificarse como sigue:

- Soluciones analíticas este modelo se puede aplicar en corrientes o ríos cómo será el caso estudiado.
- Soluciones numéricas, segmentos finitos: este modelo se puede aplicar en estuarios, lagos y océanos.

2.6.1.1. Modelo de Streeter-Phelps (Curva SAG)

Esta modelación matemática es reconocida a nivel mundial por su valor en la planificación de estrategias de saneamiento de ríos. En este contexto, el modelo de Streeter-Phelps permite describir la calidad del agua en términos del oxígeno disuelto (OD) y “la demanda bioquímica de oxígeno en función de las características hidrodinámicas y de los procesos químicos y biológicos que

tienen lugar en el río como resultado de la incorporación de fuentes puntuales o dispersas.”¹⁸

“La demostración del modelo Streeter-Phelps se ha tomado con adaptaciones del tratamiento matemático a partir de la ecuación de advección-difusión unidimensional.”¹⁹ De una ecuación diferencial por medio del cálculo diferencial (ver anexo 1), se llega a la ecuación 3:

$$D = \frac{K_1 L_0}{K_2 - K_1} \left(e^{-\frac{K_1 x}{U}} - e^{-\frac{K_2 x}{U}} \right) + D_0 e^{-\frac{K_2 x}{U}} \quad (\text{Ecu. 3, Ref. 1})$$

En donde:

- D = Déficit de oxígeno en el agua (g de O₂/m³)
- D₀ = Déficit inicial de oxígeno, después de la descarga de aguas residuales
- K₂ = Coeficiente de reaireación (t, usualmente en días)
- K₁ = Coeficiente de desoxigenación (t, usualmente en días)
- x/U = Distancia sobre velocidad del río (tiempo de viaje)

En la ecuación las condiciones iniciales L = L₀ y D = D₀ en el t = 0 (x = 0), esto se puede calcular partiendo de la ecuación de dilución.

$$L_0 = \frac{L_s q_s - L_b q_b}{q_b - q_s} \quad (\text{Ecu. 4, Ref. 1})$$

En donde:

- L_b = Concentración de DBO en el río antes de la descarga
- L_s = Concentración de DBO de las aguas residuales

¹⁸ DOMINGUEZ, Jorge. *Calibración de modelos matemáticos de calidad de agua para valorar el impacto de estrategias de saneamiento del río "Almendares*. pp.98-105.

¹⁹ CHIN, David. *Water-Quality Engineering in Natural Systems*. p. 25.

- OD_o = Oxígeno disuelto aguas debajo de la descarga
- OD_b = Oxígeno disuelto en el río antes de la descarga
- OD_s = Oxígeno disuelto de las aguas descargadas
- q_b = Caudal del río antes de la descarga (m^3/s)
- q_s = Caudal descargado de aguas residuales

El máximo valor del déficit de oxígeno disuelto dc , es alcanzado cuando el consumo de la DBO, iguala a las contribuciones a causa de la reaireación superficial, el cual se encuentra a una determinada distancia X_c y tiempo T_c del lugar del vertido. Aguas abajo, de este punto el flujo neto de oxígeno entre la atmósfera y el agua es superior al consumo, lo que implica una reducción del déficit de oxígeno disuelto a partir de éste punto X_c . La ecuación de punto crítico se obtiene al igualar a cero la primera deriva de la ecuación 3, (ver el procedimiento del cálculo diferencial en el anexo 2) por lo que se obtiene:

$$x_c = \frac{U}{K_2 - K_1} \ln \left[\frac{K_2}{K_1} \left(1 - \frac{D_o(K_2 - K_1)}{K_1 L_o} \right) \right] \text{ (Ecu. 5, Ref. 1)}$$

Y el tiempo crítico:

$$t_c = \frac{1}{K_2 - K_1} \ln \left[\frac{K_2}{K_1} \left(1 - \frac{D_o(K_2 - K_1)}{K_1 L_o} \right) \right] \text{ (Ecu. 6, Ref. 1)}$$

“Por último, se calcula el déficit de oxígeno disuelto con la siguiente ecuación”²⁰

$$OD \left(\frac{mg}{L} \right) = [OD_{Sat}] - [OD_{mezcla}] \text{ (Ecu. 7, Ref. 1)}$$

²⁰ GIL, Manuel. *Depuración de aguas residuales: modelización de procesos de lodos activos*. pp. 51-52.

Para determinar los valores de la constante cinética K_1 y K_2 , así como cualquier otro coeficiente cinético se utiliza la siguiente ecuación:

$$K_1 = t^{-1} \ln\left(\frac{L_u}{L_d}\right) \quad (\text{Ecu. 8, Ref. 1})$$

En donde:

- L_u = Concentración de DBO aguas arriba, punto u
- L_d = Concentración de DBO aguas abajo, punto d
- t = Tiempo de viaje entre los dos puntos de medición (días)

A continuación, en la tabla II se presenta una tabla de valores típicos de constante de desoxigenación según su la temperatura del cuerpo de agua a 20 °C.

Tabla II. **Valores típicos de la constante de desoxigenación**

| Tipo de agua | K_1 a 20°C (d^{-1}) |
|------------------------------|--|
| Aguas residuales no tratadas | 0.35-0.70 |
| Aguas residuales tratadas | 0.10-0.35 |
| Río contaminado | 0.10-0.25 |
| Río no contaminado | <0.05 |

Fuente: SANCHÉZ, David, *Calidad de agua en ríos*. p.26.

Para calcular K_2 se utiliza la ecuación experimental de Streeter-Phelps

$$K_2 = \frac{(D_L U)^{1/2}}{H^{3/2}} \quad (\text{Ecu.9 , Ref. 1})$$

En donde:

- U = velocidad de la corriente (m/s)
- H = profundidad media (m)

- D_L = Difusividad del oxígeno en el agua ($1,76 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{día}$).

A continuación, en la tabla III se presenta una tabla de valores típicos de constante de reaeración según su la temperatura del cuerpo de agua a 20 °C.

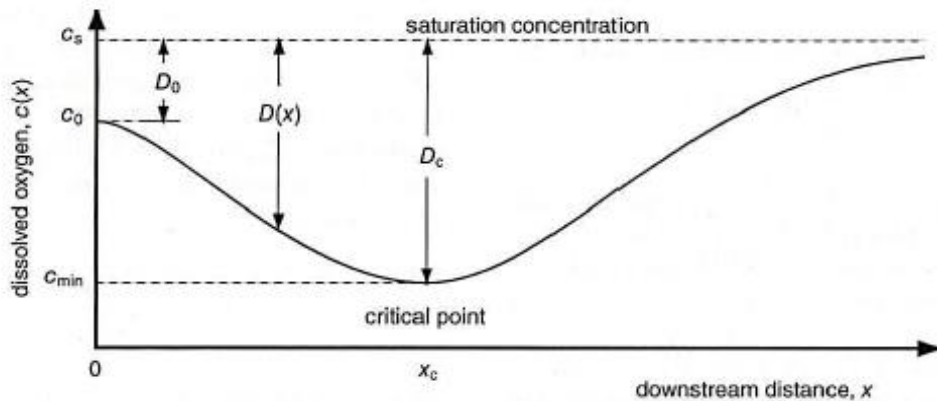
Tabla III. **Valores típicos de la constante de reaeración**

| Cuerpo de agua | K_2 a 20°C (d^{-1}) |
|--|---------------------------|
| Pequeñas lagunas | 0.1-0.23 |
| Ríos de aguas muy lentas y grandes lagos | 0.2-0.35 |
| Ríos de velocidad lenta | 0.35-0.46 |
| Ríos de velocidad media | 0.46-0.69 |
| Ríos rápidos | 0.69-1.15 |
| Rápidos | >1.15 |

Fuente: SANCHÉZ, David, *Calidad de agua en ríos*. p.27.

La gráfica de la ecuación 3 se conoce con el nombre de la curva SAG de oxígeno, representa el déficit de oxígeno disuelto (OD) en mg/L en función de la distancia en km desde la fuente (x). Ver figura

Figura 2. **Curva SAG de oxígeno disuelto**



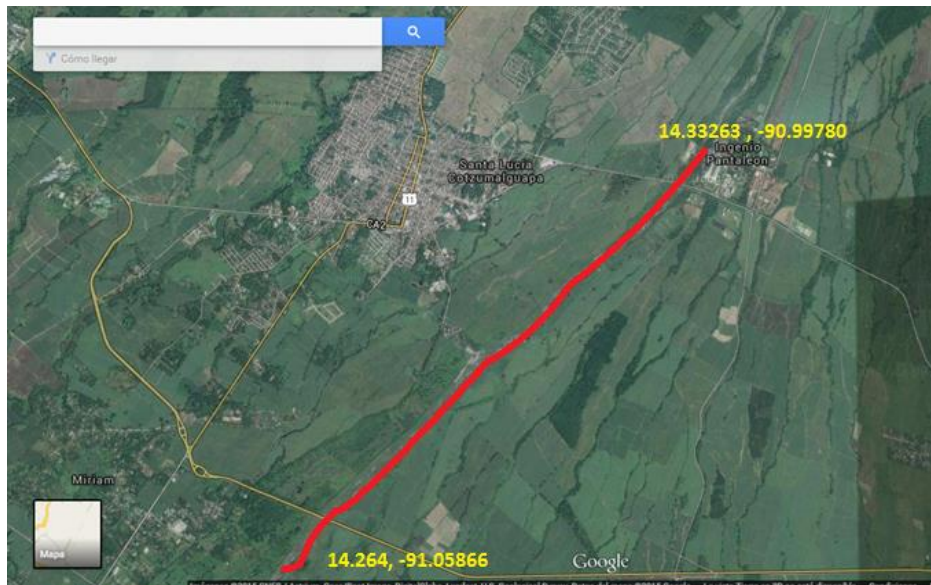
Fuente: CHIN, David. *Water-quality engineering in natural systems: fate and transport processes in the water environment*, p 99.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Localización

El presente estudio se limitará a la porción del río Pantaleón ubicada entre los puntos (14° 19' 57.453" N 90° 59' 52.092" W) y (14° 15' 50.386" N 91° 3' 31.181" W) que se visualizan en la figura 3.

Figura 3. Ubicación del área de estudio



Fuente: Google Maps. <https://goo.gl/maps/dq1TQVieB6j94teh6> Consulta: octubre 2019.

3.2. Variables

Propiedad, característica o atributo susceptible de asumir diferentes valores, es decir, pueden variar. A continuación, se detallan las variables independientes y dependientes usada en las tablas IV y V respectivamente.

Tabla IV. **Variables Independientes**

| Variable | Abreviatura | Dimensional | Descripción |
|------------------|-------------|-------------|---|
| Oxígeno Disuelto | OD | mg/L | Oxígeno presente en un cuerpo de agua, este se produce gracias a la fotosíntesis y se consume gracias a la respiración de los organismos, además de la descomposición de material orgánico y otras sustancias químicas. Por lo que en la medida en que disminuye el grado de contaminación aumenta. |

Fuente: elaboración propia.

Tabla V. **Variables dependientes**

| Variable | Abreviatura | Dimensional | Descripción |
|-----------|-------------|-------------|---|
| Distancia | D | Km | Es la longitud total de la trayectoria realizada por un objeto móvil entre dos puntos |

Fuente: elaboración propia

3.3. Recursos humanos disponibles

Investigador Br. Luis Miguel Morales Martinez

Asesor: Ingeniero Químico, Jorge Mario Estrada Asturias.

3.4. Recursos materiales disponibles

A continuación, en la tabla VI se presentan los materiales disponibles a utilizar para este estudio.

Tabla VI. Recursos materiales disponibles

| Tipo | Nombre |
|-------------|--|
| Equipo | Campana de extracción |
| | Balanza analítica |
| Cristalería | Botella yodo-métrica de 125 ml |
| | Cilindro graduado de 50 ml o pipeta volumétrica de 25 ml |
| | Matraz Erlenmeyer o fiola de 125 ml |
| | Pipeta graduada de 1 ml |
| | Bureta graduada de 25 ml |
| | Soporte universal con pinzas para Bureta |
| | Vidrio reloj |
| | Espátula |
| Reactivos | Reactivo alcalino de yoduro de potasio |
| | Solución de sulfato manganeso |
| | Solución de tiosulfato de sodio 0,01n |
| | Solución de almidón al 10 %. |
| | Agua de río |
| | Agua destilada |

Fuente: elaboración propia.

3.4.1. Software estadístico

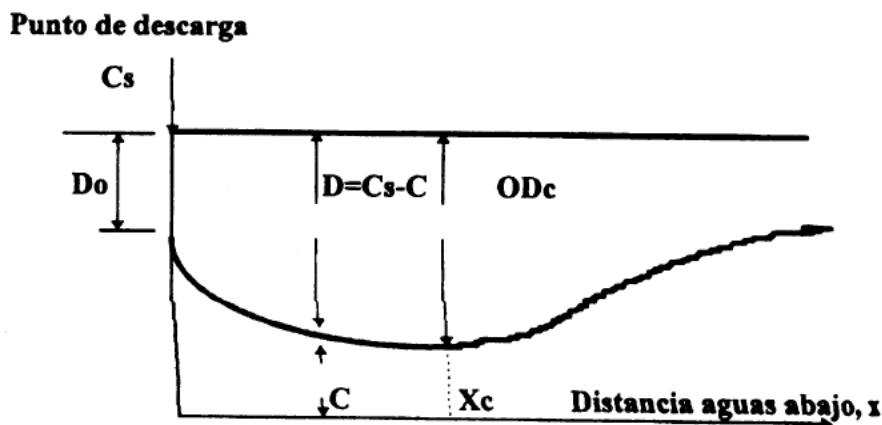
Para realizar la simulación de la calidad de agua en el río Pantaleón se utiliza el programa Microsoft Excel 2016, para realizar la regresión del modelo se emplea el programa Eviews 10 y para hacer el análisis de sensibilidad se

realiza un ANDEVA en Excel 2016 la herramienta datos (análisis de varianza de dos factores de una sola muestra por grupo).

3.5. Técnica cualitativa o cuantitativa

Se medirá el proceso de decaimiento de la DBO y la DQO, de primer orden, en función de la distancia (km). Esto se hará con la medición de distintos parámetros de calidad del agua, basándose en una curva de agotamiento del oxígeno. La reducción química de la DBO, da como resultado un descenso de la OD. En ese mismo instante, a causa de la reaireación superficial, el OD se recupera a una velocidad directamente proporcional al de oxígeno disuelto presente en ese instante.

Figura 4. Curva de agotamiento del oxígeno

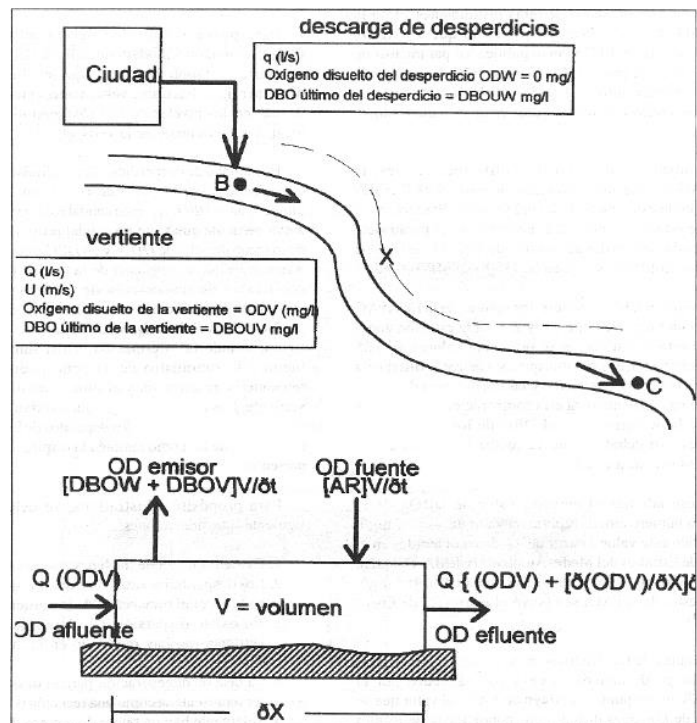


Fuente: elaboración propia

3.6. Recolección y ordenamiento de la Información

Como se tomó la consideración de flujo estable entonces el caudal de la vertiente y el caudal de los desperdicios son constantes, y eventualmente la concentración de OD también será constante. Esta ecuación se puede escribir en términos del déficit de oxígeno disuelto en una localidad dada. Por lo tanto, podemos tratar con la diferencia del OD bajo condiciones saturadas y el nivel de OD que realmente existe en una localidad. El resultado será la ecuación clásica de Streeter-Phelps para el déficit de oxígeno disuelto, descrita en el marco teórico (ver página 50).

Figura 5. Descripción gráfica del modelo elemental de la calidad del agua



Fuente: elaboración propia

3.6.1. Obtención de muestras

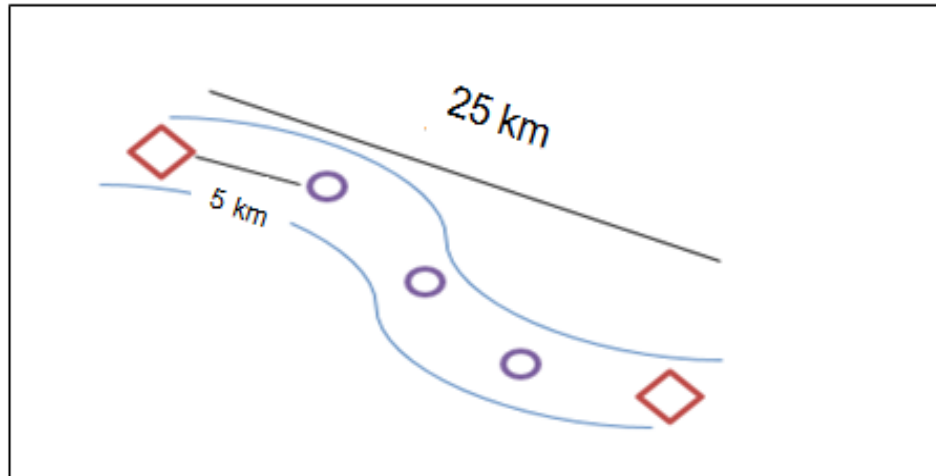
Para obtener datos representativos, se estimará el número óptimo de muestras con un nivel de confianza del 90 % y un nivel de significancia del 10 % (error) utilizando la siguiente fórmula:

$$n = \frac{\sigma Z_{\alpha/2}^2}{\epsilon} \quad (\text{Ecu. 10 , Ref. 1})$$

La frecuencia de muestreo indica el tiempo transcurrido entre dos tomas de muestra dentro de un mismo programa de muestreo. La frecuencia de muestreo está fuertemente condicionada por dos cuestiones, como son: la necesidad de conocer de la manera más completa posible los valores de los parámetros de un sistema hídrico y el abaratamiento del proceso de análisis y control de dicho sistema. Es por ello por lo que siempre habrá que encontrar el número óptimo de muestras que nos permita conocer la situación del sistema a un coste asequible.

Por lo anterior se tomarán 3 muestras en época de lluvia (julio, agosto y septiembre) y otras 3 muestras en época seca (noviembre y diciembre), siendo 5 puntos los que se estudiarán a lo largo de aproximadamente de 25 kms del río Pantaleón, y se obtendrá un total de 15 muestras.

Figura 6. Visualización de los puntos a muestrear



Fuente: elaboración propia.

Luego de recopilar los datos de DBO(mg/L) y DQO (mg/L) se llevan al laboratorio para así obtener el OD (mg/L) con su respectiva temperatura. A continuación, en la tabla VI se presentan tabulados los datos del apéndice 1, 2 y 3 es de resaltar que los datos faltantes 1-5 de temperatura (°C) se estimaron con la ecuación 1 (ver página 40).

Tabla VII. Datos experimentales

| Datos | Fuente | DBO (mg/L) | DQO (mg/L) | OD (mg/L) | T(°C) |
|----------|---------|------------|------------|-----------|---------|
| 1.0000 | punto 1 | 1.0000 | 3.0000 | 8.1400 | 25.9939 |
| 2.0000 | punto 2 | 1.0000 | 2.0000 | 9.2400 | 19.1494 |
| 3.0000 | punto 3 | 1.0000 | 1.0000 | 8.7000 | 22.2931 |
| 4.0000 | punto 4 | 1.0000 | 1.0000 | 7.9300 | 27.5164 |
| 5.0000 | punto 5 | 1.0000 | 1.0000 | 8.7000 | 22.2931 |
| 6.0000 | punto 1 | 1.0000 | 2.0000 | 7.9500 | 28.0000 |
| 7.0000 | punto 2 | 3.5000 | 9.0000 | 7.2500 | 29.4000 |
| 8.0000 | punto 3 | 7.0000 | 17.0000 | 7.5400 | 33.0000 |
| 9.0000 | punto 4 | 12.0000 | 38.0000 | 7.0800 | 36.0400 |
| 10.0000 | punto 5 | 7.6500 | 24.0000 | 7.7300 | 35.0800 |
| 11.0000 | punto 1 | 1.0000 | 2.0000 | 7.6000 | 25.9000 |
| 12.0000 | punto 2 | 0.8000 | 1.6000 | 7.8000 | 25.9000 |
| 13.0000 | punto 3 | 0.5000 | 1.6000 | 8.3700 | 25.8000 |
| 14.0000 | punto 4 | 0.9000 | 1.5000 | 9.9500 | 25.9000 |
| 15.0000 | punto 5 | 1.0000 | 2.0000 | 10.5000 | 26.4000 |
| promedio | | 2.6900 | 7.1133 | 8.2987 | 27.2444 |
| mínimo | | 0.5000 | 1.0000 | 7.0800 | 19.1494 |
| máximo | | 12.0000 | 38.0000 | 10.5000 | 36.0400 |

. Fuente: elaboración propia.

La media aritmética o promedio de un conjunto de valores $\{x_1, x_2, \dots, x_i\}$ de una variable x viene “determinada por la suma de dichos valores, dividida por el número de la muestra (n), representada matemáticamente de la siguiente forma.”²¹

$$x_p = \frac{\sum x_i}{n} \text{ (Ecu.11, Ref. 1)}$$

²¹JOHNSON, Robert. *Estadística elemental*. p.64.

El mínimo y máximo se obtiene con la función de Excel: MIN(datos) y MÁX(datos).

3.6.2. Datos para la simulación de escenarios

Para realizar la simulación de la contaminación del río Pantaleón se necesitan los siguientes datos.

- Datos del río:
 - Caudal (m^3/s): según el Instituto Privado en Investigación sobre el cambio climático el río Pantaleón tiene un caudal máximo de $413,1m^3/s$. para este estudio se establece de $200m^3/s$
 - DBO (mg/l): según el Insivumeh el límite máximo para considerar que un río no este contaminado es de 50mg/l. Para este estudio se establece un DBO de 70mg/l.
 - Oxígeno disuelto (mg/l): a continuación, se presenta la siguiente tabla de clasificación de cuerpos de agua según su oxígeno disuelto (OD)

Tabla VIII. **Clasificación de cuerpos de agua según OD (mg/l)**

| OD(mg/l) | Clasificación |
|----------|---------------|
| <2 | Fatales |
| 2 a3 | Dañino |
| 3 a 5 | Grave |
| 5 a 7.5 | Malo |
| >8 | Bien |

Fuente: elaboración propia, empleando información variada de la UNAM.

Al considerar que el río Pantaleón se encuentra contaminado en una situación dañina se establece el oxígeno disuelto (OD) de 2,5 mg/l.

- Temperatura (°C): debido a que se realizó el estudio en época lluviosa, se establece una temperatura de 15 °C.
- Datos de la descarga
 - Caudal (m^3/s): según el Instituto Privado en Investigación sobre el cambio climático el río Pantaleón tiene un caudal máximo de $293,9m^3/s$. para este estudio se establece de $108 m^3/s$.
 - DBO (mg/l): para este estudio se establece la demanda bioquímica de oxígeno promedio (DBO) de 2.69 mg/l. Ver tabla VII.
 - Oxígeno disuelto (mg/l): para este estudio se establece el oxígeno disuelto promedio (OD) de 2.69 mg/l. Ver tabla VII.
 - Temperatura (°C): para este estudio se establece una temperatura promedio (T) de 29,14 °C. Ver tabla VI.
- Datos de la mezcla:
 - Caudal (m^3/s): el cambio climático el río Pantaleón tiene un caudal máximo de $500,4m^3/s$. para este estudio se establece de $408 m^3/s$.
 - Temperatura (°C): debido a que se utilizan las k_1 y k_2 a 20°C, se establece una temperatura de 20 °C para este estudio. Ver tablas II y III.

- Oxígeno disuelto (mg/l): debido a que la T es de 20 °C, para este estudio se establece el oxígeno disuelto (OD) de 9,10 mg/l. Ver tabla I.

Para realizar el modelo de simulación se varía la constante de aireación (k_2) y desoxigenación (k_1) en sus valores descriptivos: mínimos, promedios y máximos para así poder generar los 3 escenarios respectivos.

Tabla IX. **Valores de mínimos promedios y máximos de las constantes k_1 y k_2 para la simulación**

| Constante | Cuerpo de agua | Intervalo | Valores mínimos | Valores promedios | Valores máximos |
|-----------|-----------------|-----------|-----------------|-------------------|-----------------|
| | | | Escenario A | Escenario B | Escenario C |
| K1 | Río contaminado | 0.10-0.25 | 0.15 | 0.175 | 0.25 |
| K2 | Ríos rápidos | 0.69-1.15 | 0.69 | 0.92 | 1.15 |

Fuente: elaboración propia.

3.7. Tabulación y ordenamientos de datos

A continuación, se presentan las tablas y herramientas utilizadas para la recopilación de la información y su posterior análisis:

Tabla X. **Modelo de regresión por cada escenario simulado**

| Escenario | k_1 | k_2 | Modelo estimado | t crítico (días) | t crítico (horas) | Distancia Crítica (km) |
|-----------|-------|-------|-----------------|------------------|-------------------|------------------------|
| A | 0.15 | 0.69 | | | | |
| B | 0.175 | 0.92 | | | | |
| C | 0.25 | 1.15 | | | | |

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Resultados del análisis de regresión por cada escenario simulado**

| Variable | Coeficiente | Error. Estándar | Estadístico | Probabilidad |
|------------------------------------|-------------|------------------------------------|----------------------|--------------|
| x_1 | | | | |
| x_2 | | | | |
| ... | | | | |
| x_n | | | | |
| Estadísticas de la regresión | | | | |
| R^2 | | Media de la variable dependiente | | |
| R^2 ajustado | | S.D. variable dependiente | | |
| SE. Regresión | | Criterios de información | Akaike Info | |
| Suma de cuadrados residuales (SCR) | | | Schwarz | |
| Log likelihood | | | Hannan - Quinn Critr | |
| F-estadístico | | F crítico | | |
| Probabilidad(F estadístico) | | Nivel de significancia establecido | | |

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Indicadores estadísticos para la validación de cada escenario simulado**

| Simulación/indicador | Modelo ajustado | RMSE | MAE | ME |
|----------------------|-----------------|------|-----|----|
| A | | | | |
| B | | | | |
| C | | | | |

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Análisis para la prueba de hipótesis de correlación (r) por escenario simulado**

| Simulación | R^2 | Estadístico de Prueba F | F crítico a un $\alpha = 5\%$ | Regla de decisión | Decisión |
|------------|-------|-------------------------|-------------------------------|-------------------|----------|
| A | | | | | |
| B | | | | | |
| C | | | | | |

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Resultados del análisis de varianza de un factor**

| Resumen | | | | | | |
|---------------------------|-------------------|--------------------|---------------------------|----------|--------------|-----------------------|
| Grupos | Cuenta | Suma | Promedio | Varianza | | |
| A | | | | | | |
| B | | | | | | |
| C | | | | | | |
| Análisis de varianza | | | | | | |
| Origen de las variaciones | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Promedio de los cuadrados | F | Probabilidad | Valor críticos para F |
| Entre los grupos | | | | | | |
| Dentro de los grupos | | | | | | |
| Total | | | | | | |

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. Prueba post Hoc de Tukey

| Combinación | Comparador | Valor | Comparación | Conclusión |
|-------------|------------|-------|-------------|------------|
| 1 | | | > | |
| 2 | | | > | |
| kC_2 | | | > | |

Fuente: elaboración propia.

3.8. Análisis estadístico

Es un procedimiento para realizar diversos análisis y estudiar cuantitativamente datos que se deben cuantificar y evaluar.

3.8.1. Verificación del modelo

Luego de realizar la regresión lineal para cada simulación se debe de evaluar si cada uno de los modelos ajustados son aceptables con las siguientes alternativas estadísticas:

- Coeficiente de correlación(r): es la relación estadística, existente entre las variables OD (mg/l) y distancia (km). Se debe de interpretar con los criterios del anexo 3 para luego darle su interpretación y significado según el número de observaciones (ver anexo 4).
- Coeficiente de determinación (R^2): mide el porcentaje de cambio en la variable OD (mg/l) debido a cambios en la variable distancia (km).
- R^2 ajustado: considerará la mejora marginal agregada por un término adicional en el modelo.
- Prueba de significancia conjunta e individual:

- Criterios de información: se utiliza para elegir el mejor modelo de predicción, ya que poco cada escenario se realizaron 3 modelos (lineal, cuadrático y cubico). Estos criterios evalúan parsimonia y varianza residual, los cuales son:

- Akaike Info criterion
- Schwarz criterion
- Hannan -Quinn Criterion

- Error medio (ME): es la diferencia media entre los valores observados y estimados. Se calcula con la siguiente fórmula:

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (\hat{y}_j - y_j) \text{ (Ecu.12, Ref. 1)}$$

- Error absoluto medio (MAE): es el promedio de la diferencia absoluta entre el valor observado y los valores estimados. El error absoluto medio o MAE es un valor lineal, lo que significa que todas las diferencias individuales se ponderan por igual en el promedio. Por ejemplo, la diferencia entre 8 y 0 será el doble de la diferencia entre 4 y 0. Se calcula con la siguiente fórmula:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N |y_j - \hat{y}_j| \text{ (Ecu.13, Ref. 1)}$$

- Error cuadrático medio (RMSE): representa a la raíz cuadrada de la distancia cuadrada promedio entre el valor real y el valor estimado.

Indica el ajuste absoluto del modelo a los datos, cuán cerca están los puntos de datos observados de los valores predichos del modelo. El error cuadrático medio o RMSE es una medida absoluta de ajuste.

Como la raíz cuadrada de una varianza, RMSE se puede interpretar como la desviación estándar de la varianza inexplicada, y tiene la propiedad útil de estar en las mismas unidades que la variable de respuesta.

Los valores más bajos de RMSE indican un mejor ajuste. RMSE es una buena medida de la precisión con que el modelo predice la respuesta. Se calcula con la siguiente fórmula:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (y_j - \hat{y}_j)^2} \text{ (Ecu.14, Ref. 1)}$$

3.8.2. Análisis de sensibilidad

En realizar el análisis de sensibilidad se requiere a la estadística inferencial:

- Prueba de hipótesis para el coeficiente de correlación

Responde a la pregunta ¿puede haber una correlación cero en la población entre el OD (mg/l) y la distancia (km) de la muestra seleccionada? Para lo cual se plantearon las hipótesis respectivas (ver la sección de hipótesis). Para ello se utiliza el siguiente estadístico de prueba:

$$z = \frac{r-r_0}{1/\sqrt{n-3}} \text{ (Ecu.15, Ref. 1)}$$

En donde:

- r : es el valor del coeficiente de correlación previamente calculado.

- r_0 : es el valor del coeficiente de correlación a probar en la hipótesis (en este caso cero).

Luego se rechaza la hipótesis nula cuando el estadístico $Z > \pm 1.96$, de lo contrario se acepta la hipótesis alterna. Para conocer el valor de crítico de Z ver anexo 5.

- Prueba de medias con 3 poblaciones

El método de análisis de varianza (ANDEVA) es utilizado específicamente para determinar si las medias de dos o más poblaciones son iguales o distintas. Se utilizará el de bloques aleatorios para un factor. Aquí el factor son las diversas constantes (k_1 y k_2) que se colocaron en el modelo según la tabla III y IV, ya que la variable respuesta (OD) del modelo Streeter-Phelps (curva SAG). Para conocer ¿cómo realizar el ANDEVA?, ver anexo 6.

Si al realizar un análisis de varianza se rechaza la hipótesis nula de igualdad de medias es necesario realizar pruebas llamadas Post Hoc para determinar cuál o cuáles de los tratamientos son los que presentan una media distinta. Las pruebas a realizar son la prueba de Tukey y la prueba de Duncan.²² Se usará la prueba de Tukey en este estudio ya que es más estricta.

3.8.2.1. Prueba de Tukey

La prueba de Tukey consiste en la comparación de las medias de todas las poblaciones estudiadas, tomando pares de medias. El método se basa en la

²² CARVAJAL, Mayra. *Análisis de Varianza*. pp 4-5.

distribución del rango estudentizado. El punto apropiado del percentil es una función de α , k y ν = grados de libertad para S^2 .

El procedimiento de la prueba consiste en comparar el valor absoluto de cada diferencia de medias con un el criterio calculado de Tukey, el mismo se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$T = q_{(\alpha, k, \nu)*} \sqrt{\frac{S^2}{n}} \quad (\text{Ecu.16, Ref. 1})$$

En donde:

- S^2 : Cuadrado medio del error (CME), obtenido del ANDEVA.
- n : Tamaño de la muestra.
- ν : Grados de libertad del error
- k : Número de tratamientos

Luego se obtiene el número de comparaciones a realizar con la siguiente combinación kC_2 . Si el valor absoluto de la diferencia de medias es mayor que el criterio de Tukey las medias son distintas, si es menor las medias son iguales. Esto debe hacerse para cada par de medias con el propósito de determinar las medias distintas.

$$|\bar{x}_i - \bar{x}_j| > T \quad (\text{Ecu.18, Ref. 1})$$

4. RESULTADOS

4.1. Modelo de regresión para cada escenario simulado

A continuación, se presenta una tabla resumen de cada regresión estimada por escenario (A, B, C), elaborada a partir de los datos simulados (ver apéndice 4, 5 y 6 resaltado el punto crítico en amarillo).

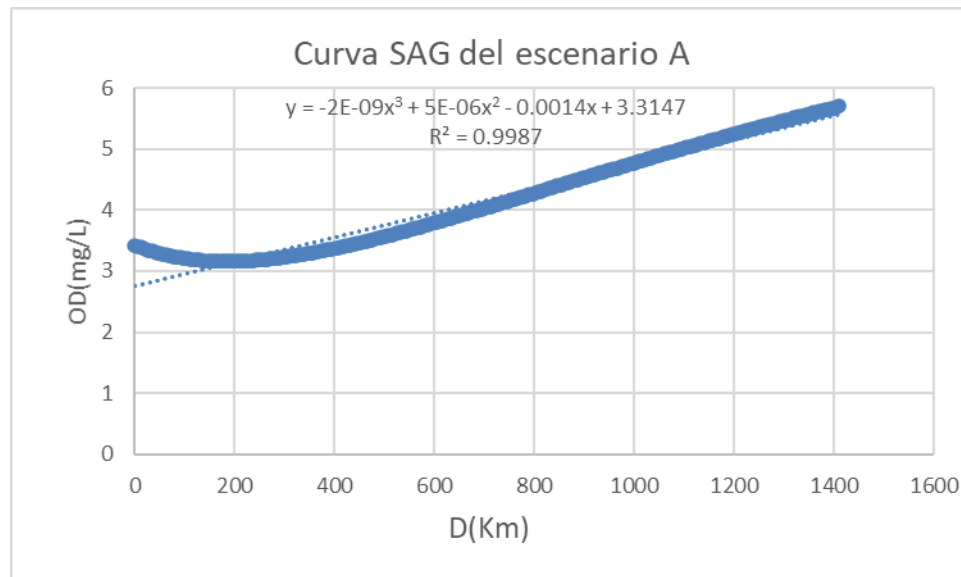
Tabla XVI. Datos estimados de cada simulación

| Escenario | k_1 | k_2 | t crítico (días) | t crítico (horas) | Distancia crítica (km) |
|-----------|-------|-------|------------------|-------------------|------------------------|
| A | 0.15 | 0.69 | 0.65 | 15 | 184.81 |
| B | 0.175 | 0.92 | 1.20 | 28.8 | 339.51 |
| C | 0.25 | 1.15 | 0.72 | 17.28 | 203.705 |

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel, 2016.

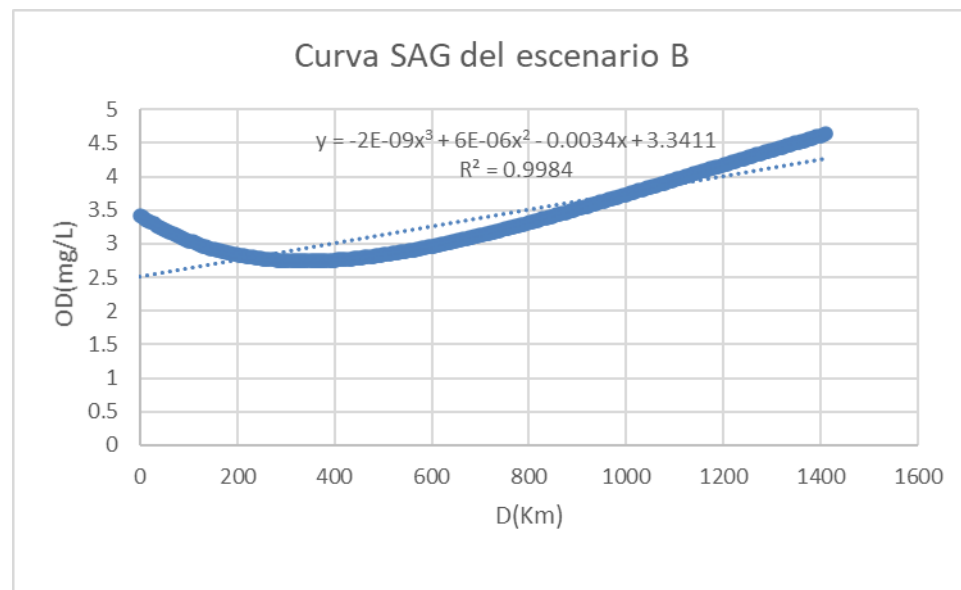
A continuación, en la figura 7, 8 y 9 se presentan los modelos ajustados de regresión cúbica para el escenario A, B y C respectivamente.

Figura 7. **Modelo ajustado de la curva SAG del escenario A**



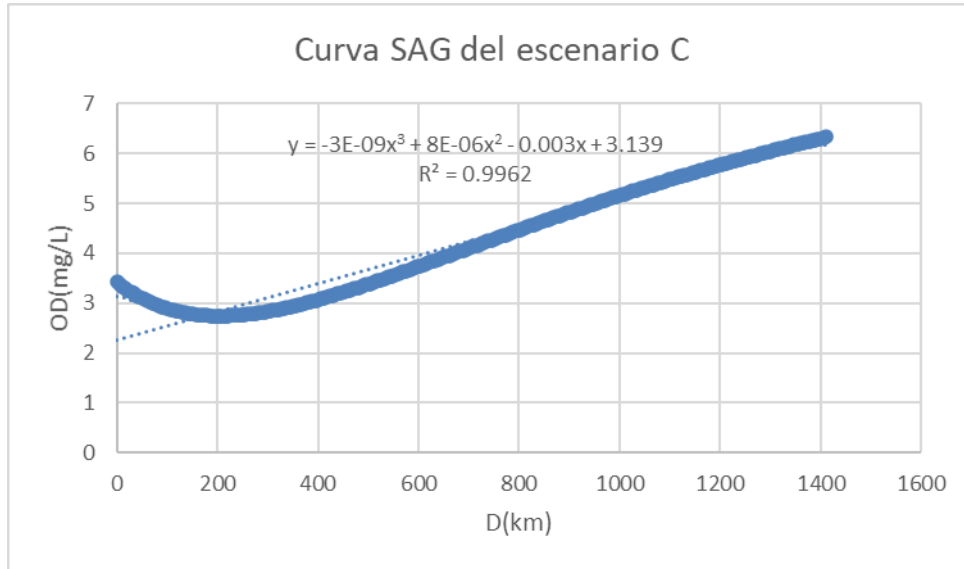
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel, 2016.

Figura 8. **Modelo ajustado de la curva SAG del escenario B**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel, 2016.

Figura 9. **Modelo ajustado de la curva SAG del escenario C**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel, 2016.

4.2. Estadísticas de regresión para cada escenario simulado

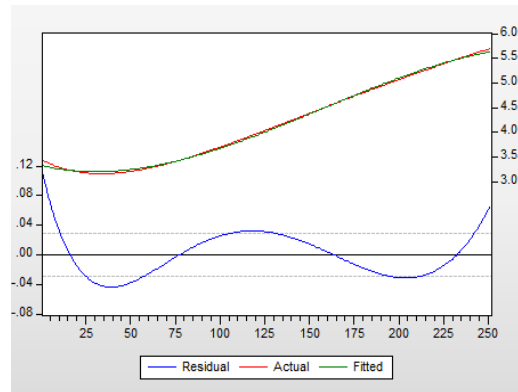
A continuación, se presenta en las tablas XVII, XVIII y IX las estadísticas de regresión para cada modelo simulado (A, B, C) obtenidas del apéndice 7, 8 y 9 respectivamente. Simultáneamente, se observa la gráfica de los datos observados de la simulación vs. el modelo ajustado para cada escenario en las figuras (A, B, C) 10, 11 y 12 respectivamente.

Tabla XVII. **Estadísticas de regresión del escenario A**

| Variable | Coficiente | Error. Estándar | Estadístico | Probabilidad |
|------------------------------------|-----------------------|------------------------------------|----------------------|--------------|
| C | 3.314703 | 0.007373 | 449.5998 | 0.0000 |
| D | -0.001412 | $4.54 \cdot 10^{-5}$ | -31.13079 | 0.0000 |
| D^2 | $4.65 \cdot 10^{-6}$ | $7.49 \cdot 10^{-8}$ | 62.10590 | 0.0000 |
| D^3 | $-1.76 \cdot 10^{-9}$ | $3.49 \cdot 10^{-11}$ | -50.46064 | 0.0000 |
| Estadísticas de la regresión | | | | |
| R^2 | 0.998745 | Media de la variable dependiente | 4.167186 | |
| R^2 ajustado | 0.998730 | S.D. variable dependiente | 0.831689 | |
| SE. Regresión | 0.029638 | Criterios de información | Akaike Info | -4.183698 |
| Suma de cuadrados residuales (SCR) | 0.216970 | | Schwarz | -4.127516 |
| Log likelihood | 529.0541 | | Hannan - Quinn Critr | 0.006292 |
| F-estadístico | 65537.88 | Probabilidad(F estadístico) | 0.0000 | |
| F crítico | 2.6408 | Nivel de significancia establecido | 0.05 | |

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de Eviews 10.

Figura 10. Modelo simulado vs. ajustado del escenario A



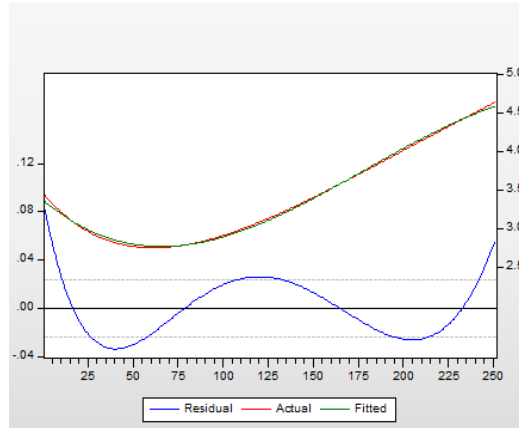
Fuente: elaboración propia, empleando Eviews

Tabla XVIII. Estadísticas de regresión del escenario B

| Variable | Coeficiente | Error. Estándar | Estadístico | Probabilidad |
|-------------------------------------|-----------------------|------------------------------------|----------------------|--------------|
| C | 3.341082 | 0.005896 | 566.6256 | 0.0000 |
| D | -0.003430 | $3.63 \cdot 10^{-5}$ | -94.51329 | 0.0000 |
| D^2 | $5.74 \cdot 10^{-6}$ | $5.99 \cdot 10^{-8}$ | 95.94237 | 0.0000 |
| D^3 | $-1.91 \cdot 10^{-9}$ | $2.79 \cdot 10^{-11}$ | -68.36446 | 0.0000 |
| Estadísticas de la regresión | | | | |
| R^2 | 0.998362 | Media de la variable dependiente | 3.395001 | |
| R^2 ajustado | 0.998342 | S.D. variable dependiente | 0.582210 | |
| SE. Regresión | 0.023704 | Criterios de información | Akaike Info | -4.630527 |
| Suma de cuadrados residuales (SCR) | 0.138786 | | Schwarz | -4.574344 |
| Log likelihood | 585.1311 | | Hannan - Quinn Critr | -4.607017 |
| F-estadístico | 50190.17 | Probabilidad(F estadístico) | 0.0000 | |
| F crítico | 2.6408 | Nivel de significancia establecido | 0.05 | |

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de Eviews 10.

Figura 11. **Modelo simulado vs ajustado del escenario B**



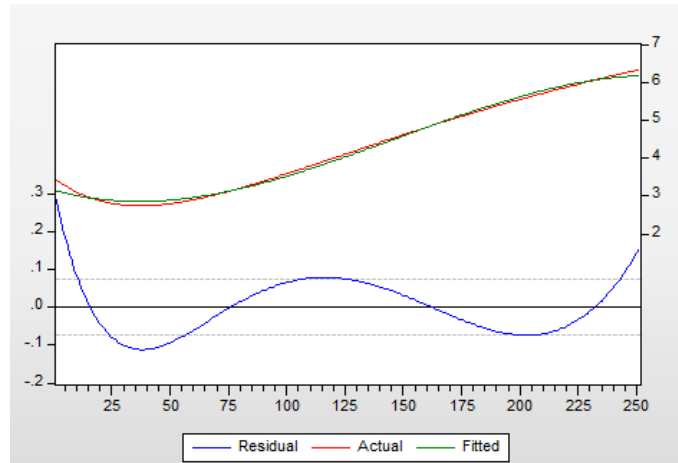
Fuente: elaboración propia, empleando Eviews 10.

Tabla XIX. **Estadísticas de regresión del escenario C**

| Variable | Coefficiente | Error. Estándar | Estadístico | Probabilidad |
|------------------------------------|-----------------------|------------------------------------|----------------------|--------------|
| C | 3.139022 | 0.018327 | 1711.2811 | 0.0000 |
| D | -0.002969 | 0.000113 | -26.32748 | 0.0000 |
| D^2 | $8.44 \cdot 10^{-6}$ | $1.86 \cdot 10^{-7}$ | 45.38324 | 0.0000 |
| D^3 | $-3.41 \cdot 10^{-9}$ | $8.67 \cdot 10^{-11}$ | -39.35569 | 0.0000 |
| Estadísticas de la regresión | | | | |
| R^2 | 0.996191 | Media de la variable dependiente | 4.251455 | |
| R^2 ajustado | 0.996144 | S.D. variable dependiente | 1.186501 | |
| SE. Regresión | 0.073675 | Criterios de información | Akaike Info | -2.362508 |
| Suma de cuadrados residuales (SCR) | 1.340704 | | Schwarz | -2.306326 |
| Log likelihood | 300.4948 | | Hannan - Quinn Critr | -2.339899 |
| F-estadístico | 21530-85 | Probabilidad(F estadístico) | 0.0000 | |
| F crítico | 2.6408 | Nivel de significancia establecido | 0.05 | |

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de Eviews 10.

Figura 12. **Modelo simulado vs ajustado del escenario C**



Fuente: elaboración propia, empleando Eviews 10.

A continuación, se presenta en la tabla XX los indicadores estadísticos de verificación de predicción de los escenarios simulados.

Tabla XX. **Indicadores de verificación por modelo simulado**

| Simulación | Modelo ajustado | RMSE | MAE | ME |
|------------|---|----------|-----------|-----------|
| A | $\widehat{OD} = 3.314703 - 0.001412d + 4.65 * 10^{-6}d^2 - 1.76 * 10^{-6}d^3$ | 0.029638 | 0.0002432 | -0.001474 |
| B | $\widehat{OD} = 3.341082 - 0.003430d + 5.74 * 10^{-6}d^2 - 1.91 * 10^{-6}d^3$ | 0.023704 | 0.0002805 | 0.004415 |
| C | $\widehat{OD} = 3.139022 - 0.002969d + 8.44 * 10^{-6}d^2 - 3.41 * 10^{-6}d^3$ | 0.073675 | 0.0006058 | 0.004436 |

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de Eviews 10.

4.3. Pruebas hipótesis

A continuación, se presentan las pruebas y el desglose del estudio.

4.3.1. Prueba de hipótesis de correlación (r) para cada escenario simulado

A continuación, se presentan tablas que ayudan al estudio de las hipótesis.

Tabla XXI. Análisis para la prueba de hipótesis de correlación (r) por escenario simulado

| Simulación | R^2 | Estadístico de Prueba F | F crítico a un $\alpha = 5\%$ | Regla de decisión | Decisión |
|------------|----------|-------------------------|-------------------------------|-------------------|-------------------------------|
| A | 0.998745 | 15.7283 | ± 1.96 | 15.7283 > 1.96 | Se Rechaza la H_0 planteada |
| B | 0.998362 | 15.7222 | | 15.7222 > 1.96 | |
| C | 0.996191 | 15.6880 | | 15.7222 > 1.96 | |

Fuente: elaboración propia.

4.3.2. Prueba de hipótesis de medias (μ_1, μ_2, μ_3) según sus constantes (k_1, k_2)

- Análisis de varianza (ANDEVA)

Tabla XXII. Resultados del Análisis de Varianza de un Factor

| Resumen | | | | | | |
|---------------------------|-------------------|--------------------|---------------------------|-------------|--------------|----------------------|
| Grupos | Cuenta | Suma | Promedio | Varianza | | |
| A | 251 | 852.1452717 | 3.395001083 | 0.338968937 | | |
| B | 251 | 1213.151837 | 4.833274252 | 1.008332074 | | |
| C | 251 | 1067.115286 | 4.251455321 | 1.407784161 | | |
| Análisis de Varianza | | | | | | |
| Origen de las variaciones | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Promedio de los cuadrados | F | Probabilidad | Valor crítico para F |
| Dentro de los grupos | 688.771293 | 750 | 0.91836172 | | | |
| Total | 951.5395821 | 752 | | | | |

Fuente: elaboración propia.

- Prueba Post Hoc de Tukey

Tabla XXIII. Prueba Post Hoc de Tukey

| Combinación | Comparador | Valor | Comparación | | Conclusión |
|-------------|-------------|------------|-------------|------------|--|
| 1 | OD_A-OD_B | 1.43827317 | > | 0.19244871 | Todas las medias de OD difieren estadísticamente a un 5% de significancia. |
| 2 | OD_A-OD_C | 0.85645424 | > | 0.19244871 | |
| 1 | OD_B-OD_C | 0.58181893 | > | 0.19244871 | |

Fuente: elaboración propia.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En la tabla XVI se puede observar que para el escenario A, B y C se presenta un punto crítico en el cual existe un balance entre el consumo y el aporte de oxígeno disuelto de la reaeración, los cuales son de 15 horas a 184,81 kms, 28,8 horas a 339,51 km y de 17,28 horas a 203,705 km respectivamente.

En las figuras 7, 8 y 9 se observan los modelos ajustados de la curva SAG para cada escenario respectivamente: A, B y C. Para los 3 modelos dicha curva inicia en una etapa (0-distancia del punto crítico) a una [OD] de 3,31 mg/L, 3,34 mg/L y 3,14 mg/L para cada escenario respectivamente. Esta etapa no debería de existir siempre y cuando el río Pantaleón no está contaminado, por lo que se afirma que está contaminado ya que la [OD] < 8 mg/l.

Por lo que el río Pantaleón se encuentra actualmente en la zona donde existen descarga de aguas residuales y se generan sólidos que impiden el paso de luz para el proceso de fotosíntesis de las algas. Esto sucede porque [OD] < 8 mg/L, la cual se debe a las grandes cantidades que consumen los microorganismos heterotróficos y la [OD] baja es compensada con el oxígeno presente en la atmosfera al hacer contacto con el agua; en un principio la demanda de oxígeno de la columna de agua y en los elementos consume el aporte generado por esta reaeración.

En la zona del punto crítico para cada modelo simulado (A, B y C) fluyen dos constantes, el coeficiente de desoxigenación o carbonasa (k_1), la cual es una tasa a la que consume oxígeno los microorganismos para degradar la

materia orgánica, es decir, la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y la constante de reaeración (k_2) la cual es la tasa con la que se oxigena un cuerpo de agua por introducción de oxígeno ya sea por el contacto directo de la atmosfera o por fotosíntesis de las plantas acuática, la k_2 depende de diversos factores, tales como: turbulencia, condiciones de mezcla internas en el río Pantaleón, temperatura y velocidad del viento.

Después de la zona del punto crítico la reaeración y reoxigenación empiezan a incrementarse. La reaeración es mayor al consumo, por lo que el nivel de oxígeno empieza a incrementarse y la naturaleza se regenera por si sola y algunos seres vivos acuáticos empiezan a desarrollarse.

La zona limpia para los 3 modelos (A, B y C) aún no se presenta, ya que se considera un cuerpo de agua no contaminado con una concentración de oxígeno disuelto mayor a 8mg/l.

Para conocer si los modelos para cada escenario (A, B y C) se ajustan a los datos simulados se estimó una regresión por el método de MCO (mínimos cuadrados ordinarios) la cual se puede observar en la tabla XVII, XVIII y XIX para cada escenario respectivamente.

Para cada regresión estimada por cada escenario (A,B y C) se obtiene los coeficientes para cada variable (D , D^2 y D^3), los cuales son estadísticamente significativos ya que su probabilidad (0,0000) es menor al nivel de significancia establecido (0,05). Esto último indica que la distancia (km) en sus términos lineales, cuadráticos y cúbicos contribuye a explicar el modelo Streeter-Phelps. Simultáneamente con la prueba de significancia de la regresión para cada modelo simulado se mide si la variable respuesta (oxígeno disuelto) el modelo

A, B y C está relacionado linealmente de manera cúbica con la variable explicativa (distancia). Para los tres modelos se obtiene un valor de probabilidad (0,05) el cual es mayor al nivel de significancia establecido (0,05) y además que el F-estadístico es de 65537,88, 50190,17, 21530,85 son mayores al Fcrítico (2,6408) para el modelo A, B y C respectivamente; entonces se puede afirmar que a un nivel confianza del 95 % el oxígeno disuelto está relacionado linealmente de manera cúbica con la variable explicativa (distancia) para cada modelo ajustado (A, B y C). Los criterios de información de Akaike Info, Schwarz y Hannan-Quinn para cada escenario son ligeramente muy pequeños por lo que se puede considerar que el modelo cúbico que relaciona el oxígeno disuelto (OD) en función de la distancia (km.) es parsimonioso con varianza mínima, por lo que se considera que los modelos ajustados para cada escenario son:

- A: $\widehat{OD} = 3.314703 - 0.001412d + 4.65 * 10^{-6}d^2 - 1.76 * 10^{-6}d^3 + \hat{\varepsilon}_t$
- B: $\widehat{OD} = 3.314703 - 0.003430d + 5.74 * 10^{-6}d^2 - 1.76 * 10^{-6}d^3 + \hat{\varepsilon}_t$
- C: $\widehat{OD} = 3.139022 - 0.002969d + 8.44 * 10^{-6}d^2 - 3.41 * 10^{-6}d^3 + \hat{\varepsilon}_t$

Para verificar el rendimiento de cada modelo estimado se obtuvieron los índices RMSE, MAE y ME de cada escenario. El RMSE es de 0,029, 0.023 y 0,073 (medidas en [OD]) para cada modelo estimado, esto indica que los datos estimados están muy cerca de los simulados ya que los valores de RMSE son muy bajos y por lo cual los modelos son precisos. EL MAE para cada escenario es de 0,00024, 0,00028, 0,00060, lo que significa que todas las diferencias individuales entre los datos simulados los ajustados se ponderan por igual al valor promedio del MAE (el cual es muy bajo). El ME para cada escenario es de -0,001474, 0,004415, 0,004436, lo que indica que la diferencia promedio entre los valores simulados y estimados es muy baja (ya que es cerca a cero). Adicional se puede observar en las figuras 10, 11 y 12 los modelos ajustados

(líneas rojas) con los simulados (líneas verdes) para cada escenario coinciden y los residuales para todos los escenarios (líneas azules) tienen el mismo comportamiento polinómico de grado 4.

Para comprobar las hipótesis planteadas en la investigación se calculó estadístico de prueba F para conocer si las correlaciones de los modelos de cada escenario podrían llegar a ser nulos (H_0). Según la tabla XXI esta hipótesis se rechaza para los 3 escenarios a un nivel de significancia del 5 %, por lo que existe correlación entre el oxígeno disuelto (mg/L) y la distancia (km). Para comprobar si existe diferencia significativa en la evaluación para la construcción de los 3 escenarios posibles (A , B y C) a diferentes k_1 y k_2 para estimar el comportamiento del oxígeno disuelto (mg/l) del río Pantaleón se realizó un ANDEVA con la variable respuesta oxígeno disuelto y sus respectivos factores (valores de k_1 y k_2 mínimos, valores de k_1 y k_2 promedios, valores de k_1 y k_2 máximos) del cual se obtuvo un valor F de 143.06 el cual es mayor al valor F crítico de 3,0077 entonces se puede afirmar que existe diferencia estadística en la evaluación para la construcción de los 3 escenarios posibles (A , B y C) a diferentes k_1 y k_2 para estimar el comportamiento del oxígeno disuelto (mg/l) del río Pantaleón aun nivel de significancia del 5 %.

Para conocer a que valores de las constantes de desoxigenación (k_1) y reaeración (k_2) difieren las concentraciones de oxígeno disuelto se realiza la prueba Post Hoc de Tukey la cual indica que como el valor calculado entre todos los escenarios (A, B, C) es mayor a 0,1924 se afirma que todos los valores de oxígeno disuelto en promedio difieren estadísticamente a un nivel de significancia del 5 %.

CONCLUSIONES

1. Es posible elaborar un simulador para estimar el oxígeno disuelto (mg/l) para el río Pantaleón, ubicado en Siquinalá, Escuintla al variar los valores de las constantes desoxigenación (k_1) y reaireación (k_2) en tres escenarios posibles (A, B y C) con un caudal del río, descarga y en la mezcla de $200 \text{ m}^3/s$, $108 \text{ m}^3/s$ y $408 \text{ m}^3/s$ respectivamente; a un DBO del río, descarga y en la mezcla de 2,5 mg/l; a un oxígeno disuelto del río, descarga de 2,5 mg/l y 8,3 mg/l respectivamente; 9,1 mg/l de oxígeno de saturación; a una temperatura de 15 °C, 29,14 °C y a 20 °C del río, descarga en la mezcla respectivamente.
2. Se obtuvo la curva SAG (modelo Streeter-Phelps) de oxígeno disuelto del río Pantaleón en función de la distancia recorrida (km.), para los tres escenarios simulados (A, B y C), las cuales inician con una [OD] de 3,31 mg/L, 3,34 mg/L y 3,14 mg/L para cada escenario respectivamente, por lo que se puede afirmar que el río está contaminado debido que la [OD] < 8 mg/l.
3. El valor crítico de oxígeno disuelto es de 3,159 mg/l y la DBO de 5,941 mg/l a una distancia de 184,81 kms. a 15 horas para el escenario A; el oxígeno disuelto es de 2,744 mg/l y la DBO de 6,356 mg/l a una distancia de 339,51 kms. a 28,8 horas para el escenario B; el oxígeno disuelto es de 2,7437 mg/l y la DBO de 6,3563 mg/l a una distancia de 203,71 kms. a 17 horas para el escenario C.

4. El modelo de regresión lineal que explica el comportamiento del oxígeno disuelto del río Pantaleón en función de la distancia recorrida (km.) es de forma cubica para los 3 escenarios (A, B y C).
5. La medida de verificación más utilizada para los modelos matemáticos es el RMSE para cada modelo estimado son 0,029, 0,023 y 0,073 (medidas en [OD]) respectivamente, es decir, solo existe un error de predicción aproximadamente es del 3 %, 2,3 % y 7,3 % para el escenario A, B y C respectivamente; lo cual es muy bajo y se considera que los modelo estimados para cada escenario se ajustan correctamente a los simulados.
6. Se rechaza la $H_{0_1}:r=0$; por lo que existe correlación estadística entre el oxígeno disuelto (mg/L) y la distancia (km.) a un nivel de significancia del 5 %.
7. Se rechaza la $H_{0_2};\mu_1=\mu_2 = \mu_3$ a un nivel de significancia del 5 %.
8. Se afirma por medio de la prueba de Tukey que los escenarios A, B y C obtienen resultados de oxígeno disuelto (mg/l) estadísticamente a un nivel de significancia del 5 %.
9. El río Pantaleón se encuentra actualmente contaminado debido a que las concentraciones simuladas y estimadas de oxígeno disuelto son menores a 8mg/l.

RECOMENDACIONES

1. Los datos de caudal utilizados en la simulación son colocados según otras investigaciones realizadas por otros autores respecto al río Pantaleón, sería apropiado realizar el cálculo del caudal experimentalmente por cualquiera de los siguientes métodos: control de aforo (volumétrico, Parshall, vertederos y orificios, sección –velocidad, molinete).
2. La velocidad del río es obtenida por medio de investigaciones realizadas por otros autores, es apropiado realizar el cálculo experimental por el método del molinete los cuales son: 6/10, 8/10 y 2/10, varios puntos y superficie.
3. Para conocer los valores de las constantes de desoxigenación (k_1) y reaeración (k_2) se consultaron investigaciones de otros autores, se considera apropiado calcular las constantes mencionadas experimentalmente según los intervalos de profundidad del río y sus respectivos caudales previamente calculados también de manera experimental.
4. Esta investigación se realizó solo en temporada lluviosa (julio, agosto y septiembre), sería apropiado realizar la curva SAG para las tres temporadas del año (seca, cálida y lluviosa), ya que así, se obtienen temperaturas para las tres estaciones mencionadas y relacionarlas con sus respectivas constantes.

5. Es necesario que el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN) proponga y ejecute nuevas medidas de acondicionamiento de aguas para los ríos, en especial el río Pantaleón, ya que en la simulación y estimación del modelo las concentraciones de oxígeno disuelto son menores a 8mg/l (la mínima aceptada para que un cuerpo de agua se considere libre de contaminación).

BIBLIOGRAFÍA

1. AGUILAR, María. *Análisis de Varianza*. Colombia: Editorial Buenaventura, 2016. 350 p.
2. CARVAJAL, Mayra. *Análisis de Varianza*. Guatemala: Editorial DIGI-USAC, 2017. 160 p.
3. CELIS SARAVIA, Pedro. *Contaminación del Agua*. Guatemala: Facultad de Ingeniería, USAC, 2017. 254 p.
4. CHIN, David. *Water-Quality Engineering in Natural Systems*. Hoboken, United States: WILEY, 2006. 24 p.
5. DOMÍNGUEZ, Jorge. *Calibración de modelos matemáticos de calidad de agua para valorar el impacto de estrategias de saneamiento del río "Almendares*. La Habana, Cuba: CENIC, 2005. 175 p.
6. ESPINOZA RIVAS, Roberto. MERINO, Allan. ZAVALETA LEMUS, Rebeca. *Caracterización Hidrodinámica y Dispersión de Contaminantes de la parte alta del río Suquiapa, Santa Ana. Ciudad Universitaria*. El Salvador: Santana, 2013. 208 p.
7. FRAUME, Néstor. *Diccionario ambiental*. New Jersey, USA: John Wiley & Song, 2014. 25 p.

8. _____ . *Hydrodynamics and water quality: modeling rivers, lakes, and estuaries*. New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2014. p. 385.
9. GARCÍA, Dunna. *Simulación y análisis de sistemas con ProModel*. Monterrey, México: Pearson, 2013. 305 p.
10. GIL, Manuel. *Depuración de aguas residuales: modelización de procesos de lodos activos*. Madrid, España: Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 2006. 400 p.
11. GUJARATI, D. *Econometría*. México, D.F: McGraw-Hill, 2003. 254 p.
12. G. PERERA, Jorge, R. SBRUGNERA, Gustavo, J. GRAIEB, Oscar, C. PERERA, Teresa. *Modelización Analógico-Digital de la Difusión de Contaminantes y Nutrientes, en condiciones de régimen estacionario en el Embalse frontal de Termas de Rio Hondo*. Argentina, Centro de Ingeniería Ambiental, Facultad Regional Tucumán, Universidad Tecnológica Nacional, 2001. 12 p.

ANEXOS

Anexo 1. Demostración de la ecuación de Streeter-Phelps

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_L \frac{\partial c}{\partial x} \right) - K_d L + K_a (c_s - c)$$

Luego, si se asume un estado estacionario y se ignora el efecto dispersivo de la corriente por ser despreciable, la ecuación anterior se convierte en

$$u \frac{\partial c}{\partial x} = -K_d L + K_a (c_s - c)$$

O, simplemente, utilizando el concepto de déficit de oxígeno, D ,

$$u \frac{\partial c}{\partial x} = -K_d L + K_a D$$

Ahora bien, dado que la concentración c es sólo función de la distancia x , se obtiene una ecuación diferencial que permite calcular el déficit de oxígeno en el curso de agua:

$$\frac{dD}{dx} = \left(\frac{K_d}{v} \right) L - \left(\frac{K_a}{v} \right) D$$

Si la ecuación de la DBO remanente se amplía para abarcar, no sólo la remoción de DBO por desoxigenación, sino también por sedimentación, entonces la constante de reacción es k_r , y si $L = L_0$ cuando $t = 0$, se tiene que

$$L = L_0 e^{-k_r t} = L_0 e^{-k_r \frac{x}{v}}$$

Continuación del anexo 1.

Donde, x es la distancia aguas abajo a la que se mide L , y v es la velocidad media del agua.

Combinando las dos ecuaciones inmediatamente anteriores resulta,

$$\frac{dD}{dx} = \left(\frac{k_d}{v}\right) L_0 e^{-k_r \frac{x}{v}} - \left(\frac{k_a}{v}\right) D$$

De modo que, resolviendo la ecuación diferencial, bajo el arreglo de una ecuación diferencial lineal de primer orden $\frac{dy}{dx} + P(x)y = Q(x)$, y empleando el factor de integración $e^{\int \frac{k_a}{v} dx} = e^{\frac{k_a x}{v}}$, se obtiene

$$\frac{dD}{dx} \left(e^{\frac{k_a x}{v}} \right) + \left(\frac{k_a}{v}\right) D \left(e^{\frac{k_a x}{v}} \right) = \left(\frac{k_d}{v}\right) L_0 e^{-k_r \frac{x}{v}} \left(e^{\frac{k_a x}{v}} \right)$$

$$\frac{d}{dx} \left(D e^{\frac{k_a x}{v}} \right) = \left(\frac{k_d L_0}{v}\right) \left(e^{-\frac{k_r x}{v}} \right) \left(e^{\frac{k_a x}{v}} \right)$$

$$D \left(e^{\frac{k_a x}{v}} \right) = \int \left[\left(\frac{k_d L_0}{v}\right) \left(e^{\frac{(k_a - k_r)x}{v}} \right) \right] dx$$

$$D \left(e^{\frac{k_a x}{v}} \right) = \left(\frac{k_d L_0}{v}\right) \left(\frac{v}{k_a - k_r}\right) \left(e^{\frac{(k_a - k_r)x}{v}} \right)$$

$$D \left(e^{\frac{k_a x}{v}} \right) = \left(\frac{k_d L_0}{k_a - k_r}\right) \left(e^{\frac{(k_a - k_r)x}{v}} \right) + C$$

El valor de la constante de integración C se calcula para condiciones de contorno donde $D = D_0$ cuando $x = 0$, así

$$D_0 e^0 = \left(\frac{k_d L_0}{k_a - k_r}\right) e^0 + C$$

$$\rightarrow C = D_0 - \left(\frac{k_d L_0}{k_a - k_r}\right)$$

Entonces,
$$D \left(e^{\frac{k_a x}{v}} \right) = \left(\frac{k_d L_0}{k_a - k_r}\right) \left(e^{\frac{(k_a - k_r)x}{v}} \right) + D_0 - \left(\frac{k_d L_0}{k_a - k_r}\right)$$

Continuación del anexo 1.

$$D \left(e^{\frac{k_a x}{v}} \right) = \left(\frac{k_d L_0}{k_a - k_r} \right) \left(e^{\frac{(k_a - k_r)x}{v}} \right) + D_0 - \left(\frac{k_d L_0}{k_a - k_r} \right)$$

$$D = \left(\frac{k_d L_0}{k_a - k_r} \right) \left(e^{-\frac{k_r x}{v}} \right) + D_0 \left(e^{-\frac{k_a x}{v}} \right) - \left(\frac{k_d L_0}{k_a - k_r} \right) \left(e^{-\frac{k_a x}{v}} \right)$$

$$\therefore D = \left(\frac{k_d L_0}{k_a - k_r} \right) \left(e^{-\frac{k_r x}{v}} - e^{-\frac{k_a x}{v}} \right) + D_0 \left(e^{-\frac{k_a x}{v}} \right)$$

$$\text{O.} \quad D(x) = \left(\frac{k_d L_0}{k_a - k_r} \right) \left[\exp \left(\frac{-k_r x}{v} \right) - \exp \left(\frac{-k_a x}{v} \right) \right] + D_0 \exp \left(\frac{-k_a x}{v} \right)$$

Fuente: RODRIGUEZ, Julio. *Modelización de la incidencia del Oxígeno Disuelto y la Demanda Bioquímica de Oxígeno en la calidad del agua del estero Atascoso, cantón Quevedo*. pp. 44-45.

Anexo 2. **Demostración de la ecuación de tiempo y distancia crítica de Streeter-Phelps**

$$\frac{dD}{dx} = \frac{d}{dx} \left[\left(\frac{k_d L_0}{k_a - k_r} \right) \left(e^{-\frac{k_r x}{v}} - e^{-\frac{k_a x}{v}} \right) + D_0 \left(e^{-\frac{k_r x}{v}} \right) \right]$$

$$\frac{dD}{dx} = \left(\frac{k_d L_0}{k_a - k_r} \right) \frac{d}{dx} \left(e^{-\frac{k_r x}{v}} - e^{-\frac{k_a x}{v}} \right) + D_0 \frac{d}{dx} \left(e^{-\frac{k_r x}{v}} \right)$$

$$0 = \left(\frac{k_d L_0}{k_a - k_r} \right) \left[\left(e^{-\frac{k_r x}{v}} \right) \left(\frac{-k_r}{v} \right) + \left(e^{-\frac{k_a x}{v}} \right) \left(\frac{-k_a}{v} \right) \right] - D_0 \left(e^{-\frac{k_r x}{v}} \right) \left(\frac{k_r}{v} \right)$$

$$\frac{\left[\left(e^{-\frac{k_r x}{v}} \right) \left(\frac{-k_r}{v} \right) - \left(e^{-\frac{k_a x}{v}} \right) \left(\frac{k_a}{v} \right) \right]}{\left(e^{-\frac{k_r x}{v}} \right) \left(\frac{-k_r}{v} \right)} = \frac{D_0 (k_a - k_r)}{k_d L_0}$$

$$\ln e^{\frac{(k_a - k_r)x}{v}} = \ln \left[\frac{k_a}{k_r} \left(1 - \frac{D_0 (k_a - k_r)}{k_d L_0} \right) \right]$$

$$\therefore x_c = \frac{v}{k_a - k_r} \ln \left[\frac{k_a}{k_r} \left(1 - \frac{D_0 (k_a - k_r)}{k_d L_0} \right) \right]$$

O, expresado como tiempo crítico:

$$t_c = \frac{1}{k_a - k_r} \ln \left[\frac{k_a}{k_r} \left(1 - \frac{D_0 (k_a - k_r)}{k_d L_0} \right) \right]$$

Fuente: RODRIGUEZ, Julio. *Modelización de la incidencia del Oxígeno Disuelto y la Demanda Bioquímica de Oxígeno en la calidad del agua del estero Atascoso, cantón Quevedo*, pp.46-47.

Anexo 3. **Criterios para interpretar los coeficientes de correlación.**

| Coefficiente de correlación | Interpretación |
|------------------------------------|-----------------------|
| $r=1$ | Correlación perfecta |
| $0.8 < r < 1$ | Correlación muy alta |
| $0.6 < r \leq 0.8$ | Correlación alta |
| $0.40 < r < 0.6$ | Correlación moderada |
| $0.2 < r < 0.40$ | Correlación baja |
| $0 < r < 0.20$ | Correlación nula |

Fuente: QUIÑÓNEZ MARROQUÍN, Oscar, Axel. *Métodos Cuantitativos II Estadística Inferencial*. p.218.

Anexo 4. **Calificación del coeficiente de correlación**

| n | r | n | r |
|----------|------------------|-----------|-------------------|
| 5 | $\geq \pm 0.873$ | 18 | $\geq \pm 0.468$ |
| 6 | $\geq \pm 0.811$ | 19 | $\geq \pm 0.456$ |
| 7 | $\geq \pm 0.754$ | 20 | $\geq \pm 0.4444$ |
| 8 | $\geq \pm 0.707$ | 22 | $\geq \pm 0.423$ |
| 9 | $\geq \pm 0.666$ | 24 | $\geq \pm 0.404$ |
| 10 | $\geq \pm 0.632$ | 26 | $\geq \pm 0.388$ |
| 11 | $\geq \pm 0.602$ | 28 | $\geq \pm 0.374$ |
| 12 | $\geq \pm 0.576$ | 30 | $\geq \pm 0.361$ |
| 13 | $\geq \pm 0.553$ | 40 | $\geq \pm 0.312$ |
| 14 | $\geq \pm 0.532$ | 50 | $\geq \pm 0.279$ |
| 15 | $\geq \pm 0.514$ | 60 | $\geq \pm 0.254$ |
| 16 | $\geq \pm 0.497$ | 80 | $\geq \pm 0.22$ |
| 17 | $\geq \pm 0.482$ | 100 o más | $\geq \pm 0.196$ |

Fuente: QUIÑÓNEZ, MARROQUÍN; Oscar, Axel. *Métodos Cuantitativos II Estadística Inferencial*. p.219.

Anexo 5. Valores críticos de Z a un nivel de significancia establecido

| $1 - \alpha$ | α | $\alpha/2$ | $Z_{\alpha/2}$ |
|--------------|----------|------------|----------------|
| 0.90 | 0.10 | 0.05 | -1.645 |
| 0.95 | 0.05 | 0.025 | -1.96 |
| 0.99 | 0.01 | 0.005 | -2.575 |

Fuente: CARVAJAL, Mayra. *Apuntes de estadística*, 2017. p.24.

Anexo 6. Ejemplo de metodología para ANDEVA de un factor: diseño completamente aleatorizado con desigualdad de observaciones

En este caso, al igual que en el ejemplo No. 1, se trabaja un factor, pero cada tratamiento tiene diferente número de observaciones esto es lo que se conoce como desigualdad de observaciones.

Se efectuó un experimento con el fin de comparar la eficacia de tres programas de capacitación, A, B y C, para los ensambladores de una pieza de equipo electrónico. Se asignaron al azar los empleados a los distintos programas.

Después de que terminó el curso se le pidió a cada persona ensamblar un grupo igual de piezas y se registró el tiempo que les tomaba completar la operación.

Los datos obtenidos de los tiempos en segundos se muestran a continuación:

| programa de capacitación | | | | | | |
|---------------------------------|----|----|----|----|----|----|
| A | 59 | 64 | 57 | 62 | 60 | 53 |
| B | 52 | 58 | 54 | 56 | | |
| C | 58 | 65 | 71 | 63 | 64 | |

¿Los datos aportan evidencia suficiente para concluir que los tiempos medios de ensamble de las personas capacitadas con cada uno de los tres programas son diferentes? $\alpha = 0.01$

Continuación del anexo 6.

Solución:

1. Planteamiento de hipótesis:

$$H_0: \alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3$$

H1: al menos una de las α_i es diferente.

2. Nivel de significancia: $\alpha = 0.01$

3. Valor de prueba:

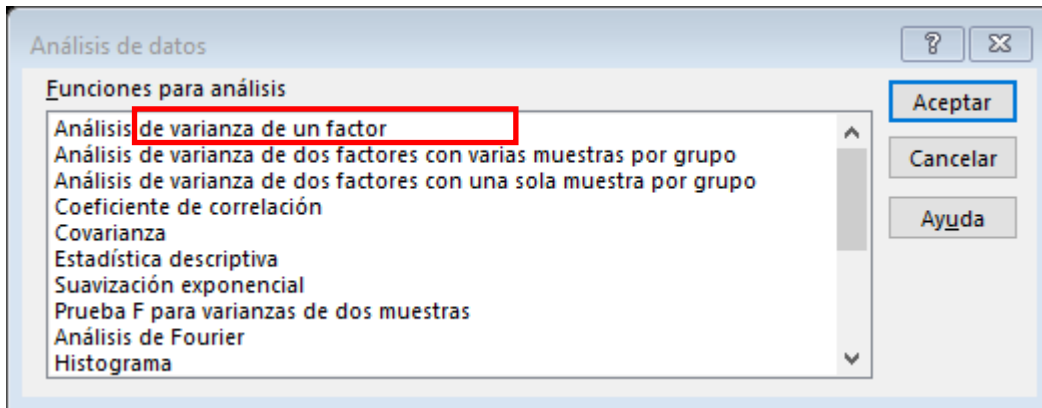
El valor de prueba corresponde a una distribución F de Fisher, este valor se calcula utilizando el complemento Análisis de datos de Excel, para lo cual se tiene el procedimiento siguiente:

1ero. Se ingresan los datos a una hoja de datos nueva:

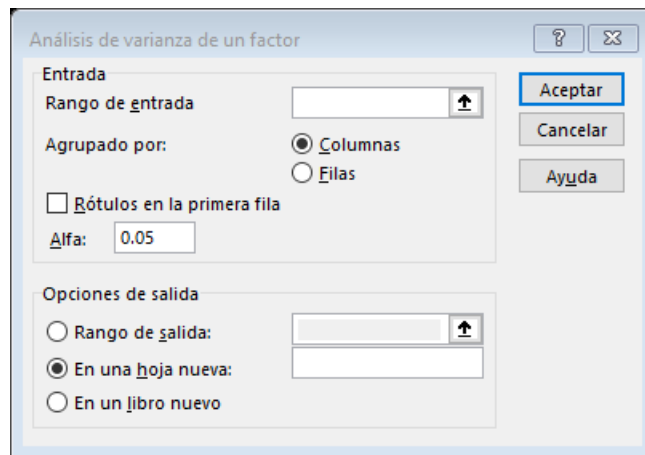
| | A | B | C | D | E | F | G | H | I |
|---|---|---|----|----|----|----|----|----|---|
| 1 | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | |
| 3 | | A | 59 | 64 | 57 | 62 | 60 | 53 | |
| 4 | | B | 52 | 58 | 54 | 56 | | | |
| 5 | | C | 58 | 65 | 71 | 63 | 64 | | |
| 6 | | | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | | | |
| 9 | | | | | | | | | |

Continuación del anexo 6.

2do. Ingresar a Análisis de datos opción Análisis de un factor y Aceptar

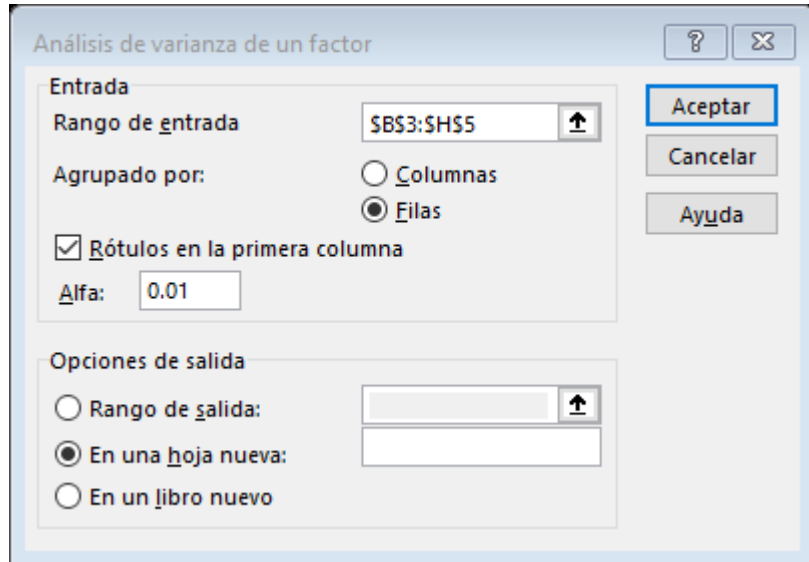


3ero. Ingresar los datos a la ventana que se habilita:



En rango de entrada se colocan todos los datos ingresados incluyendo sus encabezados, se coloca un cheque en Rótulos en la primera Columna, porque esta vez los datos forman filas, en Alfa se cambia a 0.01 para este caso pues es el valor que pide la prueba, y la opción de salida siempre en hoja nueva, se revisa y se oprima aceptar.

Continuación del anexo 6.



4to. Se obtiene el siguiente despliegue, (aquí se muestra habiendo ajustado el ancho de las columnas)

| Análisis de varianza de un factor | | | | | | |
|-----------------------------------|-------------------|--------------------|---------------------------|------------|--------------|----------------------|
| RESUMEN | | | | | | |
| Grupos | Cuenta | Suma | Promedio | Varianza | | |
| A | 6 | 355 | 59.16666667 | 14.9666667 | | |
| B | 4 | 220 | 55 | 6.66666667 | | |
| C | 5 | 321 | 64.2 | 21.7 | | |
| ANÁLISIS DE VARIANZA | | | | | | |
| Origen de las variaciones | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Promedio de los cuadrados | F | Probabilidad | Valor crítico para F |
| Entre grupos | 191.3 | 2 | 95.65 | 6.31932465 | 0.013347075 | 6.92660814 |
| Dentro de los grupos | 181.6333333 | 12 | 15.13611111 | | | |
| Total | 372.9333333 | 14 | | | | |

El RESUMEN muestra cuales son los valores promedio, conteo y varianza para cada una de las plantas.

Y en el siguiente despliegue se obtienen los valores para realizar el Análisis de varianza por medio de una F-Fisher

Continuación del anexo 6.

El valor que está debajo de F es el valor de prueba y el de la última columna es el valor crítico

| ANÁLISIS DE VARIANZA | | | | | | |
|---------------------------|-------------------|--------------------|---------------------------|------------|--------------|----------------------|
| Origen de las variaciones | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Promedio de los cuadrados | F | Probabilidad | Valor crítico para F |
| Entre grupos | 191.3 | 2 | 95.65 | 6.31932465 | 0.013347075 | 6.92660814 |
| Dentro de los grupos | 181.6333333 | 12 | 15.13611111 | | | |
| Total | 372.9333333 | 14 | | | | |

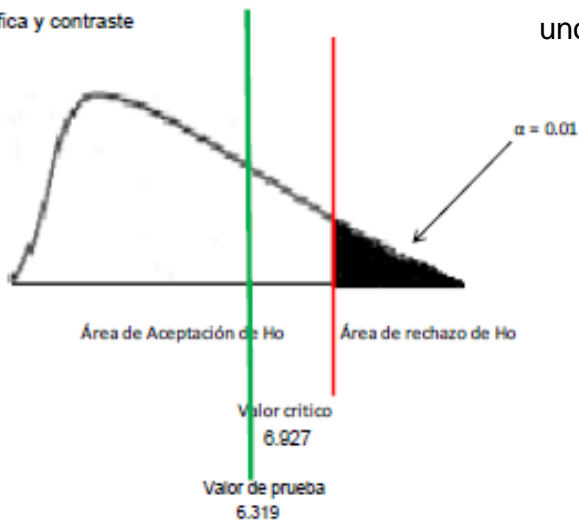
Se tiene entonces: $F_p = 6.319$

4. Valor Crítico: $F_c = 6.927$

5. Gráfica y contraste

6. Conclusión: con una significancia de 0.01 se acepta la hipótesis nula, teniendo evidencia estadística para afirma que no existe diferencia entre los tiempos medios de ensamble de las personas capacitadas con cada uno de los tres programas

5. Gráfica y contraste



Fuente: AGUILAR, María, *Análisis de Varianza*. pp.1-4 .

Anexo 7. Datos del laboratorio de la primera corrida de DBO, DQO Y OD del río Pantaleón



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



ANÁLISIS DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO⁶ (D.B.O.⁶)
DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO(D.Q.O.), OXÍGENO DISUELTU

No. 4173

Orden de trabajo No.: **35198**

Informe No. **2178**

| | | | |
|----------------------|--|---|---|
| INTERESADO: | LUIS MIGUEL MARTÍNEZ MORALES, CARNÉ No. 200924755 | PROYECTO: | DISEÑO DE INVESTIGACIÓN: "ELABORACIÓN DE UN SIMULADOR PARA EL CÁLCULO DE LA DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES EN RÍOS EN FUNCIÓN DE LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO Y DEL OXÍGENO DISUELTU, RÍO PANTALEÓN" |
| MUESTRA CAPTADA POR: | Interesado | DEPENDENCIA: | FACULTAD DE INGENIERIA/USAC |
| MUESTRA CAPTADA EN: | Río Pantaleón | FECHA DE RECOLECCIÓN DE LA MUESTRA: | 2015-08-19, 08 h 00 min. |
| FUENTE: | Agua del río punto A | FECHA Y HORA DE LLEGADA AL LABORATORIO: | 2015-08-19, 11 h 59 min. |
| MUNICIPIO: | Sigüeiná | CONDICIONES DE TRANSPORTE: | sin refrigeración |
| DEPARTAMENTO: | Escuintla | | |

DETERMINACIONES QUÍMICAS

| | | |
|---|-------|------|
| DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (D.B.O. ₅): | 03.00 | mg/L |
| DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (D.Q.O.): | 03.00 | mg/L |

OTRAS DETERMINACIONES: Oxígeno Disuelto 08.14 mg/L

TÉCNICAS DEL "STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER" DE LA APILA - A.W.W.A - W.E.F. 21th EDITION 2005 NORMA COGUANOR NGO 4-010 SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES.

Guatemala, 2015-08-31



Vo.Bo.
Inga Telma Maricela Cego Méndez
DIRECTORA CIENIAC



Zenón Much Santos
Ing. Químico Col. No. 420
MSc. en Ingeniería Sanitaria
Jefe Técnico Laboratorio

FACULTAD DE INGENIERIA -USAC-
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86208 y 86221 Fax: 2418-9121
Página web: <http://ci.usac.edu.gt>

Continuación del anexo 7.



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



**ANÁLISIS DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO⁶ (D.B.O.⁶)
DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO(D.Q.O.), OXÍGENO DISUELTO**

No. 4169

Orden de trabajo No.: **35198**

Informe No.: **2179**

| | | | |
|----------------------|--|---|--|
| INTERESADO: | LUIS MIGUEL MARTÍNEZ MORALES, CARNÉ No. 200924755 | PROYECTO: | DISEÑO DE INVESTIGACIÓN: "ELABORACIÓN DE UN SIMULADOR PARA EL CÁLCULO DE LA DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES EN RÍOS EN FUNCIÓN DE LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO Y DEL OXÍGENO DISUELTO, RÍO PANTALÓN" |
| MUESTRA CAPTADA POR: | Interesado | DEPENDENCIA: | FACULTAD DE INGENIERÍA/USAC |
| MUESTRA CAPTADA EN: | Río Pantalcón | FECHA DE RECOLECCIÓN DE LA MUESTRA: | 2015-08-19; 08 h 15 min |
| FUENTE: | Agua del río guato B | FECHA Y HORA DE LLEGADA AL LABORATORIO: | 2015-08-19; 11 h 59 min |
| MUNICIPIO: | Siquinalá | CONDICIONES DE TRANSPORTE: | Sin refrigeración |
| DEPARTAMENTO: | Escuintla | | |

DETERMINACIONES QUÍMICAS

| | | |
|--|-------|------|
| DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (D.B.O. ₅) | 01.00 | mg/L |
| DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (D.Q.O.) | 02.00 | mg/L |

OTRAS DETERMINACIONES: Oxígeno Disuelto 09.24 mg/L

TÉCNICAS DEL "STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER" DE LA A.P.S.L.A. - A.W.W.A. - W.E.F. 21TH EDITION 2005. NORMA COGUANOR NDC 4-010 SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES

Guatemala, 2015-08-31



Vs. Edo.
Inga Taina Mariela Cazo Morales
DIRECTORA CIO/USAC



Zenón Michel Cordero
Ing. Químico Col. No. 420
MSc. en Ingeniería Sanitaria
Jefe Técnico Laboratorio



FACULTAD DE INGENIERÍA - USAC -
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo: 2418-0115, Plania: 2418-8000 Ext. 86209 y 86221 Fax: 2418-0121
Página web: <http://ci.usac.edu.gt>

Continuación del anexo 7.



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



**ANÁLISIS DEMANDA BIQUÍMICA DE OXÍGENO⁶ (D.B.O.⁶)
DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO(D.Q.O.), OXÍGENO DISUELTO**

No. 4170

Orden de trabajo No.: 35198

Informe No. 2180

| | | | |
|----------------------|--|---|---|
| INTERESADO: | LUIS MIGUEL MARTÍNEZ MORALES, CARNE No. 200924755 | PROYECTO: | DISEÑO DE INVESTIGACIÓN: "ELABORACIÓN DE UN SIMULADOR PARA EL CÁLCULO DE LA DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES EN RÍOS EN FUNCIÓN DE LA DEMANDA BIQUÍMICA DE OXÍGENO Y DEL OXÍGENO DISUELTO, RÍO PANTALÓN" |
| MUESTRA CAPTADA POR: | Interesado | DEPENDENCIA: | FACULTAD DE INGENIERIA/USAC |
| MUESTRA CAPTADA EN: | Río Pantalón | FECHA DE RECOLECCIÓN DE LA MUESTRA: | 2015-08-19; 08 h 30 min. |
| FUENTE: | Agua del río punto C. | FECHA Y HORA DE LLEGADA AL LABORATORIO: | 2015-08-19; 11 h 59 min. |
| MUNICIPIO: | Siquinalá | CONDICIONES DE TRANSPORTE: | Sim refrigeración |
| DEPARTAMENTO: | Escuintla | | |

DETERMINACIONES QUÍMICAS

| | | |
|--|-------|------|
| DEMANDA BIQUÍMICA DE OXÍGENO (D.B.O. ₅): | 01.00 | mg/L |
| DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (D.Q.O.): | 01.00 | mg/L |

OTRAS DETERMINACIONES: Oxígeno Disuelto: 08,70 mg/L.

TÉCNICAS DEL "STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER" DE LA A.P.H.A. - A.W.W.A. - W.E.F. 21ST EDITION 2005. NORMA COGUANOR INGO 4.010 SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES

Guatemala, 2015-08-31



Irma Tolma Maricela Casar Morales
DIRECTORA CIUSAC



ZULEY WACH SANDOZ
Ing. Químico Col. N.º. 420
MSc. en Ingeniería Sanitaria
Jefe Técnico Laboratorio

FACULTAD DE INGENIERIA --USAC--
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Ext. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121
Página web: <http://ci.usac.edu.gt>

Continuación del anexo 7.



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



**ANÁLISIS DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO^s (D.B.O.^s)
DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO(D.Q.O), OXÍGENO DISUELTO**

No. 4171

Orden de trabajo No.: **35198**

Informe No. **2181**

| | | | |
|----------------------|--|---|---|
| INTERESADO: | LUIS MIGUEL MARTÍNEZ MORALES, CARNÉ No. 206624755 | PROYECTO: | DISEÑO DE INVESTIGACIÓN: "ELABORACIÓN DE UN SIMULADOR PARA EL CÁLCULO DE LA DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES EN RÍOS EN FUNCIÓN DE LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO Y DEL OXÍGENO DISUELTO, RÍO PANTALEÓN" |
| MUESTRA CAPTADA POR: | Interesado | DEPENDENCIA: | FACULTAD DE INGENIERIA/USAC |
| MUESTRA CAPTADA EN: | Río Pantaleón | FECHA DE RECOLECCIÓN DE LA MUESTRA: | 2015-08-19, 08 h 45 min. |
| FUENTE: | Agua del río punto D | FECHA Y HORA DE LLEGADA AL LABORATORIO: | 2015-08-19, 11 h 59 min. |
| MUNICIPIO: | Siquinalá | CONDICIONES DE TRANSPORTE: | Sin refrigeración |
| DEPARTAMENTO: | Escuintla | | |

DETERMINACIONES QUÍMICAS

| | | |
|---|-------|-------|
| DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (D.B.O. ₅): | 01.00 | mg/l. |
| DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (D.Q.O.): | 01.00 | mg/l. |

OTRAS DETERMINACIONES: Oxígeno Disuelto 07.93 mg/l.

TÉCNICAS DEL "STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER" DE LA A.P.H.A. - A.W.W.A. - W.E.F. 21^{ra} EDITION 2005. NORMA COGUANOR NGO 4.010 SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES.

Guatemala, 2015-08-31

Vc. Do.

Inga. Telsa Maricela Cano Morales
DIRECTORA CIVUSAC




Zepherino Sánchez
Ing. Químico Col. No. 420
MS. en Ingeniería Sanitaria
Jefe Técnico Laboratorio



FACULTAD DE INGENIERIA --USAC--
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo: 2418-9115. Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121
Página web: <http://ci.usac.edu.gt>

Continuación del anexo 7.



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



ANÁLISIS DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO⁶ (D.B.O.⁶)
DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO(D.Q.O), OXÍGENO DISUELTO

No. 4172

Orden de trabajo No.: **35198**

Informe No. **2182**

| | | | |
|----------------------|--|---|--|
| INTERESADO: | LUIS MIGUEL MARTÍNEZ MORALES, CARNE No. 200924755 | PROYECTO: | DISEÑO DE INVESTIGACIÓN: "ELABORACION DE UN SIMULADOR PARA EL CALCULO DE LA DISPERSION DE CONTAMINANTES EN RIOS EN FUNCION DE LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXIGENO Y DEL OXIGENO DISUELTO, RIO PANTALÓN" |
| MUESTRA CAPTADA POR: | Interesado | DEPENDENCIA: | FACULTAD DE INGENIERIA USAC |
| MUESTRA CAPTADA EN: | Rio Pantalón | FECHA DE RECOLECCIÓN DE LA MUESTRA: | 2015-08-19; 09 h 00 min. |
| FUENTE: | Agua del río puesto E | FECHA Y HORA DE LLEGADA AL LABORATORIO: | 2015-08-19; 11 h 59 min. |
| MUNICIPIO: | Siquinalá | CONDICIONES DE TRANSPORTE: | Sin refrigeración |


DETERMINACIONES QUÍMICAS

| | | |
|---|-------|-------|
| DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (D.B.O. ₆): | 01.00 | mg/l. |
| DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (D.Q.O.): | 01.00 | mg/l. |

OTRAS DETERMINACIONES: Oxígeno Disuelto 08,70 mg/l.

TÉCNICAS DEL "STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER" DE LA A.P.H.A. - A.W.W.A. - W.E.P. 21TH EDITION 2005. NORMA COGUANOR NGO 4-040 SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES.

Guatemala, 2015-08-31



No. B6
Inga Tzuc Maricela Casco Morales
DIRECTORA CIBUSAC



Zenob Nuch Santos
Ing. Químico Col. No. 420
MSc. en Ingeniería Sanitaria
Jefe Técnico Laboratorio

FACULTAD DE INGENIERIA –USAC–
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo: 2418-9113, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121
Página web: <http://ci.usac.edu.gt>

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Anexo 8. Datos del laboratorio de la segunda corrida de DBO, DQO Y OD del río Pantaleón



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**


2

ANÁLISIS DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO⁵ (D.B.O.⁵)
DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO(D.Q.O), OXÍGENO DISUELTO

No. 4217

| | | | |
|------------------------------------|--|--|---|
| Orden de trabajo No.: 35198 | | Informe No. 2187 | |
| INTERESADO: | LUIS MIGUEL MARTÍNEZ MORALES, CARNE No. 200924753 | PROYECTO: | DISEÑO DE INVESTIGACIÓN: "ELABORACIÓN DE UN SIMULADOR PARA EL CÁLCULO DE LA DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES EN RÍOS EN FUNCIÓN DE LA DEMANDA BIOQUÍMICA EN OXÍGENO Y DEL OXÍGENO DISUELTO, RÍO PANTALEÓN" |
| MUESTRA CAPTADA POR: | Interesado | DEPENDENCIA: | FACULTAD DE INGENIERIA/USAC |
| MUESTRA CAPTADA EN: | Río Pantaleón | FECHA Y HORA DE RECOLECCIÓN DE LA MUESTRA: | 2015-10-06, 07 h 00 min |
| FUENTE: | Punto 1 | FECHA Y HORA DE LLEGADA AL LABORATORIO: | 2015-10-06, 10 h 57 min |
| MUNICIPIO: | Sigüitá | CONDICIONES DE TRANSPORTE: | sin refrigeración |
| DEPARTAMENTO: | Escuintla | | |

DETERMINACIONES QUÍMICAS

| | | |
|--|-------|------|
| DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (D.B.O.) | 07.00 | mg/L |
| DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (D.Q.O.) | 03.00 | mg/L |

OTRAS DETERMINACIONES: Temperatura 28.5°C, Oxígeno Disuelto 07.95 mg/L

TÉCNICAS DEL "STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER" DE LA A.P.H.A. - A.W.W.A. - W.E.P. 21TH EDITION 2005. NORMA COGUANOR INGO 4010 SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES.

Guatemala, 2015-10-29

Va. Ba.

Inga. Telsa Mucio Cano Morales
DIRECTORA CI/USAC



Zelen Yuch Carrizo
Ing. Químico Col. No. 420
MSc. en Ingeniería Sanitaria
Jefe Técnico Laboratorio



FACULTAD DE INGENIERIA – USAC –
Edificio I-5, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-9200 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121
Página web: <http://ci.usac.edu.gt>

Continuación del anexo 8.



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



**ANÁLISIS DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO⁵ (D.B.O.⁵)
DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO(D.Q.O.), OXÍGENO DISUERTO**

No. 4218

Orden de trabajo No.: **35198**

Informe No. **2 188**

| | | | |
|----------------------|--|---|---|
| INTERESADO: | LUIS MIGUEL MARTÍNEZ MORALES, CARNÉ No. 200924755 | PROYECTO: | DISEÑO DE INVESTIGACIÓN "ELABORACIÓN DE UN SIMULADOR PARA EL CÁLCULO DE LA DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES EN RÍOS EN FUNCIÓN DE LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO Y DEL OXÍGENO DISUERTO, RÍO PANTALÓN" |
| MUESTRA CAPTADA POR: | Interesado | DEPENDENCIA: | FACULTAD DE INGENIERIA/USAC |
| MUESTRA CAPTADA EN: | Río Pantalón | FECHA DE RECOLECCIÓN DE LA MUESTRA: | 2015-10-06, 07 h 30 min |
| FUENTE: | Punto 2 | FECHA Y HORA DE LLEGADA AL LABORATORIO: | 2015-10-06, 10 h 57 min |
| MUNICIPIO: | Siquinalá | CONDICIONES DE TRANSPORTE: | sin refrigeración |
| DEPARTAMENTO: | Escuintla | | |

DETERMINACIONES QUÍMICAS

| | | |
|--|-------|------|
| DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (D.B.O. ₅) | 05.50 | mg/L |
| DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (D.Q.O. ₅) | 09.00 | mg/L |

OTRAS DETERMINACIONES: Temperatura 29.4°C, Oxígeno Disuelto 07.25 mg/L

TÉCNICAS DEL "STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER" DE LA A.P.H.A. - A.W.W.A. - W.E.F. 21TH EDITION 2005. NORMA COGUANOR NOO-4-010 SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES.

Guatemala, 2015-10-29

Va.Bo.

Inga. Yelma Maricela Cazo Merales

DIRECTORA /USAC



[Signature]

Zelma Maricela Cazo Merales

Ing. Químico Col. No. 420

MSc. en Ingeniería Sanitaria

Jefe Técnico Laboratorio



FACULTAD DE INGENIERIA – USAC –
Edificio T-3, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 80209 y 80221 Fax: 2418-8121
Página web: <http://oi.usac.edu.gt>

Continuación del anexo 8.



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



**ANÁLISIS DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO^o (D.B.O.^o)
DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (D.Q.O.), OXÍGENO DISUELTU**

No. 4219

Orden de trabajo No.: 35198

Informe No. 2189

| | | | |
|----------------------|--|--|---|
| INTERESADO: | LUIS MIGUEL MARTÍNEZ MORALES, CARNÉ No. 206024755 | PROYECTO: | DISEÑO DE INVESTIGACIÓN – ELABORACIÓN DE UN SIMULADOR PARA EL CÁLCULO DE LA DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES EN RÍOS EN FUNCIÓN DE LA DEMANDA BIOQUÍMICA DEL OXÍGENO Y DEL OXÍGENO DISUELTU, RÍO PANTALEÓN |
| MUESTRA CAPTADA POR: | Interesado | DEPENDENCIA: | FACULTAD DE INGENIERIA/USAC |
| MUESTRA CAPTADA EN: | Río Pantaleón | FECHA DE RECOLECCIÓN DE LA MUESTRA: | 2015-10-06, 08 h 00 min. |
| FUENTE: | Punto 3 | FECHA Y HORA DE LLEGADA AL LABORATORIO: | 2015-10-06, 10 h 57 min. |
| MUNICIPIO: | Sigüinalá | CONDICIONES DE TRANSPORTE: | sin refrigeración |
| DEPARTAMENTO: | Escuintla | | |

DETERMINACIONES QUÍMICAS

| | | |
|--|-------|-------|
| DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (D.B.O. ₅) | 07.00 | mg/l. |
| DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (D.Q.O. ₅) | 17.00 | mg/l. |

OTRAS DETERMINACIONES: Temperatura 33 °C, Oxígeno Disuelto 07.54 mg/l.

TÉCNICAS DEL "STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER" DE LA APHA - A.W.W.A. - W.E.P. 21TH EDITION 2005. NORMA COGUANOR NCO 4.010 SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES.

Guatemala, 2015-10-29

Va.Bo.

Inga. Teles Maritza Cano Morales
DIRECTORA C/USAC



Zelmar Much Gómez
Ing. Químico Col. No. 420
MSc. en Ingeniería Sanitaria
Jefe Técnico Laboratorio



FACULTAD DE INGENIERIA –USAC–
Edificio T-0, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo: 2418-9115, Plania: 2418-8000 Exts. 86208 y 86221 Fax: 2418-9121
Página web: <http://oi.usac.edu.gt>

Continuación del anexo 8.



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



**ANÁLISIS DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO^o (D.B.O.^o)
DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO(D.Q.O.), OXÍGENO DISUELTO**

No. 4220

Orden de trabajo No.: **35198**

Informe No. **2190**

| | | | |
|----------------------|--|---|---|
| INTERESADO: | LUIS MIGUEL MARTÍNEZ MORALES, CARNE No. 206924733 | PROYECTO: | DISEÑO DE INVESTIGACIÓN: "ELABORACIÓN DE UN SIMULADOR PARA EL CÁLCULO DE LA DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES EN RÍOS EN FUNCIÓN DE LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO Y DEL OXÍGENO DISUELTO, RÍO PANTALEÓN" |
| MUESTRA CAPTADA POR: | Interesado | DEPENDENCIA: | FACULTAD DE INGENIERIA/USAC |
| MUESTRA CAPTADA EN: | Río Pantaleón | FECHA DE RECOLECCIÓN DE LA MUESTRA: | 2015-10-06, 08 h 20 min. |
| FUENTE: | Punto 4 | FECHA Y HORA DE LLEGADA AL LABORATORIO: | 2015-10-06, 10 h 57 min. |
| MUNICIPIO: | Siquinalá | CONDICIONES DE TRANSPORTE: | sin refrigeración |
| DEPARTAMENTO: | Escuintla | | |

DETERMINACIONES QUÍMICAS

| | | |
|--|-------|------|
| DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (D.B.O. ₅) | 12.00 | mg/L |
| DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (D.Q.O.) | 58.00 | mg/L |

OTRAS DETERMINACIONES: Temperatura 36.04 °C, Oxígeno Disuelto: 07.08 mg/L

TÉCNICAS DEL "STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER" DE LA A.P.H.A. - A.W.W.A. - W.E.F. 21th EDITION 2.005 NORMA COGUANOR NCG-4.010 SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES.

Guatemala, 2015-10-29

Vo.Bo.

[Firma]

Inga. Tetra Mariana Cazo Morales
DIRECTORA CI/USAC



[Firma]

ZORRO MUCH SAUTOS
Ing. Químico Col. No. 420
MSd. en Ingeniería Sanitaria
Jefe Técnico Laboratorio



FACULTAD DE INGENIERIA - USAC -
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121
Página web: <http://ci.usac.edu.gt>

Continuación del anexo 8.



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



ANÁLISIS DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO⁵ (D.B.O.⁵)
DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (D.Q.O.), OXÍGENO DISUELTU

No. 4221

Orden de trabajo No.: 35198

Informe No. 2191

| | | | |
|----------------------|--|---|--|
| INTERESADO: | LUIS MIGUEL MARTÍNEZ MORALES CARNÉ No. 20024755 | PROYECTO: | DISEÑO DE INVESTIGACIÓN "ELABORACIÓN DE UN SIMULADOR PARA EL CÁLCULO DE LA DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES EN RÍOS EN FUNCIÓN DE LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO Y DEL OXÍGENO DISUELTU, RÍO PANTALEÓN" |
| MUESTRA CAPTADA POR: | Interesado | DEPENDENCIA: | FACULTAD DE INGENIERIA USAC |
| MUESTRA CAPTADA EN: | Río Pantaleón | FECHA DE RECOLECCIÓN DE LA MUESTRA: | 2015-10-06, 09 h 00 min. |
| FUENTE: | Punto 5 | FICHA Y HORA DE LLEGADA AL LABORATORIO: | 2015-10-06, 10 h 57 min. |
| MUNICIPIO: | Sigüesalá | CONDICIONES DE TRANSPORTE: | sin refrigeración |
| DEPARTAMENTO: | Escuintla | | |

DETERMINACIONES QUÍMICAS

| | | |
|---|-------|-------|
| DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (D.B.O. ₅): | 07.65 | mg/l. |
| DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (D.Q.O.): | 24.00 | mg/l. |

OTRAS DETERMINACIONES: Temperatura 33.08 °C, Oxígeno Disuelto 07.73 mg/l.

TÉCNICAS DEL "STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER" DE LA A.P.H.A. - A.W.W.A. - W.E.F. 21ST EDITION 2005. NORMA COCULANOR NIGU 4.010 SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES.

Guatemala, 2015-10-29



Vo Bo
Inga. Teina Maricela Cans Morales
DIRECTORA C/USAC




Ing. Químico Col. No. 420
MSQ en Ingeniería Sanitaria
Jefe Técnico Laboratorio




FACULTAD DE INGENIERIA - USAC -
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-9200 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121
Página web: <http://ci.usac.edu.gt>

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Anexo 9. Datos del laboratorio de la tercera corrida de DBO, DQO Y OD del río Pantaleón



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**


3

**ANÁLISIS DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO⁶ (D.B.O.⁶)
DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (D.Q.O.), OXÍGENO DISUELTO** **No. 4264**

| | | | |
|------------------------------------|--|--|--|
| Orden de trabajo No.: 35198 | | Informe No.: 2192 | |
| INTERESADO: | LUIS MIGUEL MARTÍNEZ MORALES, CARNÉ No. 200924755 | PROYECTO: | DISEÑO DE INVESTIGACIÓN "ELABORACIÓN DE UN SIMULADOR PARA EL CÁLCULO DE LA DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES EN RÍOS EN FUNCIÓN DE LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO Y DEL OXÍGENO DISUELTO, RÍO PANTALEÓN" |
| MUESTRA CAPTADA POR: | Interesado | DEPENDENCIA: | FACULTAD DE INGENIERIA/USAC |
| MUESTRA CAPTADA EN: | Río Pantaleón | FECHA DE RECOLECCIÓN DE LA MUESTRA: | 2015-10-27, 08 h 00 min. |
| FUENTE: | Punto 1 | FECHA Y HORA DE LLEGADA AL LABORATORIO: | 2015-10-27, 12 h 13 min. |
| MUNICIPIO: | Sigüehá | CONDICIONES DE TRANSPORTE: | sin refrigeración |
| DEPARTAMENTO: | Escuintla | | |


DETERMINACIONES QUÍMICAS


| | | |
|--|-------|------|
| DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (D.B.O.) | 01,00 | mg/L |
| DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (D.Q.O.) | 02,00 | mg/L |

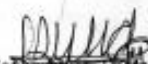
OTRAS DETERMINACIONES: Temperatura 25,80 °C, Oxígeno Disuelto 07,60 mg/L.


TECNICAS DEL "STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER" DE LA A.P.H.A. - A.W.W.A. - W.E.F. 21th EDITION 2.005. NORMA COGUANOR NGO-4.010 SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES.

Guatemala, 2016-02-02

Vo.Bo. 
Ing. Francisco Javier Osorio de la Cruz
DIRECTOR CIBUSAC




Zaida Patricia Guzmán
Ing. Zaida Patricia Guzmán Col. No. 420
MSc. en Ingeniería Sanitaria
Jefe Técnico Laboratorio



FACULTAD DE INGENIERÍA – USAC –
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo: 2418-8115, Planta: 2418-8000 Exts. 80209 y 80221 Fax: 2418-8121
Página web: <http://oi.usac.edu.gt>

Continuación del anexo 9.



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



**ANÁLISIS DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO⁶ (D.B.O.⁶)
DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO(D.Q.O), OXIGENO DISUELTO**

No. 4265

Orden de trabajo No.: **35198**

Informe No. **2193**

| | | | |
|----------------------|--|---|---|
| INTERESADO: | LUIS MIGUEL MARTÍNEZ MORALES, CARNÉ No. 200924755 | PROYECTO: | DISEÑO DE INVESTIGACIÓN: "ELABORACION DE UN SIMULADOR PARA EL CALCULO DE LA DISPERSION DE CONTAMINANTES EN RIOS EN FUNCION DE LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXIGENO Y DEL OXIGENO DISUELTO, RÍO PANTALEÓN" |
| MUESTRA CAPTADA POR: | Interesado | DEPENDENCIA: | FACULTAD DE INGENIERIA USAC |
| MUESTRA CAPTADA EN: | Río Pantaleón | FECHA DE RECOLECCION DE LA MUESTRA: | 2015-10-27, 08 h 40 min |
| FUENTE: | Punto 2 | FECHA Y HORA DE LLEGADA AL LABORATORIO: | 2015-10-27, 12 h 13 min |
| MUNICIPIO: | Siquinalá | CONDICIONES DE TRANSPORTE: | sin refrigeración |
| DEPARTAMENTO: | Escuintla | | |

DETERMINACIONES QUÍMICAS

| | | |
|--|--------|------|
| DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (D.B.O. ₅) | 00.80 | mg/L |
| DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (D.Q.O ₅) | -01.60 | mg/L |

OTRAS DETERMINACIONES: Temperatura 25.90 °C, Oxígeno Disuelto 07.80 mg/L.

TÉCNICAS DEL "STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER" DE LA A.P.H.A. - A.W.W.A. - W.E.F. 21^{ra} EDITION 2005. NORMA COGUANOR INGO 4.010 SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES

Guatemala, 2016-02-02

Vo.Bo.

[Firma]

Ing. Francisco Javier Quiñones de la Cruz
DIRECTOR CIUSAC

[Firma]

Zelmira Mich Solís
Ing. Químico Col. No. 420
MSc. en Ingeniería Sanitaria
Jefe Técnico Laboratorio




FACULTAD DE INGENIERIA - USAC -
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121
Página web: <http://ci.usac.edu.gt>

Continuación del anexo 9.



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



**ANÁLISIS DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO^o (D.B.O.^o)
DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (D.Q.O.), OXÍGENO DISUELTU** **No. 4266**

Orden de trabajo No.: 35198

Informe No. 2194

| | | | |
|-----------------------------|---|--|--|
| INTERESADO: | LUIS MIGUEL MARTINEZ MORALES CARNÉ No. 200924755 | PROYECTO: | DISEÑO DE INVESTIGACIÓN "ELABORACIÓN DE UN SIMULADOR PARA EL CÁLCULO DE LA DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES EN RÍOS EN FUNCIÓN DE LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO Y DEL OXÍGENO DISUELTU, RÍO PANTALEÓN" |
| MUESTRA CAPTADA POR: | Interesado | DEPENDENCIA: | FACULTAD DE INGENIERIA/USAC |
| MUESTRA CAPTADA EN: | Río Pantaleón | FECHA DE RECOLECCIÓN DE LA MUESTRA: | 2015-10-27, 09 h 00 min |
| FUENTE: | Punto 3 | FECHA Y HORA DE LLEGADA AL LABORATORIO: | 2015-10-27, 12 h 13 min |
| MUNICIPIO: | Siquinalá | CONDICIONES DE TRANSPORTE: | sin refrigeración |
| DEPARTAMENTO: | Escuintla | | |

DETERMINACIONES QUÍMICAS

| | | |
|--|-------|------|
| DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (D.B.O. ₅) | 00.50 | mg/L |
| DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (D.Q.O.) | 01.60 | mg/L |

OTRAS DETERMINACIONES: Temperatura 21.80 °C, Oxígeno Disuelto 08.37 mg/L

TÉCNICAS DEL "STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER" DE LA A.P.H.A. - A.W.W.A. - W.E.P. 21th EDITION 2.005. NORMA COGUANOR NGO 4.010 SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES

Guatemala, 2016-02-02

Vé. llo.

[Firma]
Ing. Francisco Javier Quiroz de la Cruz
DIRECTOR CIZUSAC



[Firma]
Zaira Mich Soles
Ing. Química Col. No. 420
MSc. en Ingeniería Sanitaria
Jefe Técnico Laboratorio



FACULTAD DE INGENIERIA -USAC-
Edificio F-5, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 96208 y 96221 Fax: 2418-9121
Página web: <http://ol.usac.edu.gt>

Continuación del anexo 9.



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



ANÁLISIS DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO^B (D.B.O.^B)
DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (D.Q.O.), OXÍGENO DISUELTO

No. 4267

Orden de trabajo No.: 35198

Informe No. 2195

| | | | |
|----------------------|---|---|---|
| INTERESADO: | LUIS MIGUEL MARTÍNEZ MORALES, CARNÉ No. 200924755. | PROYECTO: | DISEÑO DE INVESTIGACIÓN: "ELABORACIÓN DE UN SIMULADOR PARA EL CÁLCULO DE LA DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES EN RÍOS EN FUNCIÓN DE LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO Y DEL OXÍGENO DISUELTO, RÍO PANTALEÓN" |
| MUESTRA CAPTADA POR: | Interesado | DEPENDENCIA: | FACULTAD DE INGENIERIA/USAC |
| MUESTRA CAPTADA EN: | Río Pantaleón | FECHA DE RECOLECCIÓN DE LA MUESTRA: | 2015-10-27, 09 h 25 min. |
| FUENTE: | Punto 4 | FECHA Y HORA DE LLEGADA AL LABORATORIO: | 2015-10-27, 12 h 13 min. |
| MUNICIPIO: | Siquinalá | CONDICIONES DE TRANSPORTE: | sin refrigeración |
| DEPARTAMENTO: | Escuintla | | |

DETERMINACIONES QUÍMICAS

| | | |
|--|-------|------|
| DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (D.B.O. ^B) | 00,90 | mg/l |
| DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (D.Q.O.) | 01,50 | mg/l |

OTRAS DETERMINACIONES: Temperatura 25,60 °C, Oxígeno Disuelto 09,95 mg/l.

TECNICAS DEL "STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER" DE LA A.P.H.A. - A.W.W.A. - W.E.F. 21^{ra} EDITION 2005. NORMA COGUANOR NGO-4-010 SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES.

Guatemala, 2016-02-02

Vo.Bo. 
Ing. Francisco Javier Gómez de la Cruz
DIRECTOR CIPUSAC




Ing. Quirich Col. No. 4267
MSc. en Ingeniería Sanitaria
Jefe Técnico Laboratorio



FACULTAD DE INGENIERIA - USAC -
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86208 y 86221 Fax: 2418-9121
Página web: <http://ci.usac.edu.gt>

Continuación del anexo 9.



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



**ANÁLISIS DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO⁵ (D.B.O.⁵)
DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (D.Q.O.), OXÍGENO DISUELTO**

No. 4258

Orden de trabajo No.: **35198**

Informe No.: **2196**

| | | | |
|----------------------|--|---|---|
| INTERESADO: | LUIS MIGUEL MARTÍNEZ MORALES, CARNÉ No. 200904755 | PROYECTO: | DISEÑO DE INVESTIGACIÓN: "ELABORACIÓN DE UN SIMULADOR PARA EL CÁLCULO DE LA DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES EN RÍOS EN FUNCIÓN DE LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO Y DEL OXÍGENO DISUELTO, RÍO PANTALEÓN" |
| MUESTRA CAPTADA POR: | Interesado | DEPENDENCIA: | FACULTAD DE INGENIERÍA/USAC |
| MUESTRA CAPTADA EN: | Río Pantaleón | FECHA DE RECOLECCIÓN DE LA MUESTRA: | 2015-10-27, 09 h 50 min. |
| FUENTE: | Punto 5 | FECHA Y HORA DE LLEGADA AL LABORATORIO: | 2015-10-27, 12 h 13 min. |
| MUNICIPIO: | Siquinalá | CONDICIONES DE TRANSPORTE: | sin refrigeración |
| DEPARTAMENTO: | Escuintla | | |

DETERMINACIONES QUÍMICAS

| | | |
|---|-------|------|
| DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (D.B.O. ₅): | 01.00 | mg/L |
| DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (D.Q.O.): | 02.00 | mg/L |

OTRAS DETERMINACIONES: Temperatura 26.40 °C, Oxígeno Disuelto 10.50 mg/L

TÉCNICAS DEL "STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER" DE LA A.P.H.A. - A.W.W.A. - W.E.F. 21ST EDITION 2005. NORMA COGUANOR NGO-4.010 SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES.

Guatemala, 2016-02-02

Vo.Bo.



Ing. Francisco José Quiroga de la Cruz
DIRECTOR CI/USAC





Zulema Yvonne Solís
Ing. Química Col. No. 420
MSc. en Ingeniería Sanitaria
Jefe Técnico Laboratorio



FACULTAD DE INGENIERÍA – USAC –
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-9000 Exts. 95209 y 95221 Fax: 2418-9121
Página web: <http://ci.usac.edu.gt>

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería.

