

**Maestría en Ingeniería Civil**

**EVALUACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE CARGAS CONTAMINANTES  
APORTADAS POR VERTIMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES EN UN  
HUMEDAL NATURAL, MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO  
COMPUTACIONAL HIDRÁULICO Y DE CALIDAD DE AGUA**

**Alexandra Marisol Jiménez Ramos**

**Bogotá, D.C., Enero de 2018**



**EVALUACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE CARGAS CONTAMINANTES  
APORTADAS POR VERTIMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES EN UN  
HUMEDAL NATURAL, MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO  
COMPUTACIONAL HIDRÁULICO Y DE CALIDAD DE AGUA**

**Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con énfasis en  
Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente**

**Ing. Héctor Matamoros Rodríguez**

**Director**

**Bogotá, D.C., Enero de 2018**



La tesis de maestría titulada “**Evaluación de la evolución de cargas contaminantes aportadas por vertimientos aguas residuales en un humedal natural, mediante la implementación de un modelo computacional hidráulico y de calidad de agua**”, presentada por **Alexandra Marisol Jiménez Ramos**, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente.

Director de la tesis

Héctor Matamoros Rodríguez

Jurado

Germán Ricardo Santos Granados

Jurado

Jairo Alberto Romero Rojas

Bogotá, D.C., Enero de 2018

## Dedicatoria

Dedico este trabajo a Dios, padre sin ti nada de esto hubiera sido posible, me has enseñado a correr con perseverancia la carrera que tengo por delante (Hb. 12:1b).

A mi familia, especialmente mi mamá Lucy, sigo siendo el fruto de toda una vida de entrega incondicional e incansables esfuerzos.

A mi esposo Daniel, el motor de mi vida, tu apoyo e impulso para dar más de mi cada día, se refleja en este logro.

## Agradecimientos

Expreso con sinceridad mi agradecimiento a:

Mi director de proyecto, por la confianza, conocimiento y apoyo brindado para culminar este trabajo.

A los profesores de la Escuela Colombiana de Ingeniería, por la disciplina y excelencia inculcada.

A la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, por aportar los insumos necesarios para el desarrollo de este trabajo, así como, por el tiempo autorizado desde el inicio de este camino para dedicarme a alcanzar este logro.

## Resumen

De acuerdo con la literatura, en los sistemas naturales de humedal se destaca su contribución en la reducción de la contaminación del agua, sin embargo, en los programas desarrollados por las Autoridades Ambientales en Cundinamarca, en especial aquellos relacionados con los planes de manejo adoptados para estos ecosistemas lenticos, bajo ninguna circunstancia se admiten descargas de residuos líquidos tratados sobre su espejo de agua; esto sin que medie evidencia verídica y suficiente que demuestre hasta qué punto y bajo qué condiciones, dicho servicio ecosistémico puede ser aprovechado sosteniblemente en los humedales existentes.

En el marco de la situación expuesta, el presente estudio simuló el estado actual y el comportamiento asociado de un humedal natural frente a una descarga con carga orgánica ligada a un vertimiento tratado, mediante la implementación de un modelo hidráulico y de calidad de agua con el uso del software IBER 2D. Se empleó información secundaria existente en el Humedal La Florida Sector 2 con jurisdicción de los municipios de Cota y Funza e información primaria resultado de visitas y pruebas de laboratorio complementarias, para de esta forma analizar la capacidad de autodepuración y respuesta del humedal natural frente a la perturbación que representa el vertimiento de aguas residuales.

Para el montaje del modelo hidráulico se definió condiciones de frontera cerrados para la mayor parte del dominio y contornos abiertos, correspondientes a los puntos de entrada y salida del caudal, los primeros asociados a la recarga de agua a través de las alcantarillas existentes y el segundo, a la salida hacia la estación elevadora de tornillo del embalse La Isla. Se calculó para un año medio la producción de agua en la cuenca y en el dominio de estudio se implementó una malla no estructurada, considerada como la condición apropiada para la irregularidad de la geometría del humedal La Florida en el Sector 2.

Se plantearon para las condiciones de contorno e iniciales, tres escenarios definidos como: escenario 1, correspondiente a la condición inicial del humedal con el aporte exclusivo de agua de escorrentía; el escenario 2, tomando la condición inicial del humedal más el ingreso de agua procedente del Río Bogotá mediante la apertura de la compuerta en el canal Chicú, es decir, considerando la operación del Sistema Hidráulico de Manejo Ambiental y Control de Inundaciones La Ramada (SHMACI); y el escenario 3, el cual toma como base el escenario 2 más la simulación de una descarga de agua residual doméstica.

Posteriormente, se realizó el montaje del modelo de calidad para la simulación de los parámetros Demanda Bioquímica de Oxígeno Carbonosa (DBOC total), Oxígeno Disuelto (OD), Nitrógeno Amoniacal (N-NH<sub>3</sub>) y en forma de Nitratos (N-NO<sub>3</sub>); adoptando en primera instancia constantes cinéticas propuestas en la literatura, que en seguida tomando como punto de verificación los resultados de calidad de agua de una muestra a la salida del humedal, fueron ajustados con pruebas de ensayo y error hasta obtener una mejor aproximación a los resultados de las muestras de calidad existentes y tomadas en el humedal.

Los resultados del estudio permiten dar cuenta de las bondades y limitaciones del software IBER 2D como herramienta para la modelación hidráulica y evaluación de la evolución espacio - temporal de contaminantes en humedales naturales, así como, de la posibilidad para admitir descargas de efluentes tratados con tratamientos secundarios y terciarios en un humedal natural.

## Índice general

1. Introducción .....	18
1.1 Planteamiento del Problema .....	19
1.2 Justificación .....	20
1.3 Objetivos .....	22
1.3.1 General .....	22
1.3.2 Específicos .....	22
2. Estado del arte .....	23
2.1 Conceptos generales .....	23
2.1.1 Definición de humedal .....	23
2.1.2 Bienes y servicios ecosistémicos.....	25
2.1.3 Descarga en un humedal, definición conveniencia y limitaciones .....	26
2.1.4 Función Depuradora de los Humedales.....	27
2.2 Normatividad .....	33
2.2.1 Cuerpos lenticos .....	33
2.2.2 Vertimientos .....	34
2.3 Antecedentes Modelo IBER .....	35
2.4 Modelo numérico IBER.....	37
2.4.1 Ecuaciones.....	37
2.4.2 Condiciones de contorno .....	38
2.4.3 Esquemas numéricos .....	38
2.5 Módulo de calidad de aguas IBER .....	38
2.5.1 Términos fuente.....	40
2.5.2 Materia Orgánica Carbonosa.....	41
2.5.3 Nitrógeno.....	42
2.5.3.1 Nitrógeno amoniacal.....	42
2.5.3.2 Nitratos.....	43
2.5.4 Oxígeno disuelto .....	43
2.5.5 Reaireación.....	44
2.5.5.1 Demanda de oxígeno por el sedimento .....	46

2.5.5.2	Consumo de oxígeno en el proceso de nitrificación .....	47
3.	Caracterización del humedal.....	49
3.1	Aspectos generales de la cuenca.....	50
4.	Metodología.....	55
4.1	Fase de conocimiento y manejo del modelo.....	55
4.2	Fase de obtención y procesamiento de información primaria y secundaria .....	55
4.3	Fase de depuración y definición de información para el Modelo.....	56
4.3.1	Inventario de aportes en el humedal La Florida Sector 2.....	57
4.3.2	Datos de calidad de agua.....	60
4.4	Fase de implementación del modelo en el Humedal La Florida Sector 2.....	62
4.4.1	Condiciones hidrodinámicas .....	62
4.4.1.1	Balance hídrico .....	62
4.4.1.2	Definición de la geometría y rugosidad .....	70
4.4.1.3	Condiciones de contorno e iniciales .....	77
4.4.2	Montaje modelo de calidad .....	85
4.4.2.1	Demanda Bioquímica de Oxígeno Carbonosa (DBOC) .....	85
4.4.2.2	Demanda de oxígeno del sedimento (SOD).....	89
4.4.2.3	Oxígeno disuelto (OD).....	89
4.4.2.4	Nitrógeno N-NO <sub>3</sub> y N-NH <sub>3</sub> .....	90
4.4.3	Generación de mallado: IBER 2D.....	93
4.4.4	Selección de las constantes cinéticas.....	97
5.	Resultados.....	104
5.1	Escenario 1 Condición Inicial.....	104
5.2	Escenario 2 Apertura de la compuerta en el Canal Chicú .....	116
5.3	Escenario 3 Simulando una descarga de agua residual doméstica.....	130
6.	Conclusiones y recomendaciones .....	136
	Bibliografía .....	140
	Anexos.....	146

## Índice de cuadros

Cuadro 1.	Clasificación de humedales naturales interiores según Convención Ramsar ...	24
Cuadro 2.	Porcentajes de remoción de contaminantes de efluentes secundarios en humedales naturales .....	29
Cuadro 3.	Resumen de remoción de nutrientes en humedales naturales .....	29
Cuadro 4.	Mecanismos de remoción en humedales construidos.....	31
Cuadro 5.	Calidad de agua en humedales según Clase III del Acuerdo CAR 43 del 200633	
Cuadro 6.	Parámetros fisicoquímicos y valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de ARD y de las ARnD de los prestadores del servicio público de alcantarillado a cuerpos de agua superficiales (Art. 8 Resolución 631/2015) .....	34
Cuadro 7.	Valores de la demanda de oxígeno por el sedimento según el tipo de fondo (Thomann, 1972).....	47
Cuadro 8.	Climatología del humedal La Florida.....	51
Cuadro 9.	Geología Humedal La Florida.....	53
Cuadro 10.	Geomorfología Humedal La Florida .....	54
Cuadro 11.	Requerimientos de información hidráulicos, hidrológicos y de calidad .....	55
Cuadro 12.	Inventario de descargas de aguas lluvias y vertimientos Humedal La Florida Sector 2	57
Cuadro 13.	Aporte y extracción principal en el Humedal La Florida Sector 2.....	59
Cuadro 14.	Resultados de muestreos de calidad de agua en el Humedal La Florida sector 2 del estudio realizado por EPAM E.S.P. S.A. ....	61
Cuadro 15.	Resultados de muestreos de calidad de agua en el Humedal La Florida sector 2 realizados por el Laboratorio Ambiental de la CAR.....	61
Cuadro 16.	Estaciones y registros empleados para el balance hídrico de la cuenca en estudio	65
Cuadro 17.	Área de drenaje en el humedal La Florida Sector 2 .....	65

Cuadro 18. 66	Valores de precipitación y temperatura media mensual a emplear en este estudio	
Cuadro 19. Sector 2	Calculo de evapotranspiración potencial mensual media multianual La Florida	66
Cuadro 20.	Caudales de producción de agua en el humedal La Florida Sector 2 .....	68
Cuadro 21.	Literatura de coeficientes de Manning afectados por la existencia de la vegetación en un cuerpo de agua .....	73
Cuadro 22.	Coefficientes de Manning aplicados al modelo .....	76
Cuadro 23.	Condición de contorno e inicial - Escenario 1 .....	77
Cuadro 24.	Condición de contorno e inicial - Escenario 2 .....	80
Cuadro 25.	Condición de contorno e inicial – Escenario 3 .....	84
Cuadro 26.	Constante de degradación de materia orgánica carbonosa .....	86
Cuadro 27.	Cálculo de la Demanda Bioquímica de Oxígeno Carbonosa Total (DBOC <sub>0</sub> ) ..	87
Cuadro 28.	Condición de contorno e inicial DBOC .....	87
Cuadro 29.	Ingreso de datos de cálculo en IBER - DBOC .....	88
Cuadro 30.	Demanda de Oxígeno del Sedimento .....	89
Cuadro 31.	Concentraciones de Oxígeno Disuelto Ingresados al modelo .....	89
Cuadro 32.	Cálculo oxígeno disuelto de saturación OD <sub>sat</sub> .....	90
Cuadro 33.	Concentraciones de Nitrógeno N-NH <sub>3</sub> y N-NO <sub>3</sub> Ingresados al modelo .....	91
Cuadro 34. 91	Concentraciones Nitrógeno Amoniacal (N-NH <sub>3</sub> ) y en forma de Nitratos (N-NO <sub>3</sub> )	
Cuadro 35.	Tasa de Nitrificación K <sub>nit</sub> .....	92
Cuadro 36.	Tasa de desnitrificación K <sub>desnit</sub> .....	92
Cuadro 37. Florida Sector 297	Constantes empleadas en las simulaciones de calidad de agua en el humedal La	
Cuadro 38.	Resultados simulaciones de DBOC Total en el humedal La Florida Sector 2 .	99

Cuadro 39.	Resultados simulaciones de OD Total en el humedal La Florida Sector 2 .....	99
Cuadro 40. 100	Resultados simulaciones de N-NH <sub>3</sub> Total en el humedal La Florida Sector 2	
Cuadro 41. 101	Resultados simulaciones de N-NO <sub>3</sub> Total en el humedal La Florida Sector 2	
Cuadro 42. 101	Resultados de las pruebas de calidad de agua en el humedal La Florida Sector 2	
Cuadro 43. IBER 2D	Resumen de condiciones hidrodinámicas y de las modelaciones realizadas con	103
Cuadro 44.	Muestréos de calidad N-NH y NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> en el humedal La Florida Sector 2.....	114
Cuadro 45.	Eficiencias en remoción sustancias simuladas en el escenario 2.....	137

## Índice de figuras

Figura 1.	Esquema completo del modelo de calidad de aguas. Las líneas discontinuas indican dependencia de un proceso en una variable .....	39
Figura 2.	Tasa de reaireación <i>k<sub>a</sub></i> (d-1) versus profundidad y velocidad (Covar, 1976). 46	
Figura 3.	Localización general humedal La Florida .....	49
Figura 4.	Distribución espacial Precipitación y Temperatura Humedal La Florida .....	51
Figura 5.	Distribución espacial Evaporación y Evapotranspiración Potencial Humedal La Florida	52
Figura 6.	Distribución espacial Evapotranspiración Real Humedal La Florida .....	52
Figura 7.	Geología del Humedal La Florida .....	53
Figura 8.	Geología del Humedal La Florida .....	54
Figura 9.	Puntos de muestreo en el Humedal La Florida Sector 2 .....	62
Figura 10.	Balance hídrico en el humedal La Florida Sector 2 – modelo de Thornthwaite & Mather (1955)	68
Figura 11.	Producción de agua en el área aferente al Humedal La Florida aplicando el modelo de Thornthwaite & Mather (1955), expresada en profundidad de agua (arriba) y tasa volumétrica de flujo (abajo).....	69
Figura 12.	Balance hídrico de la cuenca en estudio – modelo de Thomas (1981).....	69
Figura 13.	Producción de agua en la cuenca en estudio aplicando el modelo de Thomas (1981), expresada en profundidad de agua (arriba) y tasa volumétrica de flujo (abajo).....	70
Figura 14.	Edición de geometría en Iber.....	73
Figura 15.	Etapas de asignación de coeficientes de Manning a las superficies con IBER..	76
Figura 16.	Resultados de asignación de los coeficientes de rugosidad en el humedal La Florida Sector 2 en IBER .....	77
Figura 17.	Malla de cálculo no estructurada celda de 5m.....	93
Figura 18.	Malla de cálculo no estructurada celda de 10m.....	93

Figura 19.	Malla de cálculo no estructurada celda de 25m.....	94
Figura 20. mallado	Corte transversal canal de salida humedal La Florida Sector 2 con diferente 94	
Figura 21.	Malla de cálculo no estructurada.....	95
Figura 22.	Detalle de malla de cálculo no estructurada y elevación.....	95
Figura 23.	Alcantarillas introducidas al modelo en los pasos artesanales existentes .....	96
Figura 24.	Coordenadas de las alcantarillas introducidas al modelo .....	96
Figura 25.	Análisis de las pruebas de calidad de agua para DBOC.....	98
Figura 26.	Análisis de las pruebas de calidad de agua para OD .....	99
Figura 27.	Análisis de las pruebas de calidad de agua para N-NH <sub>3</sub> .....	100
Figura 28.	Análisis de las pruebas de calidad de agua para N-NO <sub>3</sub> .....	100
Figura 29.	Evolución temporal de la DBOC total y OD (Punto 4 y 1).....	102
Figura 30.	Evolución temporal de N-NH <sub>3</sub> y N-NO <sub>3</sub> (Punto 4 y 1).....	102
Figura 31.	Corte longitudinal Humedal La Florida Sector 2 (Longitud total 3290 m)....	104
Figura 32.	Perfil de profundidades en el Escenario 1 corte longitudinal en el humedal La Florida Sector 2 (Instante 30.000 seg.) .....	105
Figura 33.	Perfil de velocidad en el Escenario 1 corte longitudinal en el humedal La Florida Sector 2 (Instante 30.000 seg.).....	105
Figura 34.	Distribución espacial de profundidades y velocidades en el Escenario 1 Humedal La Florida Sector 2 (Instante 30.000 seg.) .....	106
Figura 35.	Evolución de la DBOC Total en el Escenario 1 corte longitudinal del Humedal La Florida Sector 2 (Instante 30.000 seg.) .....	107
Figura 36.	Evolución espacial de DBOC Total en el Escenario 1 Humedal La Florida Sector 2 (Instante 30.000 seg.).....	108
Figura 37.	Evolución temporal de DBOC Total en el Escenario 1 Humedal La Florida Sector 2 (Instante 30.000 seg.).....	108

Figura 38.	Evolución DBO <sub>5</sub> en el Escenario 1 corte longitudinal Humedal La Florida Sector 2 (Instante 30.000 seg.) .....	109
Figura 39.	Evolución Oxígeno Disuelto en el Escenario 1 Humedal La Florida Sector 2 (Instantes 15.000 y 30.000 seg.) .....	110
Figura 40.	Evolución temporal del OD en el Escenario 1 Humedal La Florida Sector 2 (Instante 30.000 seg.) .....	110
Figura 41.	Evolución del OD en el Escenario 1 corte longitudinal del Humedal La Florida Sector 2 (Instante 30.000 seg.) .....	111
Figura 42.	Evolución OD en el Escenario 1 corte longitudinal Humedal La Florida Sector 2 (Instante 30.000 seg.) .....	112
Figura 43.	Evolución espacial del Nitrógeno Amoniacal y en forma de Nitratos en el Escenario 1 Humedal La Florida Sector 2 (Instante 30.000 seg.) .....	113
Figura 44.	Evolución Nitrógeno Amoniacal y Nitratos en el Escenario 1 corte longitudinal del Humedal La Florida Sector 2 (Instante 30.000 seg.) .....	114
Figura 45.	Evolución Nitrógeno Amoniacal y Nitratos en el Escenario 1 corte longitudinal del Humedal La Florida Sector 2 (Instante 30.000 seg.) .....	115
Figura 46.	Perfil de profundidad corte longitudinal en el Escenario 2 humedal La Florida Sector 2 (Instante 30.000 seg.) .....	116
Figura 47.	Distribución espacial de la profundidad en el Escenario 2 humedal La Florida Sector 2 (Instante 30.000 seg.) .....	117
Figura 48.	Perfil consolidado de velocidad en el Escenario 2 corte longitudinal en el humedal La Florida Sector 2 (Instante 30.000 seg.) .....	118
Figura 49.	Distribución espacial de la velocidad en el Escenario 2 humedal La Florida Sector 2 (Instante 30.000 seg.) .....	118
Figura 50.	Vectores de velocidad caudales Q1 y Q2 en el Escenario 2 Humedal La Florida Sector 2 (Instante 30.000 seg.) .....	119
Figura 51.	Evolución de la DBOC Total en el Escenario 2 corte longitudinal del Humedal La Florida Sector 2 (Instante 30.000 seg.) .....	120
Figura 52.	Evolución DBO <sub>5</sub> en el Escenario 2 corte longitudinal Humedal La Florida Sector 2 (Instante 30.000 seg.) .....	121

Figura 53.	Evolución temporal de la DBOC total en el Escenario 2 humedal La Florida Sector 2 (CInicial 2.9 m - Instante 30.000 seg.).....	121
Figura 54.	Evolución espacial de DBOC Total en el Escenario 2 humedal La Florida Sector 2 (Instante 30.000 seg.).....	122
Figura 55.	Evolución del OD en el Escenario 2 corte longitudinal del Humedal La Florida Sector 2 (Instante 30.000 seg.).....	123
Figura 56.	Evolución temporal del OD en el Escenario 2 corte longitudinal del Humedal La Florida Sector 2 (Instante 30.000 seg.) .....	124
Figura 57.	Evolución OD en el Escenario 2 humedal La Florida Sector 2 (Instante 30.000 seg.)	124
Figura 58.	Evolución Nitrógeno Amoniacal en el Escenario 2 corte longitudinal del Humedal La Florida Sector 2 (Instante 30.000 seg.) .....	125
Figura 59.	Evolución Nitratos en el Escenario 2 corte longitudinal del Humedal La Florida Sector 2 (Instante 30.000 seg.).....	126
Figura 60.	Evolución espacial Nitrógeno Amoniacal en el Escenario 2 Humedal La Florida Sector 2 (Instante 30.000 seg.).....	126
Figura 61.	Evolución espacial de Nitratos en el Escenario 2 Humedal La Florida Sector 2 (Instante 30.000 seg.).....	127
Figura 62.	Edición del modelo digital de elevación .....	127
Figura 63.	Perfil de velocidad y profundidad en el Escenario 2 Q1, Q1-3 en el corte longitudinal en el humedal La Florida Sector 2 (Instante 30.000 seg.) .....	128
Figura 64.	Comparación de la evolución temporal de la DBOC en el Escenario 2 para Q1, Q1-3 editando el MDE (CInicial 2.9 m - Sin alcantarillas - Instante 30.000 seg.) .....	129
Figura 65.	Comparación de la evolución temporal del OD en el Escenario 2 para Q1 y Q1-3 editando el MDE (CInicial 2.9 m - Sin alcantarillas - Instante 30.000 seg.) .....	129
Figura 66.	Comparación de la evolución temporal del nitrógeno en el Escenario 2 para Q1 y Q1-3 editando el MDE (CInicial 2.9 m - Sin alcantarillas - Instante 30.000 seg.) .....	130
Figura 67.	Evolución espacial de DBOC Total en el Escenario 3 humedal La Florida Sector 2 (Instante 30.000 seg.).....	131

Figura 68.	Evolución de la DBOC Total Escenario 3 con una descarga de ARD en el corte longitudinal del Humedal La Florida Sector 2 (Instante 30.000 seg.) .....	131
Figura 69.	Evolución del OD escenario 3 con una descarga de ARD en el corte longitudinal del Humedal La Florida Sector 2 (Instante 30.000 seg.).....	132
Figura 70.	Evolución espacial del OD en el Escenario 3 humedal La Florida Sector 2 (Instante 30.000 seg.).....	133
Figura 71.	Evolución Nitratos en el Escenario 3 corte longitudinal del Humedal La Florida Sector 2 (Instante 30.000 seg.).....	134
Figura 72.	Evolución espacial Nitratos en el Escenario 3 humedal La Florida Sector 2 (Instante 30.000 seg.).....	134
Figura 73.	Evolución espacial Nitrógeno Amoniacal en el Escenario 3 Humedal La Florida Sector 2 (Instante 30.000 seg.).....	135
Figura 74.	Evolución espacial Nitrógeno Amoniacal en el Escenario 3 humedal La Florida Sector 2 (Instante 30.000 seg.).....	135

## Índice de anexos

Anexo 1.	Inventario de aportes de caudal Humedal La Florida Sector 2.....	146
Anexo 2.	Muestras de Calidad de Agua.....	151
Anexo 3.	Registros de precipitación y temperatura de las estaciones Aeropuerto El Dorado y La Ramada	154
Anexo 4.	Hoja cálculo aplicación del método de Thomas (1981) .....	162
Anexo 5.	Hoja cálculo aplicación del método modelo T (Thornthwaite & Mather, 1955) 163	
Anexo 6.	Resultados de las pruebas de calidad de agua en el humedal La Florida Sector 2 164	

## 1. Introducción

En general, los humedales se encuentran fragmentados, reducidos en extensión y transformados morfológicamente (Acueducto de Bogotá & Conservación Internacional - Colombia, 2003), es el caso del Humedal La Florida sector 2 con jurisdicción de los municipios de Cota y Funza, afectado por las actividades humanas, especialmente por el desarrollo de las vías entre los municipios de la Sabana de Bogotá, la contaminación de sus aguas por vertimientos producto de las actividades agropecuarias, descarga de escombros de diversa índole, invasión de la ronda para el desarrollo de actividades agropecuarias y la eutrofización de sus aguas (CAR, 2006).

Este humedal fue declarado reserva hídrica por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca mediante el Acuerdo CAR No. 46 del 20 de noviembre de 2006 y cuenta con connotaciones de la Convención Ramsar, por los servicios ecosistémicos que presta (Alcaldía Mayor de Bogotá D.C., 2011). Así mismo, integra el Sistema Hidráulico de Manejo Ambiental y Control de Inundaciones (SHMACI) de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR), denominado así desde el Acuerdo CAR 037 de 2014, que le atribuye un régimen artificial en algunas épocas del año por las maniobras realizadas para el funcionamiento de dicho sistema.

Debido a la fuerte intervención a la que se encuentran sometidos los humedales de la Sabana, entre ellos el humedal La Florida, se ha pasado por alto el servicio ambiental de depuración de aguas de estos ecosistemas, pues las plantas lacustres propias del humedal retienen sedimentos y metales pesados, por lo que funcionan como digestores de materia orgánica y purificadores naturales de las aguas contaminadas (Alcaldía Mayor de Bogotá D.C., 2011).

En este sentido y teniendo en cuenta que, la mejora en la calidad del agua depende de varias medidas, entre las más importantes: el control de los vertimientos realizados a los cuerpos de agua y mejora en la gestión de los sistemas de depuración existentes (Acueducto de Bogotá & Conservación Internacional - Colombia, 2003), el presente trabajo se enfocó en evaluar mediante la implementación de un modelo hidráulico y de calidad, la evolución de la calidad del agua en el humedal La Florida Sector 2, con los diferentes escenarios de operación y una descarga de agua residual, a fin de establecer la capacidad de asimilación del cuerpo lagunar y contribuir con un instrumento de apoyo para la toma decisiones y la administración del recurso hídrico dirigido a la admisión controlada de vertimientos hacia este tipo de ecosistemas.

Para el fin expuesto, fue empleado el software IBER 2D como una herramienta de modelización bidimensional del flujo de agua en lámina libre en aguas poco profundas, con su correspondiente módulo de calidad, trabajando con información primaria, relacionada con datos levantados en visitas para actualizar el inventario de vertimientos y complementar el monitoreo de calidad de algunos puntos de descarga con apoyo del Laboratorio Ambiental de la CAR, así como, con información secundaria, relacionada con el inventario de vertimientos, cartografía base, modelo digital de

elevación, ortomosaico disponible en la zona, monitoreos de calidad existentes en el humedal y registros meteorológicos monitoreados por el IDEAM.

El montaje del modelo con la información disponible se describe de forma detallada en el capítulo cuarto del presente documento, en cada una de las siguientes fases: a) Conocimiento y manejo del modelo, b) Obtención y procesamiento de información primaria y secundaria, c) Depuración y definición de información del modelo, d) Implementación del modelo en el humedal La Florida Sector 2, estableciendo las condiciones hidrodinámicas, mallado y condiciones de calidad.

Posteriormente, en el capítulo quinto se exponen los resultados alcanzados en las salidas producidas con el uso de los módulos básico de modelación hidráulica y avanzado de calidad del agua de IBER 2D, para cada uno de los escenarios planteados, definidos como: escenario 1, correspondiente a la condición Inicial del humedal con el aporte exclusivo de agua de escorrentía; escenario 2, con el ingreso de agua al humedal procedente del Río Bogotá mediante la apertura de la compuerta en el Canal Chicú y el escenario 3, simulando una descarga de agua residual doméstica. Finalmente, en el capítulo sexto se presentan las conclusiones y recomendaciones del presente trabajo.

## **1.1 Planteamiento del Problema**

Los beneficios humanos obtenidos directa o indirectamente de los sistemas naturales, se pueden diferenciar de la siguiente forma: según sus funciones ecosistémicas (definidas como las propiedades de los hábitats y sistemas biológicos o los procesos de los ecosistemas, es decir, las condiciones de los bienes ecosistémicos como fuente de alimento y recursos) y servicios ecosistémicos (como asimilación de residuos) (Constanza et al., 1997).

Entre las principales funciones, bienes y servicios atribuidos a los sistemas naturales y semi-naturales, se encuentra el tratamiento de residuos (control de la contaminación / desintoxicación), servicio éste que, con fundamento en las dinámicas entre la vegetación y la biota, eliminan o descomponen los nutrientes y compuestos. Siendo éste, uno de los servicios que es posible desarrollar de forma sostenible, de cara a mantener las funciones de los ecosistemas, procesos y estructuras asociadas (Groot, Wilson, & Boumans, 2002). Es importante anotar que en el caso de ciertos ecosistemas, tales como los lénticos Kazmierczak, (2001) argumenta que algunos humedales realizan muchas de las funciones descritas, en tanto que otros realizan muy pocas o incluso ninguna.

En Colombia, se cuenta con cerca de 20.000.000 hectáreas de humedales representados por ciénagas, pantanos, turberas, madres viejas, lagunas, sabanas y bosques inundados, los cuales proveen múltiples bienes y servicios para el desarrollo de las actividades económicas, así como, para las comunidades locales (Ministerio de Ambiente, 2002).

Entre los servicios que prestan los ecosistemas de humedal se encuentra la reducción de la contaminación del agua, pues la vegetación lacustre propia del humedal junto a los procesos físicos,

químicos y biológicos que se desarrollan dentro y en torno a él, contribuyen a la retención de sedimentos y metales pesados, depuran y mineralizan materia orgánica, y capturan nutrientes reintroduciéndolos como elementos y compuestos asimilables en los ciclos biogeoquímicos naturales (Kadlec & Wallace, 2009; Alcaldía Mayor de Bogotá D.C., 2011); en Colombia, por ejemplo, la carencia de políticas orientadas a aprovechar de forma sustentable el servicio de descontaminación de aguas brindado por estos ecosistemas, sumado a su uso indiscriminado y desmedido como sumidero de residuos líquidos, han incidido para que en la actualidad dicho servicio se encuentre excluido de las estrategias nacionales de saneamiento ambiental y de gestión integral de vertimientos.

En el caso de Bogotá, la situación expuesta se ve reflejada en los programas de conservación de ecosistemas estratégicos urbanos y periurbanos dentro del Sistema de Áreas Protegidas (SAP) del Distrito Capital, en los que se evidencia la priorización de algunas acciones de carácter reactivo, que al tenor del crudo panorama en el que se encontraban los humedales del Distrito, adoptaron *–y en su momento con justa razón–* eliminar todas las descargas de aguas servidas sobre estos ecosistemas, con el ánimo de remediar los daños y recuperar su estado natural únicamente mediante la entrada de aguas lluvias al sistema. No obstante lo señalado, y pese a que en los últimos años los humedales del Distrito han exhibido una importante recuperación (Acueducto de Bogotá & Conservación Internacional - Colombia, 2003; SDA, 2016), aún no se vislumbran iniciativas tendientes a aprovechar de forma sostenida los servicios de descontaminación prestados por estos ecosistemas.

En consecuencia, programas de este tipo y otros que han venido desarrollando las Autoridades Ambientales con injerencia en los humedales de la sabana de Bogotá, en especial aquellos relacionados con los planes de manejo adoptados para estos ecosistemas lenticos, bajo ninguna circunstancia admiten descargas de residuos líquidos tratados sobre su espejo de agua; esto sin que medie evidencia verídica y suficiente que demuestre hasta qué punto y bajo qué condiciones, dicho servicio ecosistémico puede ser aprovechado sosteniblemente en los humedales existentes. Ciertamente, medidas con ese enfoque prohibitivo contribuyen a sobrecargar los cuerpos de agua loticos que valga anotar, desde siempre se han concebido como receptores por defecto de los vertimientos de aguas residuales generados por la sociedad.

## **1.2 Justificación**

La amplia gama de los bienes y servicios ecosistémicos se distingue en las siguientes cuatro categorías: 1) Regulación, 2) Hábitat, 3) Producción y 4) Información. El primer grupo objeto de interés del presente trabajo, se refiere a la capacidad de los ecosistemas naturales y semi-naturales de regular los procesos ecológicos esenciales, que sirven de soporte de la vida, a través de ciclos biogeoquímicos y otros procesos de la biosfera. Además, de proporcionar muchos servicios que tienen beneficios directos e indirectos para los seres humanos (como aire limpio, el agua y el suelo, y los servicios de control biológico (Groot et al., 2002).

En este contexto, es de resaltar que tanto los humedales como otros ecosistemas acuáticos, pueden actuar de manera controlada como plantas de purificación, dado que son uno de los sistemas naturales capaces de almacenar y reciclar ciertas cantidades de residuos orgánicos e inorgánicos, a través de la dilución, la asimilación y recomposición química (Groot et al., 2002). Por lo tanto, los humedales naturales así como construidos, pueden ser depuradores terciarios eficaces para efluentes de aguas residuales, hecho que ha sido demostrado a través de varios estudios (Richardson y Davis 1987, Conner et al 1989, Reed 1991, Kadlec y Knight, 1996; citado por Kazmierczak, 2001).

Pese a sus valores, atributos, funciones y servicios, los humedales son en la actualidad uno de los ecosistemas más amenazados por diferentes actividades humanas no sostenibles. Como resultado de ello, estos ecosistemas presentan fuertes procesos de deterioro por diversos factores como la agricultura intensiva, urbanización, contaminación y otras formas de intervención en el sistema ecológico e hidrológico (Ministerio de Ambiente, 2002).

Como resultado de los conflictos entre las actividades humanas y la conservación o uso sustentable de los humedales (Ministerio del Medio Ambiente, 2002), se aprecia alrededor de los humedales problemáticas asociadas al relleno y desecación, procesos de eutrofización por el aporte de nutrientes ante vertimientos provenientes de industrias, así como de particulares. Algunos de los aportes de aguas residuales generalmente son atribuidos a barrios aledaños que no cuentan con sistemas de alcantarillado público al tratarse de ocupaciones ilegales en el área del humedal.

Dicho lo anterior, mediante el presente estudio se pretende determinar el estado actual y el comportamiento asociado de un humedal natural frente a una descarga con carga orgánica ligada a un vertimiento tratado, con la finalidad de aportar al proceso de aprovechamiento sostenible de los servicios ambientales de depuración de aguas que brindan estos ecosistemas acuáticos; éste es un servicio ambiental potencial no explorado en la región, que tampoco se ha profundizado por las autoridades ambientales, debido a que desafortunadamente nunca fue utilizado de forma racional y medida.

Considerando lo expuesto, con el presente estudio se busca evaluar la evolución de la calidad del agua en un humedal natural, mediante la implementación de un modelo hidráulico y de calidad de agua a través del software IBER 2D, que permita analizar la capacidad de autodepuración y respuesta de estos cuerpos de agua frente a la perturbación que representa el vertimiento de aguas residuales. En este sentido, el aporte consiste en la elaboración de un estudio técnico, que evalúe el potencial de un modelo computacional para estimar el grado de asimilación de vertimientos en humedales naturales, de tal manera que se brinde un instrumento y una herramienta de apoyo para la toma de decisiones y de esta forma se contribuya a la administración del recurso hídrico, en lo referente al uso sostenible de este tipo de ecosistemas como receptores de vertimientos.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 General**

Evaluar la capacidad del modelo IBER 2D como herramienta para la construcción de un modelo hidráulico y de calidad del agua del humedal La Florida sector 2, ubicado en los municipios de Cota y Funza del departamento de Cundinamarca, con el fin de estimar la capacidad de asimilación de cargas contaminantes en este ecosistema.

#### **1.3.2 Específicos**

- Establecer los requerimientos de información del modelo IBER 2D, para implementación del modelo computacional hidráulico y de calidad de agua, aplicándolos a las condiciones del humedal La Florida.
- Realizar el montaje del modelo computacional hidráulico y de calidad de agua del estado actual del humedal, con la apertura de compuertas y con un vertimiento de agua residual doméstica.
- Evaluar el grado de asimilación de la carga orgánica de un vertimiento de agua residual sobre el humedal La Florida y la respuesta de este ecosistema como función de los servicios ambientales de depuración de contaminantes que puede prestar.

## 2. Estado del arte

En el presente capítulo se incluyen conceptos generales relacionados con ecosistemas de humedal, bienes y servicios ecosistémicos; normatividad de cuerpos lenticos y normas de vertimiento de aguas residuales domésticas; así como, el marco teórico del módulo hidráulico y de calidad del modelo IBER 2D.

### 2.1 Conceptos generales

Los conceptos que a continuación se mencionan se enfocan en humedales naturales principalmente y la función depuradora de los mismos.

#### 2.1.1 Definición de humedal

La convención sobre los Humedales comúnmente conocida como la Convención Ramsar<sup>1</sup>, aplica un criterio amplio para determinar los humedales que quedan sujetos a sus disposiciones. De acuerdo con los artículos 1,1 y 2,1 de la Convención (Convención Ramsar sobre Humedales, 1971), se entiende por humedales:

“las extensiones de marismas, pantanos y turberas, o superficies cubiertas de aguas, sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros”.

“podrán comprender sus zonas ribereñas o costeras adyacentes, así como las islas o extensiones de agua marina de una profundidad superior a los seis metros en marea baja, cuando se encuentren dentro del humedal”.

La clasificación de los tipos de humedales, adoptado por la Convención Ramsar incluye 42 tipos, agrupados en tres categorías: humedales marinos y costeros, humedales continentales y humedales artificiales. Así mismo, se reconocen cinco tipos de humedales principales: marinos (humedales costeros, inclusive lagunas costeras, costas rocosas y arrecifes de coral); estuarinos (incluidos deltas, marismas de marea y manglares); lacustres (humedales asociados con lagos); ribereños (humedales adyacentes a ríos y arroyos); y palustres (es decir, “pantanosos” – marismas, pantanos y ciénagas). Además, considera los humedales artificiales, como estanques de cría de peces y camarones,

---

<sup>1</sup> La *Convención sobre los Humedales* es un tratado intergubernamental aprobado el 2 de febrero de 1971 en la localidad iraní de Ramsar, situada a orillas del Mar Caspio. La misión de esta Convención adoptada por las Partes en 1999 y revisada en 2002 es "la conservación y uso racional de los humedales mediante acciones locales y nacionales y gracias a la cooperación internacional, como contribución al logro de un desarrollo sostenible en todo el mundo".

estanques de granjas, tierras agrícolas de regadío, depresiones inundadas salinas, embalses, estanques de grava, piletas de aguas residuales y canales (Secretaría de la Convención Ramsar, 2013).

**Cuadro 1.** Clasificación de humedales naturales interiores según Convención Ramsar

Sistema	Subsistema	Clase	Subclase
Fluvial	Perenne		Ríos / arroyos permanentes
		Emergente	Deltas interiores
	Intermitente	Emergente	Ríos / arroyos intermitentes
Lacustre	Permanente		Lagos dulces permanentes
	Estacional		Lagos dulces estacionales
	Permanente/Estacional		Lagos y pantanos salinos permanentes / estacionales
Palustre	Permanente	Emergente	Pantanos y Ciénagas dulces y permanentes
			Turberas abiertas
			Humedales alpinos y de Tundra
		Arbustivo	Pantanos arbustivos
		Boscoso	Bosque pantanoso dulce
		Turbera boscosa	
	Estacional	Emergente	Ojos de agua, oasis
		Ciénaga estacional dulce	
Geotérmico			Humedales geotérmicos

**Fuente.** Ministerio del Medio Ambiente (2002).

Los humedales también son definidos como un conjunto muy amplio y variado de ecosistemas, en donde una buena parte están asociados con la dinámica de los ríos, y por tanto, están acoplados con los regímenes hidrológicos en las vertientes. Otros se sitúan en cuencas cerradas en procesos acelerados de colmatación (turberas, lagos) (Castaño, 2002).

Este tipo de ecosistemas también se definen como complejos mosaicos de láminas de agua, vegetación sumergida, vegetación flotante, vegetación emergente y zonas con nivel freático más o menos cercano a la superficie, en los que el suelo se mantiene saturado de agua durante un largo periodo de tiempo cada año (Lahora, 2003).

De acuerdo con la hidrología, los humedales se caracterizan generalmente por flujos lentos y aguas poco profundas o sustratos saturados. Los flujos lentos y las profundidades de aguas poco profundas permiten que los sedimentos se asienten cuando el agua pasa a través del humedal. Los flujos lentos también proporcionan tiempos de contacto prolongados entre el agua y las superficies dentro del humedal (Davis, 1994).

En Colombia el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible ha adoptado en la Política Nacional de Humedales la definición de la Convención Ramsar y en la Política Pública de Humedales del año 2004, definiendo los humedales como: (...) "una referencia de una amplia variedad de hábitats continentales, costeros y marinos que comparten ciertas características. Generalmente se los identifica como áreas que se inundan temporalmente allí donde la capa freática aflora en la superficie o en suelos de baja permeabilidad cubiertos por agua poco profunda. Todos los humedales comparten una propiedad primordial: el agua juega un papel fundamental en el ecosistema, en la determinación de la estructura y las funciones ecológicas del humedal" (Bravo, 2012).

El antiguo Departamento Administrativo de Medio Ambiente (DAMA), hoy Secretaría de Medio Ambiente (SDA), en su Política Pública de humedales (PPH) de 2004 define humedales de Bogotá como "un ecosistema intermedio entre el medio acuático y el terrestre, con porciones húmedas, semihúmedas y secas, caracterizado por la presencia de flora, fauna muy singular". Posteriormente se refiere a los humedales del altiplano de Bogotá como "aquellos cuerpos y cursos de agua estacional o permanente, asociados con la red principal y los afluentes del Río Bogotá" (Bravo, 2012).

En la Política de Humedales del Distrito Capital este ecosistema se define como: (...) "de gran valor natural y cultural, constituidos por un cuerpo de agua permanente o estacional de escasa profundidad, una franja a su alrededor que puede cubrirse por inundaciones periódicas (Ronda hidráulica) y una franja de terreno no inundable, llamada Zona de manejo y preservación ambiental. Estos ecosistemas están asociados a las cubetas y planos de desborde de los ríos, razón por la cual su biota, los flujos de nutrientes, materia y energía están adaptados a las fluctuaciones y comportamientos de sus sistemas hídricos asociados" (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2005).

Así mismo, la Política de Humedales del distrito señala que la dinámica y la situación ambiental de los humedales se define en relación con la dinámica de los asentamientos humanos que los circundan, en el marco de procesos históricos complejos de configuración sociocultural, económica y política del territorio.

### **2.1.2 Bienes y servicios ecosistémicos**

Algunas de las diferencias entre las definiciones de las funciones y servicios ecosistémicos, de acuerdo con lo citado por (Bravo, 2012), se resaltan a continuación:

- Daily (1997) define los servicios proporcionados por los ecosistemas como "un amplio rango de condiciones y procesos a través de los cuales los ecosistemas naturales y las especies que hacen parte de ellos ayudan a sostener la vida humana".
- Constanza et al. (1997) diferencian entre funciones ecosistémicas (definidas como las propiedades de los hábitats y sistemas biológicos o los procesos de los ecosistemas, es decir, las condiciones de los bienes y servicios ecosistémicos como fuente de alimento y recursos)

y los servicios ecosistémicos (como asimilación de residuos), que representan los beneficios humanos obtenidos directa o indirectamente de los ecosistemas.

- Morinelly (2007), definen los bienes ecosistémicos como aquellos productos derivados de la biodiversidad que el hombre utiliza, intercambia o vende, mientras que los servicios ecosistémicos se definen como las condiciones y los procesos naturales que ayudan a sostener la vida y a satisfacer las necesidades de los seres humanos.
- Baptiste y Piñeros (2006) considera que el concepto de bien o servicio ecosistémico es totalmente antropocéntrico, puesto que solo se consideran aquellos que satisfacen en alguna medida intereses humanos.
- De Groot et al. (2002), clasificaron los bienes y servicios ecosistémicos de acuerdo con su funcionalidad. En dicha clasificación es posible encontrar cuatro categorías, la primera de las cuales hace referencia a los bienes y servicios ecosistémicos con funciones de regulación. En ella entran todos los bienes y servicios ecosistémicos que (...) se relacionen con la capacidad de los ecosistemas de regular procesos ecológicos esenciales, que sirvan de soporte de la vida a través de los ciclos biogeoquímicos, entendidos como el análisis de la circulación de los elementos químicos que sustentan la vida en la tierra y procesos biosféricos, entendidos como aquellos que determinan la estabilidad de la tierra para soportar la vida (hídricos, climáticos, edáficos, biológicos, ecológicos, etc.). Por medio de esta función se generan varios servicios por medio de los cuales se mantiene la salud de los ecosistemas.

### 2.1.3 Descarga en un humedal, definición conveniencia y limitaciones

El uso de humedales naturales en el manejo de aguas residuales involucra la descarga de aguas residuales tratadas al menos a niveles de tratamiento secundario (o mayor si se requiere para cumplir con las normas de calidad del agua). La descarga de las aguas residuales tratadas se aplica a través de un flujo terrestre, uno o múltiples vertidos, riego por aspersión, descarga de canal, etc., hacia un humedal como un pantano, una ciénaga o fangal. Los objetivos para el uso de un humedal en el manejo de aguas residuales incluyen: (1) *disposición*, en el cual el humedal se usa principalmente como un cuerpo receptor de agua para asimilar aguas residuales; (2) *tratamiento y disposición*, en el cual el humedal se utiliza para mejorar la calidad de las aguas residuales (U.S. EPA, 1985).

El uso de humedales en el manejo de aguas residuales se destaca por diferentes razones (U.S. EPA, 1985), como:

- Una **alternativa** para las comunidades con limitadas oportunidades para descarga en fuentes superficiales y en suelos no propicios para la disposición de las aguas residuales
- Una alternativa económica para las comunidades frente a los requisitos de descarga de agua superficial de un costoso **tratamiento avanzado**
- Una opción de manejo de aguas residuales que también podría servir para **restaurar los humedales alterados**.

La United States Environmental Protection Agency (EPA), indica que el uso de humedales para el manejo de aguas residuales no puede ser apropiado en todos los casos, debido a que es necesario analizar las condiciones específicas para determinar la viabilidad y aceptabilidad del humedal basándose en los tipos, tamaño, condición y sensibilidad del mismo. En este sentido, se establece de forma general, los casos en los que se debe evitar el uso de humedales, según se lista a continuación:

- Cuando el humedal sea considerado como *prístino* y representativo de un tipo de humedal único
- Cuando los impactos proyectados en el humedal resultarían en cambios que *amenazan la viabilidad del sistema*
- *Los conflictos con otros usos* no podrían ser adecuadamente mitigados.
- Las aguas residuales contienen un componente industrial significativo (por ejemplo, sales, metales, tóxicos, etc.)
- Las especies amenazadas o en peligro de extinción están presentes en el humedal y es particularmente sensible a las alteraciones debidas a las descargas de aguas residuales (por ejemplo, pH, flujo, etc.)
- El tamaño del humedal que se va a utilizar no es adecuado para el volumen de aguas residuales propuesto para descarga (incluidos los flujos futuros proyectados)

Las circunstancias antes mencionadas pueden ser mitigadas (siempre que sea posible) para el uso de humedales en el manejo de aguas residuales. Es de mencionar, que muchas funciones y valores de los humedales (por ejemplo, amortiguamiento de tormentas, almacenamiento de agua, transporte de residuos, etc.), pueden no estar incluidos en las zonificaciones o regímenes de uso. Sin embargo, aunque los humedales no se encuentren clasificados para el "transporte de desechos", pueden usarse en el manejo de aguas residuales siempre y cuando los usos establecidos estén protegidos (U.S. EPA, 1985).

#### **2.1.4 Función Depuradora de los Humedales**

La interacción de las características biológicas, químicas o físicas de un lugar es lo que determina si un humedal cumple cierta función, genera productos específicos o posee ciertos atributos. Adamus y Stockwell (1983) han identificado 75 de estas características en humedales costeros y de agua dulce, luego de una extensa revisión de la literatura científica, se concluye que no todas las características están presentes en cada humedal, así mismo que pocos humedales desempeñan todas las funciones y que no todas las funciones se desempeñan de la misma manera en cada humedal (Dugan, 1992).

Teniendo en cuenta el enfoque del presente trabajo, se hará referencia únicamente a las funciones relacionadas con retención de sedimentos/sustancias tóxicas y retención de nutrientes (Dugan, 1992).

- **Retención de sedimentos/sustancias tóxicas.** Como los humedales ocupan comúnmente cuencas, pueden servir de pozos para el depósito de sedimentos. A menudo, las sustancias

tóxicas (tales como los pesticidas) se adhieren al sedimento suspendido; pueden entonces quedar retenidas junto con él. La retención de sedimento en los humedales aguas arriba alargará el tiempo de vida de los embalses y de los canales río abajo, y reducirá la necesidad de remover, a altos costos, el sedimento acumulado en los diques, las esclusas, las centrales eléctricas y otras obras de este tipo.

La cantidad de sedimento acumulado en las corrientes de los ríos puede ser 90% menor en las cuencas donde el 40% del área está compuesto de lagos y humedales que en aquellas desprovistas de tales hábitats. Los humedales situados en depresiones retienen todos los sedimentos que entran en ellos y aquellos en pendientes pueden retener hasta un 80%.

- **Retención de nutrientes.** Esta función tiene lugar cuando los nutrientes, fundamentalmente nitrógeno y fósforo, se acumulan en el subsuelo o se almacenan en la vegetación del humedal. Los humedales que remueven nutrientes mejoran la calidad del agua y ayudan a prevenir la eutrofización. Esto puede evitar la necesidad de construir sistemas de tratamiento del agua. En ciertas circunstancias, los humedales pueden usarse para el tratamiento de aguas domésticas servidas provenientes de pequeñas comunidades sin industrias.

Cuando los humedales extraen nutrientes (y contaminantes) se les denomina "sumideros". Esto es de especial importancia en lo que se refiere a los nitratos, pues pueden volverse a convertir en nitrógeno gaseoso y circular nuevamente hacia la atmósfera como resultado de la desnitrificación. Cuando los materiales se exportan, los humedales actúan como "fuentes", esto es cuando el agua de los humedales corre rápidamente.

De acuerdo con la United States Environmental Protection Agency (EPA), si un afluente contiene grandes cantidades de sustancias potencialmente tóxicas, como metales pesados, pesticidas, herbicidas, colorantes o sales, se debe tener especial cuidado si un humedal es apto para el manejo de aguas residuales. El pretratamiento para estos casos debe ser obligatorio. Los pocos casos de muertes de árboles documentadas en humedales resultantes de descargas se han asociado con descargas industriales o comerciales. Es por lo que se ha sospechado que altas concentraciones de sales y disolventes pueden causar daños a los humedales en los que se descargaron (EPA, 1983).

En Estados Unidos casi en todos los humedales se requiere un permiso para cualquier descarga. Los requisitos de calidad del agua para las descargas son especificados por las agencias federales, estatales o locales aplicables y normalmente son al menos iguales a los estándares de efluentes secundarios, es decir con un tratamiento básico que debe ser proporcionado antes del vertido al humedal (U.S. EPA, 1988).

Los humedales naturales son eficaces como procesos de tratamiento de aguas residuales porque apoyan a una población grande y diversa de bacterias que crecen sobre las raíces sumergidas y tallos de plantas acuáticas y son de particular importancia en la eliminación de  $\text{DBO}_5$  de las aguas residuales. Además, las condiciones de agua en reposo de un humedal son conducentes a la

sedimentación de sólidos de aguas residuales. Otros aspectos de los humedales que facilitan el reaprovechamiento del potencial de adsorción/filtración de las raíces y tallos de las plantas acuáticas, la capacidad de intercambio/adsorción iónica de los sedimentos naturales de los humedales y el efecto mitigador que las propias plantas (U.S. EPA, 1988).

Pueden darse situaciones especiales en que los humedales naturales proporcionan el pulido de efluentes. Así mismo, se considera que el uso del efluente tratado para mejora, restauración o creación de humedales puede ser una actividad muy deseable y ambientalmente compatible (U.S. EPA, 1988). Ejemplos de remoción de contaminantes en humedales naturales que tratan las aguas residuales se presentan en el Cuadro 2 y porcentajes de remoción de nutrientes de varios proyectos en humedales naturales se presentan en el Cuadro 3.

**Cuadro 2.** Porcentajes de remoción de contaminantes de efluentes secundarios en humedales naturales

Contaminante	Porcentaje de remoción
DBO <sub>5</sub>	70-96
Sólidos Suspendidos	60-90
Nitrógeno	40-90
Fósforo	Temporal

Fuente. U.S. EPA (1988).

**Cuadro 3.** Resumen de remoción de nutrientes en humedales naturales

Proyecto	Caudal (m <sup>3</sup> /d)	Tipo de humedal	Porcentaje de reducción			
			TDP <sup>a</sup>	NH <sub>3</sub> -N	NO <sub>3</sub> -N <sup>c</sup>	TN <sup>b</sup>
Brillion Marsh, WI	757	Ciénaga	13		51	
Houghton Lake, MI	379	Turbera	95	71	99 <sup>c</sup>	
Wildwood, FL	946	Pantano/Ciénaga	98			90
Concord, MA	2309	Ciénaga	47	58	20	
Bellaire, MI	1136 <sup>d</sup>	Turbera	88			64
Paraíso de fochas, ciudad de Dundas, Ontario, Canadá	-	Ciénaga	80			60-70
Whitney Mobile Park, Home Park, FL	227	Domo de Ciprés	91			89
<sup>a</sup> . Fósforo total disuelto <sup>b</sup> . Nitrógeno total <sup>c</sup> . Nitrato y Nitrito <sup>d</sup> . Solo de Mayo a noviembre						

Fuente. U.S. EPA (1988).

Los humedales naturales se han utilizado como sitios provechosos para realizar la descarga de aguas residuales (por lo menos 100 años en algunas localidades de EE. UU.). Algunos ejemplos de humedales antiguos incluyen el humedal natural Great Meadows cerca del río Concord en Lexington, Massachusetts, que comenzó a recibir aguas residuales en 1912; El Brillion Marsh en Wisconsin ha recibido descargas municipales de aguas residuales desde 1923; y la planta de tratamiento de aguas

residuales de Dundas, que empezó a descargarse en el humedal natural de Coates Paradise cerca de Hamilton, Ontario, en 1919. Cuando se inició el monitoreo de algunas de las descargas existentes, empezó a notarse el potencial de purificación de la humedad de los humedales (Kadlec et al., 2000).

Sin embargo, según (UN-HABITAT, 2008), desde 1990 no se ha dado inicio al uso de humedales naturales para el tratamiento de agua residual y al menos un tercio de los sistemas de tratamiento de humedales naturales incluidos en el North American Database (NADB) ya no funcionan.

Según WPCF (1990), las tasas típicas de carga hidráulica para los humedales de tratamiento natural oscilan entre 0,4 y 4,0 cm/d (de 2,5 a 25 ha por 1000 m<sup>3</sup>/d). Siendo importante resaltar que aquellos tipos de humedales con especies de plantas adaptadas a inundaciones continuas son típicamente adecuados para recibir flujos continuos de aguas residuales. Cuando están disponibles como una alternativa viable de tratamiento natural, los humedales naturales de tratamiento son típicamente la opción menos costosa, requiriendo muy bajos gastos de capital sin incluir los costos del terreno. Los costos de operación y mantenimiento de los humedales de tratamiento natural son también bastante bajos y están dominados por los costos de monitoreo (Kadlec et al., 2000).

Autores como Perez, Sanchez, & Rojo (2000), indican que los humedales proporcionan un tratamiento efectivo y gratuito para muchos tipos de contaminación del agua. Los humedales pueden eliminar o convertir grandes cantidades de contaminantes de fuentes puntuales (municipales y ciertos efluentes industriales de aguas residuales) y de fuentes no puntuales (mina, agricultura y escorrentía urbana), incluyendo materia orgánica, sólidos suspendidos, metales y exceso de nutrientes. La filtración natural, la sedimentación y otros procesos ayudan a limpiar el agua de muchos contaminantes. Un abundante subproducto del proceso de crecimiento de la planta es el oxígeno, que aumenta el contenido de oxígeno disuelto del agua y también del suelo en las inmediaciones de las raíces de las plantas. Esto aumenta la capacidad del sistema para la descomposición bacteriana aerobia de los contaminantes, así como su capacidad para soportar una gran variedad de organismos acuáticos que utilizan oxígeno, de los cuales, directa o indirectamente, utilizan contaminantes.

La retención de sedimentos y de nutrientes, son funciones ecológicas reconocidas en humedales, sobre todo en cuencas hidrográficas con fuertes desarrollos agrícolas y asentamientos poblacionales. El primero debido a la contribución en la retención significativa de la carga de sedimentos dirigiendo y almacenando agua durante los eventos de altas precipitaciones. La segunda, como consecuencia de los procesos de filtración, sedimentación y retención que ocurren mientras el agua fluye a través del humedal reduciendo la concentración de nutrientes, especialmente de fósforo y nitrógeno (Verhoeven, Beltman, Bobbink, & Whigham, 2006).

A pesar de lo descrito anteriormente y experiencias de vertido directo de aguas residuales a humedales naturales para aprovechar su efecto depurador, se sugiere que se debe usar en casos excepcionales (Agustín Lahora, 2005), ya que es necesario un control para evitar daños irreversibles al ecosistema y eliminar otros aspectos negativos, lo que requiere realizar el proceso dentro de un recinto cerrado e impermeable, que permita elegir la ubicación, tipo de sustrato, flujo y vegetación óptimos para el

proceso. También existe la preocupación de que pueda haber una degradación a largo plazo de los humedales naturales debido a la adición de nutrientes y cambios en las condiciones hidrológicas naturales que influyen en estos sistemas. Al menos en parte debido a tales fenómenos, ha habido un creciente interés en el uso de humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales.

Teniendo en cuenta que a través de una serie de procesos físicos, químicos y biológicos que interactúan, incluyendo filtración, sedimentación, adsorción, precipitación y disolución, volatilización e interacciones bioquímicas los humedales construidos eliminan contaminantes, así mismo, que tales humedales simulan el comportamiento de humedales naturales bajo condiciones controladas<sup>2</sup>, como referencia se presenta en el Cuadro 4 los contaminantes y mecanismos de remoción en humedales construidos, dejando la salvedad que éstos varían debido a las grandes diferencias de ubicación, tamaño, hidrología y biología entre los humedales (Davis, 1994).

**Cuadro 4.** Mecanismos de remoción en humedales construidos

<b>Parámetro de aguas residuales</b>	<b>Mecanismo de remoción</b>
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	Degradación microbiana (aerobia y anaerobia) Sedimentación (acumulación de la materia orgánica en la superficie del sedimento)
Sólidos suspendidos	Sedimentación / Filtración
Orgánicos	Adsorción Degradación microbiana
Nitrógeno	Amonificación química seguida de nitrificación microbiana y desnitrificación Absorción de las plantas Volatilización del amoniaco
Fósforo	Adsorción del suelo (reacciones de adsorción-precipitación con aluminio, hierro, Calcio y minerales arcillosos en el suelo) Absorción de las plantas
Metales	Adsorción Transformación microbiana y precipitación
Patógenos	Sedimentación / Filtración Muerte natural Ataque por los antibióticos excretados de las raíces de las plantas del humedal Depredación por invertebrados y otros microbios
Desechos flotantes	Filtración

**Fuente.** Davis (1994)

En humedales, el agua al contaminarse con productos orgánicos transcurre un periodo variable hasta que el agua pueda volver a estar limpia. El proceso se llama autodepuración, y se debe, parece ser, a

<sup>2</sup> Los procesos de tratamiento en los humedales artificiales y naturales son similares; aunque la velocidad a la que se producen estos procesos puede diferir significativamente entre los humedales artificiales y los humedales naturales (Zirschky & Deemer, 1986). Los humedales construidos son una tecnología para imitar los procesos encontrados en los ecosistemas naturales de humedales (UN-HABITAT, 2008).

las bacterias. Una vez terminada la autodepuración<sup>3</sup>, desaparecen las sustancias orgánicas y el agua vuelve a ser rica en oxígeno y clara, aunque por otra parte puede contener productos inorgánicos. Si se desarrollan en masa ciertas algas y ciertos micrófitos, es debido al abonado que ha supuesto la autodepuración (puede presentarse un bloom de algas) (Seoáñez, 1999).

La velocidad del proceso de autodepuración depende del movimiento del agua si es rápido toma más oxígeno del aire, y hay más autodepuración, en caso de ser lento (aguas estancadas, etc.), hay menos oxígeno y menos autodepuración. De igual manera, depende de la profundidad si esta es mayor, hay menos oxígeno y menos autodepuración; en superficie hay más oxígeno y más autodepuración, al entrar más oxígeno en las aguas poco profundas hay más descomposición oxidativa (Seoáñez, 1999).

Dependiendo del tipo, ubicación y factores geográficos, los humedales pueden cumplir las siguientes funciones: (1) hábitat de vida silvestre, (2) almacenamiento de agua y recarga de agua subterránea, (3) captura de sedimentos y mejoramiento de la calidad del agua. Esta última función considerando que el drenaje de agua desde las tierras altas lleva sedimentos, nutrientes y otros contaminantes. Los humedales absorben estos contaminantes antes de que lleguen a ríos, lagos y otros cuerpos de agua receptores (Ji, 2008). Por su carácter de trampas de sedimentos acumulan nutrientes, y resultan en funciones depuradoras de los sistemas fluviales aguas abajo de los mismos (Castaño, 2002).

De acuerdo con Pérez et al. (2000), la capacidad depuradora de los humedales se basa, a grandes rasgos, en dos mecanismos: 1. La utilización de los nutrientes disueltos en el agua por los productores primarios (macrófitos y microorganismos) y 2. la sedimentación de las partículas que lleva el agua, al atravesar lentamente amplias superficies. Partiendo de la premisa de que el humedal hace de "filtro" de numerosos contaminantes, en el que la cantidad de sustancias que entran a este ecosistema es mayor que la que sale (Johnston, 1991).

En la revisión bibliográfica realizada por Pérez et al. (2000), se destaca otro enfoque en el estudio de la depuración en humedales, basado en el balance entre entradas y salidas del humedal (*input-output studies*). Este método analiza la retención de agua y sustancias realizada por un humedal en su conjunto, tratando a éste como una caja negra, debido a que no se estudian los procesos que determinan esas retenciones dentro del humedal. Los estudios de *input-output* dan resultados positivos cuando hay retención de materiales o son convertidos en formas gaseosas en el humedal. Asimismo, se pueden dar resultados negativos cuando los materiales liberados por el sustrato y las plantas causan que la salida de material supere la entrada del mismo.

Finalmente Pérez et al. (2000) concluye que muchos estudios demuestran la capacidad depuradora de los humedales, pero no están igualmente estudiados los impactos que este uso causa en los humedales.

---

<sup>3</sup> La autodepuración contempla las siguientes fases: aporte de materia orgánica, desarrollo masivo de bacterias, gran consumo de oxígeno, las capas más profundas se quedan sin oxígeno y solo viven allí organismos anaerobios; predominan las fermentaciones, dominan las reducciones, muy pocas oxidaciones, sedimentación de lodos en putrefacción, formación de metano, en la descomposición de las proteínas se forman sh<sub>2</sub> y nh<sub>3</sub>, las sulfobacterias forman en el fondo costras blancas o rojizas.

Específicamente, refiere que algunos procesos como la retención de N parecen tener una sostenibilidad a largo plazo; otros, como la retención de P, no son sostenibles cuando existen aportes excesivos.

## 2.2 Normatividad

A continuación, se relacionan la normatividad relacionada con cuerpos lenticos y norma de vertimiento vigente para aguas residuales domésticas.

### 2.2.1 Cuerpos lenticos

En lo concerniente con la normatividad de calidad de agua en humedales ubicados en la Cuenca del Río Bogotá en jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca – CAR, el Acuerdo No. 43 del 17 de octubre de 2006 incorpora en forma general la clasificación de los cuerpos de agua teniendo en cuenta los usos para los cuales han sido asignados y adopta tanto criterios como normas definidas en el Decreto 1594 de 1984, algunos de sus artículos compilados actualmente en el Decreto Nacional 1076 del 26 de mayo de 2015 y de estudios adelantados sobre la cuenca en mención.

Los criterios y objetivos de calidad mínima en términos de DBO<sub>5</sub>, Nitrógeno y Oxígeno Disuelto asignados a la calidad de agua de los Embalses, Lagunas, humedales y demás cuerpos lenticos ubicados dentro de la cuenca del río Bogotá, se clasifican como Clase III con un horizonte proyectado al año 2020 (Ver Cuadro 5).

**Cuadro 5.** Calidad de agua en humedales según Clase III del Acuerdo CAR 43 del 2006

PARAMETRO		EXPRESADO COMO	VALOR MÁS RESTRICTIVO (Máx que se puede obtener)
PARÁMETROS ORGÁNICOS	DBO	mg/L	20
	OD	mg/L	>4
PARÁMETROS NUTRIENTES	Nitrógeno Amoniacal	mg/L	0,3
	Nitratos	mg/L	1
	Nitritos	mg/L	0,5
	Fósforo Total	mg/L	0,1
SOLIDOS	Sólidos Suspendidos	mg/L	20

**Fuente.** CAR (2006).

Tal como se menciona, los criterios de calidad de agua definidos en el Acuerdo No. 43 del 17 de octubre de 2006, son el resultado de una asignación genérica que no diferencia las condiciones particulares de los cuerpos de agua y posibles clasificaciones de uso, función y servicios ambientales específicos, en consecuencia, los criterios de la norma citada podrían no ser apropiados ante la gran variedad de humedales.

## 2.2.2 Vertimientos

La Resolución No. 631 del 17 de marzo de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, establece los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de Aguas Residuales Domésticas (ARD)<sup>4</sup> y no Domésticas (ARnD)<sup>5</sup>, a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público.

Teniendo en cuenta el objetivo del presente trabajo, a continuación, se presentan los parámetros fisicoquímicos y valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de Aguas Residuales Domésticas (ARD) a cuerpos de agua superficiales, que se encuentran definidos en el artículo 8 de la Resolución No. 631 del 17 de marzo de 2015, específicamente con una carga igual o inferior a 625 Kg/día (Ver Cuadro 6)

**Cuadro 6.** Parámetros fisicoquímicos y valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de ARD y de las ARnD de los prestadores del servicio público de alcantarillado a cuerpos de agua superficiales (Art. 8 Resolución 631/2015)

PARAMETRO		EXPRESADO COMO	VALOR MÁS RESTRICTIVO (Máx. que se puede obtener)
PARÁMETROS ORGÁNICOS	DBO	mg/L	20
	OD	mg/L	>4
	Coliformes totales	NMP/100 ml	5000
PARÁMETROS NUTRIENTES	Nitrógeno amoniacal	mg/L	0,3
	Nitratos	mg/L	1
	Nitritos	mg/L	0,5
	Fósforo total	mg/L	0,1
SOLIDOS	Sólidos suspendidos	mg/L	20
PARÁMETROS DE INTERÉS SANITARIO	Amoniaco	CL 96/50	1
	Arsénico	CL 96/50	0,05
	Bario	CL 96/50	1
	Berilio	CL 96/50	0,1
	Cadmio	CL 96/50	0,01
	Cianuro libre	CL 96/50	0,2
	Cinc	CL 96/50	2
	Cloruros	mg/L	250
	Cobalto	mg/L	0,05
	Cobre	CL 96/50	0,2

<sup>4</sup> **Definición Resolución No. 631/2015. Aguas Residuales Domésticas - ARD:** Son las procedentes de los hogares, así como las de las instalaciones en las cuales se desarrollan actividades industriales, comerciales o de servicios y que correspondan a: 1) Descargas de los retretes y servicios sanitarios. 2) Descargas de los sistemas de aseo personal (duchas y lavamanos), de las áreas de cocinas y cocinetas, de las pocetas de lavado de elementos de aseo y lavado de paredes y pisos y del lavado de ropa (No se incluyen las de los servicios de lavandería industrial).

<sup>5</sup> **Definición Resolución No. 631/2015. Aguas Residuales no Domésticas - ARnD:** Son las procedentes de las actividades industriales, comerciales o de servicios distintas a las que constituyen aguas residuales domésticas - ARD.

PARAMETRO		EXPRESADO COMO	VALOR MÁS RESTRICTIVO (Máx. que se puede obtener)
	Color	Unidades escala Platino - Cobalto	75
	Compuestos fenólicos	mg/L	0,002
	Cromo (Cr+6)	mg/L	0,05
	Difenil policlorados	Concentración de Agente Activo	No detectable
	Mercurio	mg/L	0,002
	PH	Unidades	5,0-9,0
	Plata	mg/L	0,05
	Plomo	mg/L	0,05
	Selenio	mg/L	0,01
	Sulfatos	mg/L	400
	Tensoactivos	mg/L	0,5
	Vanadio	mg/L	0,1

Fuente. MADS (2015).

### 2.3 Antecedentes Modelo IBER

A continuación se presentan algunos antecedentes y generalidades del modelo IBER, herramienta de modelización bidimensional del flujo de agua en lámina libre en aguas poco profundas (Bladé et al., 2014)

Iber es un modelo matemático bidimensional para la simulación del flujo en ríos y estuarios desarrollado a partir de la colaboración del Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, GEAMA (Universidade da Coruña), del Grupo de Ingeniería Matemática (Universidade de Santiago de Compostela), del Instituto Flumen (Universitat Politècnica de Catalunya y Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria) y promovido por el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX.

Este modelo numérico concebido para uso de la administración pública española, que puede ser descargado de la página web [www.iberaula.es](http://www.iberaula.es) y cuenta con los siguientes campos de aplicación: simulación del flujo en lámina libre en cauces naturales evaluación de zonas inundables, cálculo de las zonas de flujo preferente, cálculo hidráulico de encauzamientos, cálculo hidráulico de redes de canales en lámina libre, cálculo de corrientes de marea en estuarios, estabilidad de los sedimentos del lecho, procesos de erosión y sedimentación por transporte de material granular.

El modelo Iber consta de diferentes módulos de cálculo acoplados entre sí, incluye un módulo hidrodinámico, un módulo de turbulencia, así como un módulo de transporte de sedimentos, de granulometría uniforme, por carga de fondo, por carga en suspensión y un módulo de calidad de aguas que permite predecir la evolución temporal y espacial de las concentraciones de las siguientes

variables: temperatura, salinidad, demanda biológica de oxígeno carbonosa, nitrógeno (orgánico, amoniacal, nitritos y nitratos), oxígeno disuelto y Escherichia Coli (E. Coli).

Desde el año 2012 y hasta 2015, los desarrolladores cuentan con un registro de varios proyectos que han utilizado el software IBER 2D. En España los estudios se relacionan principalmente con: estudios de inundabilidad, definición de rondas hidráulicas, régimen de caudales ecológicos, modelación de comportamiento hidráulico, estudio de dispersión de contaminantes, rotura de presas, modelo numérico de la dinámica sedimentaria, deslinde y defensa fluvial en ríos. En Suiza el modelo se usó para estudios de la Gestión de riesgos de lagunas de alta montaña; en Costa Rica se destaca el estudio hidráulico de un Humedal; en Ecuador se resaltan estudios de rotura de presas, modelación del depósito y tránsito de sedimentos en embalses; en Venezuela se mencionan estudios de vulnerabilidad de puentes y obras de drenaje ante crecidas de ríos; en México se identifican estudios relacionados con estimación de hidrogramas de salida en cuencas, erosión marginal en ríos; en Chile modelización de la inundación costera por tsunami; en Perú estudios relacionados con acondicionamiento hidráulico de riberas de ríos y rompimiento de presas; en Salvador estudios fluviales de ríos; en Bolivia estudios de inundabilidad

A nivel de Colombia, los proyectos que han empleado el modelo IBER 2D concuerdan con los desarrollados en otros países según lo indicado en el anterior párrafo, en lo referente a estudios de inundación realizados sobre el ríos Magdalena (Barrancabermeja), Ranchería (Guajira) y Río Bogotá (Cundinamarca); estudios de efectos sobre la morfología de la confluencia de río e inicio de un estuario (Ríos Daule y Babahoyo), estudios técnicos para obras de adecuación hidráulica del cauce principal del Río Bogotá, así como, el análisis geomorfológico y de dinámica fluvial de la cuenca baja del Río Bogotá.

En relación con cuerpos de agua lenticos que tienen como condición especial una operación artificial, los proyectos encontrados con el uso del programa IBER 2D, se relacionan a continuación:

- Efectos de la sedimentación en la construcción y operación de futuros embalses, como el desarrollado en el Río Paute en Ecuador, en el que se empleó cuatro metodologías interrelacionadas, formulaciones empíricas, simulaciones 1D, 2D y 3D (Castillo, Carrillo, & Alvarez, 2015).
- Comportamiento hidrodinámico de humedales artificiales (Munguía, Blanco, & Alavez, 2016), concluyen de acuerdo con simulaciones numéricas en diferentes geometrías con el uso del software libre IBER 2D, que la reja de reja de canales, al igual que los meandros, disipan la energía y crean turbulencia en el recorrido. En cuanto a la capacidad de retener agua, circunstancia que caracteriza a los humedales, la geometría de las rejillas de canales demostró mayor capacidad de retención de volumen. Este estudio es una primera aproximación para tratar el problema de la falta de estudios de hidrodinámica para el conocimiento sobre el comportamiento del agua en los humedales artificiales.

## 2.4 Modelo numérico IBER

Los esquemas numéricos utilizados en el software Iber, la descripción detallada de las ecuaciones y correspondientes modelos de cálculo, se detallan en el Manual de Referencia Hidráulico y el artículo de la herramienta de simulación numérica del flujo en ríos<sup>6</sup>, documentos de los cuales se extrae los siguientes apartes.

### 2.4.1 Ecuaciones

De acuerdo con los desarrolladores de Iber (Bladé et al., 2014), el módulo hidrodinámico resuelve las ecuaciones bidimensionales de St. Venant, incorporando los efectos de la turbulencia y rozamiento superficial por viento:

$$\begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hU_x}{\partial x} + \frac{\partial hU_y}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial t}(hU_x) + \frac{\partial}{\partial x}\left(hU_x^2 + g\frac{h^2}{2}\right) + \frac{\partial}{\partial y}(hU_xU_y) \\ &= -gh\frac{\partial Z_b}{\partial x} + \frac{\tau_{s,x}}{\rho} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x}\left(v_t h \frac{\partial U_x}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(v_t h \frac{\partial U_x}{\partial y}\right) \\ \frac{\partial}{\partial t}(hU_y) + \frac{\partial}{\partial x}(hU_xU_y) + \frac{\partial}{\partial y}\left(hU_y^2 + g\frac{h^2}{2}\right) \\ &= -gh\frac{\partial Z_b}{\partial y} + \frac{\tau_{s,y}}{\rho} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x}\left(v_t h \frac{\partial U_y}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(v_t h \frac{\partial U_y}{\partial y}\right) \end{aligned}$$

En donde:

$h$  = Calado

$U_x U_y$  = Velocidades horizontales promediadas en profundidad

$g$  = Aceleración de la gravedad

$\rho$  = Densidad del Agua

$Z_b$  = Cota del fondo

$\tau_s$  = Fricción en la superficie libre debida al rozamiento producida por el viento

$\tau_b$  = Fricción debida al rozamiento del fondo

$v_t$  = Viscosidad turbulenta

<sup>6</sup> Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, M.E., Dolz, J., Coll, A. (2014). "Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos". Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería, Vol.30 (1) pp.1-10

En el modelo de longitud de mezcla para aguas someras, la viscosidad turbulenta se calcula con la expresión que se describe a continuación, en donde  $k = 0,41$  es la constante de Von Karman y  $d_{wall}$  es la distancia desde el punto considerado a la pared más cercana.

$$v_t = [\min(0,267 kh, kd_{wall})]^2 \sqrt{2S_{ij}S_{ij} + \left(2,34 \frac{u_f}{kh}\right)^2} \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)$$

#### 2.4.2 Condiciones de contorno

El programa Iber (Bladé et al., 2014), permite modelar contornos cerrados (tipo pared) y contornos abiertos por los cuales entra y sale el agua del dominio de cálculo. En los contornos cerrados se puede imponer o una condición de deslizamiento libre o una condición de fricción de pared. Con la condición de deslizamiento libre se desprecia el rozamiento generado por los contornos sobre el fluido. Si se considera relevante el efecto del rozamiento generado por el contorno se debe utilizar una condición de contorno tipo fricción. La velocidad tangencial a la pared puede expresarse como una función de la velocidad de fricción de pared ( $u^*$ ) y de la distancia a la pared como:

$$|U| = \frac{u_*}{0,4} \operatorname{Ln} \left( E \cdot \frac{du_*}{\nu} \right)$$

En donde:

$d =$  Distancia en perpendicular a la pared

$E =$  Parámetro cuyo valor depende de las características del flujo

#### 2.4.3 Esquemas numéricos

Las ecuaciones de aguas someras y las del modelo k-ε se resuelven mediante el método de volúmenes finitos para mallas bidimensionales no estructuradas. Los esquemas numéricos utilizados en Iber son especialmente apropiados para la modelización de cambios de régimen y de frentes seco-mojado (frentes de inundación). La discretización del dominio espacial se realiza con volúmenes finitos en mallas no estructuradas, admitiéndose estas mixtas formadas por elementos triangulares y cuadrangulares (Bladé et al., 2014).

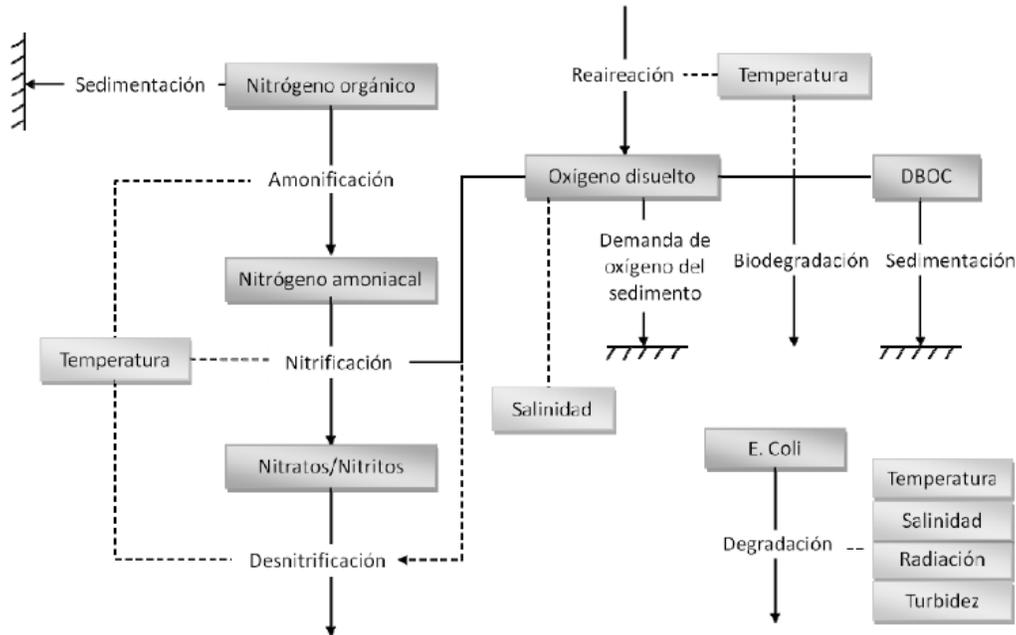
### 2.5 Módulo de calidad de aguas IBER

El módulo de calidad de aguas de Iber, permite predecir la evolución temporal y espacial de las concentraciones de las siguientes variables: temperatura, salinidad, demanda biológica de oxígeno carbonosa, nitrógeno (orgánico, amoniacal, nitritos y nitratos), oxígeno disuelto y Escherichia Coli (E. Coli). A continuación, se realizará la descripción de las ecuaciones y modelos incluidos en este

módulo de calidad, de acuerdo con el Manual de Referencia del Módulo de Calidad de Aguas de este software<sup>7</sup>.

La estructura del módulo de calidad del agua y las reacciones bioquímicas entre las diferentes especies consideradas se aprecian en la Figura 1.

**Figura 1.** Esquema completo del modelo de calidad de aguas. Las líneas discontinuas indican dependencia de un proceso en una variable



**Fuente:** Cea et al. (2016).

El solucionador numérico de IberWQ está acoplado al módulo hidrodinámico de Iber, que resuelve las ecuaciones bidimensionales de aguas someras escritas en forma conservadora como:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{q_x^2}{h} + g \frac{h^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{q_x q_y}{h} \right)$$

$$= -gh \frac{\partial Z_b}{\partial x} - \frac{gn^2 |U|}{h^{1/3}} U_x + \frac{\partial}{\partial x} \left( v_t h \frac{\partial U_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( v_t h \frac{\partial U_x}{\partial y} \right)$$

<sup>7</sup> Cea, Bermúdez, Puertas, Conde, Bladé, Corestein, & Escolano. (2016). IberWQ – Herramienta Numérica para la Simulación 2D de la Calidad de Aguas en Ríos y Estuarios. Módulo de Calidad de Aguas. Retrieved February 11, 2017, from [https://www.udc.es/citeec/imagenes/proyectos/hidraulica/proyectos\\_hidraulica11.pdf](https://www.udc.es/citeec/imagenes/proyectos/hidraulica/proyectos_hidraulica11.pdf)

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{q_x q_y}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{q_y^2}{h} + g \frac{h^2}{2} \right) = -gh \frac{\partial Z_b}{\partial y} - \frac{gn^2 |U|}{h^{1/3}} U_T$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x} \left( \nu_t h \frac{\partial U_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \nu_t h \frac{\partial U_x}{\partial y} \right)$$

En donde:

$Z_b$  = Elevación del lecho

$h$  = Profundidad

$q_x q_y$  = Componentes de la descarga

$U_x U_y$  = Velocidades horizontales promediadas en profundidad

$n$  = Coeficiente de manning

$g$  = Aceleración de la gravedad

$\nu_t$  = Viscosidad turbulenta

Cada una de las componentes consideradas en el modelo se resuelven por medio del método de volúmenes finitos, una ecuación de conservación de masa 2D promediada en profundidad, que en forma diferencial se expresa como:

$$\frac{\partial}{\partial t} (hC) + \frac{\partial}{\partial x} (hU_x C) + \frac{\partial}{\partial y} (hU_y C) = \frac{\partial F_{d,x}}{\partial x} + \frac{\partial F_{d,y}}{\partial x} + Sch$$

En donde:

$C$  = Concentración de la variable considerada (Promediada prof)

$h$  = Profundidad

$Sc$  = Término fuente sumidero que modela la generación/degradación de la sustancia

$F_x F_y$  = Flujos difusivos/dispersivos que modelan la mezcla debido a efectos como difusión laminar, turbulencia, dispersión por oleaje

$U_x U_y$  = Velocidades horizontales promediadas en profundidad

### 2.5.1 Términos fuente

La interacción entre las distintas sustancias consideradas en el modelo mediante fenómenos físicos, químicos y biológicos se modela mediante el término fuente SC. Las distintas transformaciones se modelan mediante cinéticas de primer orden:

$$S_c = k(T) \cdot C$$

En donde:

$Sc$  = Término fuente/sumidero

$k(T)$  = Constante de reacción (depende de la temperatura)

$C$  = Concentración de la variable considerada

El efecto de la temperatura se introduce en el valor de la constante cinética  $k$  mediante el modelo de Arrhenius, según:

$$K(T) = k(20) \cdot \theta^{(T-20)}$$

En donde:

$$\begin{aligned} k(20) &= \text{Constante cinética de reacción a } 20^\circ\text{C} \\ T &= \text{Temperatura del agua en } ^\circ\text{C} \\ \theta &= \text{Coeficiente de corrección por temperatura} \end{aligned}$$

## 2.5.2 Materia Orgánica Carbonosa

Uno de los principales consumos del oxígeno disuelto en una masa de agua es la degradación de la materia orgánica carbonosa, habitualmente caracterizada mediante el parámetro Demanda Bioquímica de Oxígeno Carbonosa (DBOC). La DBOC se define como la cantidad de oxígeno que necesitan los microorganismos para degradar la materia orgánica carbonosa existente en un agua.

En el término fuente de la ecuación de conservación de la demanda biológica de oxígeno carbonosa ( $S_{DBOC}$ ), se consideran los siguientes procesos:

- Degradación de la materia orgánica carbonosa
- Sedimentación de la materia orgánica carbonosa

El término fuente  $S_{DBOC}$  se puede escribir como:

$$S_{DBOC} = \underbrace{-k_{dboc} \cdot \theta_2^{(T-20)} \cdot F_{OXC} \cdot DBOC}_{\text{Degradación}} - \underbrace{\frac{V_{SDBOC}}{h} \cdot DBOC}_{\text{Sedimentación}}$$

En donde:

$$\begin{aligned} K_{dboc} &= \text{Constante de degradación de materia orgánica carbonosa} \\ F_{OXC} &= \text{Factor de atenuación debido a bajos niveles de oxígeno (adimensional)} \\ \theta &= \text{Coeficiente de corrección por temperatura } (\theta_3 = 1,047) \\ V_{SDBOC} &= \text{Velocidad de sedimentación (con valores habituales entre 0,01 y 0,36 m/d) y } h \text{ es el calado} \end{aligned}$$

La velocidad del proceso de degradación de la materia orgánica depende del oxígeno disponible, por lo que se emplea el siguiente factor corrector o factor de atenuación  $F_{OXC}$ :

$$F_{OXC} = \frac{OD}{K_{sof} + OD}$$

En donde:

$K_{soef}$  = Constante de semisaturación para la corrección de  $k_{dboc}$  por concentraciones bajas de OD.  
Para esta constante en Iber se toma el valor de 0,5 mg/L

### 2.5.3 Nitrógeno

En el ciclo del nitrógeno se consideran tres compuestos:

- Nitrógeno orgánico (N-org)
- Nitrógeno Amoniacal (N-NH3)
- Nitratos/nitritos (N-N03)

El nitrógeno amoniacal incluye nitrógeno en forma de amoniaco (NH3) y de ión amonio (NH4<sup>+</sup>). Los nitritos y nitratos se consideran de forma conjunta debido a la rapidez con la que generalmente los primeros se oxidan a nitratos. Para realizar el balance de los tres compuestos anteriores, se consideran los siguientes procesos:

- Hidrólisis del nitrógeno orgánico (amonificación)
- Nitrificación del amonio
- Desnitrificación de los nitratos
- Sedimentación del nitrógeno orgánico

Los procesos que fueron modelados en el presente trabajo se describen a continuación.

#### 2.5.3.1 Nitrógeno amoniacal

Los procesos que afectan al nitrógeno amoniacal son el incremento de concentración por la hidrólisis del nitrógeno orgánico y la disminución de la misma por la nitrificación. La nitrificación se ha considerado en su totalidad incluyendo el paso de amonio a nitritos y de estos a nitratos.

El término fuente considerado en la ecuación de conservación de masa del amonio resulta así:

$$S_{NH4} = \underbrace{k_{hn} \cdot \theta_4^{(T-20)} \cdot N_{org}}_{\text{Hidrolisis(amonificación)}} - \underbrace{K_{nit} \cdot \theta_3^{(T-20)} \cdot F_n \cdot NH4}_{\text{Nitrificación}}$$

En donde:

$k_{nit}$  = Constante de nitrificación a 20°C

$NH4$  = la concentración de nitrógeno en forma amoniacal

$F_n$  = Factor de atenuación debido a bajos niveles de oxígeno (adimensional)

$\theta_3, \theta_4$  = Coeficientes de corrección por temperatura ( $\theta_3=1,083$  -  $\theta_4=1,047$ )

La velocidad del proceso de nitrificación depende del oxígeno disponible, por lo que se emplea el siguiente factor corrector o factor de atenuación debido a bajos niveles de oxígeno  $F_n$  adimensional):

$$F_n = \frac{OD}{K_{n1/2} + OD}$$

En donde:

$K_{n1/2}$  = Constante de semisaturación para la corrección de  $K_{nit}$  por concentraciones bajas de OD.  
Para esta constante se toma el valor de 0,5 mg/L (O'Connor et al., 1981)

### 2.5.3.2 Nitratos

El término fuente considerado en la ecuación de conservación de masa de los nitratos se describe como:

$$S_{NO3} = \underbrace{k_{hm} \cdot \theta_3^{(T-20)} \cdot F_n \cdot NH3}_{\text{Nitrificación}} - \underbrace{K_{denit} \cdot \theta_5^{(T-20)} \cdot F_{dn} \cdot NO3}_{\text{desnitrificación}}$$

En donde:

$K_{denit}$  = Constante de desnitrificación a 20°C

$NO3$  = Concentración de nitrógeno en forma de nitrato

$\theta_{3\text{ y }5}$  = Coeficientes de corrección por temperatura ( $\theta_3=1,083$  -  $\theta_5=1,045$ )

$F_{dn}$  = Factor corrector para tener en cuenta que la desnitrificación sólo se produce en momentos de anoxia (adimensional)

La fórmula empleada para calcular el factor corrector por oxígeno  $F_{dn}$  es el siguiente:

$$F_{dn} = \frac{K_{dn1/2}}{K_{dn1/2} + OD}$$

En donde:

$K_{dn1/2}$  = Constante de semisaturación para la corrección de  $k_{desnitrif}$  por concentraciones altas de OD.  
Para esta constante se toma el valor de 0,1 mg/L

### 2.5.4 Oxígeno disuelto

Todos los organismos vivos dependen del oxígeno en los procesos metabólicos que producen energía para el crecimiento y reproducción. Las bajas concentraciones del oxígeno disuelto producen desequilibrios en el ecosistema acuático, lo que se traduce en un aumento de la mortalidad entre los peces y la aparición de olores, deterioros estéticos, etc. Por ello, este componente ha sido considerado tradicionalmente como el principal indicador de la salud de un sistema natural.

En el término fuente de la ecuación de conservación del oxígeno disuelto ( $S_{OD}$ ) se consideran los siguientes procesos de generación/pérdida de oxígeno disuelto:

- Reaireación superficial
- Consumo de oxígeno disuelto en el proceso de degradación bioquímica de la materia orgánica carbonosa
- Consumo de oxígeno disuelto en el proceso de nitrificación
- Demanda de oxígeno del sedimento

El término reactivo en la ecuación de transporte correspondiente se calcula como:

$$S_{OD} = \underbrace{K_{aire} \cdot \theta_1^{(T-20)} \cdot (OD_{sat} - OD)}_{\text{Reaireación}} - \underbrace{k_{dboc} \cdot \theta_2^{(T-20)} \cdot F_{oxc} \cdot DBOC}_{\text{Degradación}} - \frac{k_{dos}}{h} - \underbrace{r_a \cdot k_{nit} \cdot \theta_3^{(T-20)} \cdot F_n \cdot NH_4^+}_{\text{Nitrificación}}$$

En donde:

$OD$  = Concentración de oxígeno disuelto

$K_{aire}$  = Constante de reaireación a 20°C

$T$  = Temperatura del agua en °C

$OD_{sat}$  = Concentración de saturación de oxígeno disuelto

$K_{dboc}$  = Constante de degradación de materia orgánica carbonosa

$F_{oxc}$  = Factor de atenuación debido a bajos niveles de oxígeno

$k_{dos}$  = Tasa de demanda de oxígeno del sedimento

$r_a$  = Representa el consumo de oxígeno por oxidación del amonio en el proceso de nitrificación

$K_{nit}$  = Constante de nitrificación a 20°C

$F_n$  = Factor de atenuación debido a bajos niveles de oxígeno

$\theta$  = Coeficientes de corrección por temperatura ( $\theta_1=1,0238$  -  $\theta_2=1,047$  -  $\theta_3=1,083$ )

### 2.5.5 Reaireación

La pérdida o incremento de oxígeno disuelto por reaireación superficial se describe con una cinética de primer orden. Se considera que la variación de la concentración es proporcional al déficit de oxígeno disuelto, es decir, a la diferencia entre el nivel de saturación de oxígeno disuelto  $OD_{sat}$  y su estado actual.

La concentración de oxígeno disuelto en saturación depende fundamentalmente de la temperatura del agua, de la salinidad y de la presión atmosférica, considerándose estas tres variables en el modelo. La saturación de oxígeno disuelto se estima a partir de la temperatura del agua y su salinidad utilizando la siguiente ecuación (APHA 1995):

$$\ln[OD_{sat}(T, S, 0)] = -139,34411 + \frac{1,575701 \cdot 10^5}{T} - \frac{6,642308 \cdot 10^7}{T^2}$$

$$+ \frac{1,243800 * 10^{10}}{T^3} - \frac{8,621949 * 10^{11}}{T^4} - S \cdot \left( 1,764 * 10^{-2} - \frac{10,754}{T} + \frac{2140,7}{T^2} \right)$$

En donde:

$OD_{sat}(T,S,0)$  = Concentración de saturación de oxígeno disuelto en  $mg/l$  a la temperatura  $T$  en Kelvin, con una salinidad del agua  $S$  en  $kg/m^3$  y al nivel del mar

El efecto de la altitud sobre el nivel del mar se tiene en cuenta con la siguiente ecuación:

$$OD_{sat}(T, S, z) = OD_{sat}(T, S, 0) \cdot (1 - 0,0001148Z)$$

Siendo  $Z$  la altitud sobre el nivel del mar en metros.

La constante de reaireación  $k_{aireh}$  se calcula en función del calado ( $h$ ), la velocidad del agua ( $U$ ) y la velocidad del viento ( $V_{viento}$ ) según la siguiente ecuación:

$$k_{aire} = k_{aireh} + \frac{k_{airew}}{h}$$

En donde:

$K_{aireh}$  = Constante de reaireación a  $20^\circ C$

$K_{airew}$  = Coeficiente de reaireación en función de la velocidad del viento

La influencia del calado ( $h$ ) y de la velocidad del agua ( $U$ ) se incorpora mediante la constante  $k_{aireh}$  siguiendo el método de Covar (1976):

- Si la profundidad  $h \leq 0,61m$  se utiliza la fórmula de Owens-Gibbs (Owens et al., 1964):

$$k_{aire}(20) = 5,32 \frac{U^{0,67}}{h^{1,85}}$$

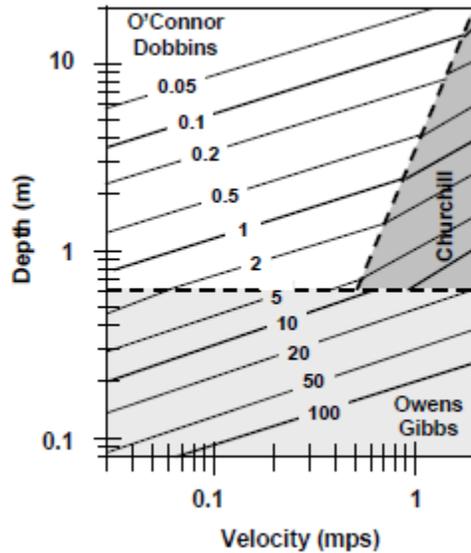
- Si  $h > 0,61$  y  $h > 3,45 * U^{2.5}$  se utiliza la fórmula de O'Connor-Dobbins (O'Connor y Dobbins, 1958):

$$k_{aire}(20) = 3,93 \frac{U^{0,5}}{h^{1,5}}$$

- En otro caso se emplea la fórmula de Churchill (Churchil et al., 1962):

$$k_{aire}(20) = 5,026 \frac{U}{h^{1,67}}$$

**Figura 2.** Tasa de reaeración  $k_{aireh}$  (d-1) versus profundidad y velocidad (Covar, 1976).



Fuente: (Cea et al., 2016)

Para incorporar los efectos del viento a la tasa de reaeración se emplea la fórmula de Banks-Herrera (Banks 1975, Banks and Herrera 1977):

$$k_{airew} = 0,78v_{viento10}^{0,5} - 0,317V_{viento10} + 0,0372V_{viento10}^2$$

En donde:

$V_{viento10}$  = Velocidad del viento medida a 10 metros sobre el nivel del agua

### 2.5.5.1 Demanda de oxígeno por el sedimento

El vertido en el medio acuático de aguas residuales con componentes orgánicos sedimentables puede provocar el depósito de éstos en el fondo, formando bancos de sedimentos de espesor variable según las cantidades vertidas y las condiciones hidrodinámicas locales. En las capas superficiales de dichos sedimentos tiene lugar una descomposición aeróbica, consumiendo el oxígeno disuelto de las aguas con las que tienen contacto.

Los sedimentos de origen orgánico en los fondos se pueden producir también por la acumulación de restos de organismos acuáticos, o de detritos transportados por la escorrentía superficial y los ríos. De esta manera, según las condiciones locales, los fondos pueden tener zonas con espesores importantes de materia orgánica sedimentada, en sitios donde las aguas están casi estancadas y las cargas de vertidos de aguas residuales son considerables, con el consiguiente incremento de la demanda de oxígeno por sedimentos, mientras que, en otras zonas de buena renovación y sin vertidos,

los sedimentos de origen orgánico pueden estar ausentes. En la Tabla 1 se presentan los rangos de DOS sugeridos por Thomann (1972) en función del tipo de ambiente

**Cuadro 7.** Valores de la demanda de oxígeno por el sedimento según el tipo de fondo (Thomann, 1972).

Tipo de fondo	K <sub>dos</sub> (gO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> /d)	
	Rango	Media
Fangos de origen urbano (recientes)	2,0-10,0	4,0
Fangos de origen urbano (antiguos)	1,0-2,0	1,5
Fangos en estuarios	1,0-2,0	1,5
Suelos arenosos	0,2-1,0	0,5
Suelos minerales	0,05-0,1	0,07

Fuente. (Cea et al., 2016)

La demanda de oxígeno por el sedimento se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$DOS = \frac{k_{dos}}{h}$$

En donde:

*K<sub>dos</sub>* = Tasa de demanda de oxígeno por el sedimento  
*h* = calado o profundidad

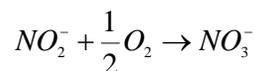
### 2.5.5.2 Consumo de oxígeno en el proceso de nitrificación

La nitrificación es un proceso en dos fases mediante el cual los compuestos amoniacales se transforman en primer lugar en nitritos y posteriormente en nitratos. La primera fase de oxidación es realizada por bacterias nitrosomonas según la reacción química:



En este proceso de oxidación se consumen 3.43g de oxígeno por cada gramo de nitrógeno amoniacal.

Durante la segunda fase, las bacterias denominadas nitrobacter oxidan los nitritos a nitratos, en esta segunda fase se consumen 1.14g de oxígeno por cada gramo de nitrógeno en forma de nitritos.



Si se combinan las dos reacciones, la oxidación completa del amonio a nitratos puede representarse por:



Siendo necesarios un total de 4.57 g de oxígeno para la completa oxidación de cada gramo de nitrógeno amoniacal.

En la nitrificación se considera en su totalidad incluyendo el paso de amonio a nitritos y de éstos a nitratos. El consumo de oxígeno debido al proceso de nitrificación se incorpora mediante el siguiente término reactivo en la ecuación de oxígeno disuelto:

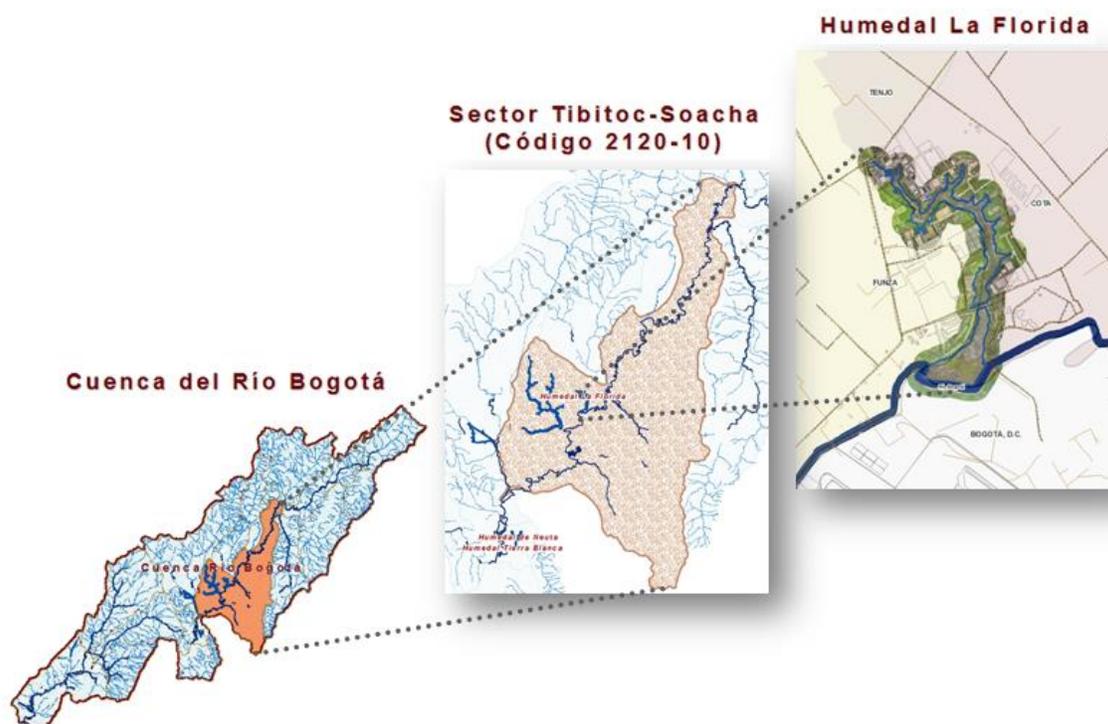
$$S_{OD} = -r_a \cdot k_{nit} \cdot \theta_3^{(T-20)} \cdot F_n \cdot NH_4^+$$

donde  $r_a$  es el consumo de oxígeno por oxidación del amonio (4.57 mgO/mgN),  $k_{nit}$  es la constante de nitrificación a 20°C,  $F_n$  es el factor de atenuación debido a bajos niveles de oxígeno (adimensional) y  $\theta_3$  es el coeficiente de corrección por temperatura ( $\theta_3=1.083$ ).

### 3. Caracterización del humedal<sup>8</sup>

El humedal La Florida forma parte de la cuenca media del Río Bogotá, en inmediaciones al cauce del Río Bogotá sobre la margen izquierda de éste en el tramo del Sector Tibitoc-Soacha (Código 2120-10) según la clasificación del Acuerdo CAR 43 de 2006<sup>9</sup>, exactamente en el cuadrante comprendido entre las coordenadas E: 990523, N: 1016998 y E: 992334, N: 1014018. El humedal La Florida tiene jurisdicción en los municipios de Cota hacia el costado oriental y Funza hacia el costado occidental, siendo este cuerpo hídrico el límite político administrativo de dichos municipios.

**Figura 3.** Localización general humedal La Florida



**Fuente.** Elaboración propia.

Este humedal tiene un área superficial total de 81 hectáreas aproximadamente, equivalentes al vaso o cuerpo del humedal y un área declarada como Reserva Hídrica de 104,17 hectáreas. Está compuesto por dos cuerpos de agua independientes que se encuentran *separados por un terraplén* que no permite

<sup>8</sup> Adaptado de (CAR & Universidad Militar Nueva Granada, 2008), (CAR & EPAM S.A. E.S.P, 2016) y (CAR, 2006a).

<sup>9</sup> Comprendida por el río Bogotá y sus afluentes, y otros que nacen en los cerros al oriente del perímetro urbano de Bogotá y cerros al oriente de Chía desde la desembocadura del río Neusa, hasta la desembocadura del río Soacha, dentro de los que se destacan los ríos Salitre, Fucha y Tunjuelo, con excepción de los ríos Teusacá, Frío, Río Negro, Chicú, y Balsillas. (...) e). Humedales ubicados en los costados occidental y oriental del río Bogotá, corresponden a la Clase III.

la comunicación entre ellos, identificados desde la Declaratoria de Reserva Hídrica realizada por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca a través del Acuerdo CAR No. 46 del 2006 como "Florida Sector 1" y "Florida Sector 2", que se caracterizan por:

- Florida Sector 1: definido como Florida baja o Florida Sector 1, se extiende entre el Río Bogotá (al sur) y el canal Chicú del Sistema Hidráulico de Manejo Ambiental y Control de Inundaciones (SHMACI) que tiene su tránsito de forma paralela con el terraplén existente (al norte). Este sector se caracteriza por un visible espejo de agua en alrededor de 36 hectáreas.
- Florida Sector 2: también denominado Florida Alta o Florida Sector 2 se extiende entre el terraplén existente (al sur) y la carretera que lleva a la glorieta de Siberia a Funza (al noroccidente). Este es el sector que mayor terreno ocupa con aproximadamente 45 hectáreas, en su mayoría ocupada con vegetación típica de humedal, que dificulta la visualización de espejo de agua.

El humedal La Florida integra el Sistema Hidráulico de Manejo Ambiental y Control de Inundaciones (SHMACI) que es operado por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR), se denomina de esta forma desde el Acuerdo CAR 037 de 2014, dejando la figura conocida como "Distrito de Riego y Drenaje La Ramada". Este humedal se alimenta en temporadas secas del canal Chicú (Sectores 1 y 2), canal que de igual manera alimenta al humedal Gualí-tres esquinas-Funzhé. Para el caso de La Florida existe sobre el canal dos compuertas que son maniobradas por personal de la CAR, una de ellas permite distribuir desde el sector 2 el agua captada del Río Bogotá hacia la estación elevadora de tornillo de La Isla, desde donde se impulsa el agua hacia otro tramo del sistema.

Como se mencionó, el sector 2 tiene un efluente hacia la estación de bombeo y embalse La Isla mediante una tubería bajo la autopista Cota – Funza. Con respecto al sector 1, este no cuenta con un efluente que pueda ser maniobrado mecánicamente y posterior a las obras de adecuación hidráulica del Río Bogotá fue suspendida una alcantarilla de desagüe que antes existía, debido a que, en crecientes extraordinarias del Río Bogotá, los niveles superan el nivel del agua y el terreno del sector 1 del humedal.

Es importante resaltar que los niveles del cuerpo lagunar o humedal La Florida son regulados de manera constante y sincronizada con las estaciones de bombeo, compuertas de regulación tipo presa del Sistema Hidráulico de Manejo Ambiental para mitigar los efectos nocivos derivados de las crecientes súbitas, y al mismo tiempo conservar hidratado dicho ecosistema.

### **3.1 Aspectos generales de la cuenca**

A continuación, se presentan los aspectos generales del humedal La Florida (Sector 1 y 2), en torno a la caracterización física realizada para la Subcuenca del río Bogotá Sector Tibitoc-Soacha 2120-10 dentro del Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del Río Bogotá del año 2006.

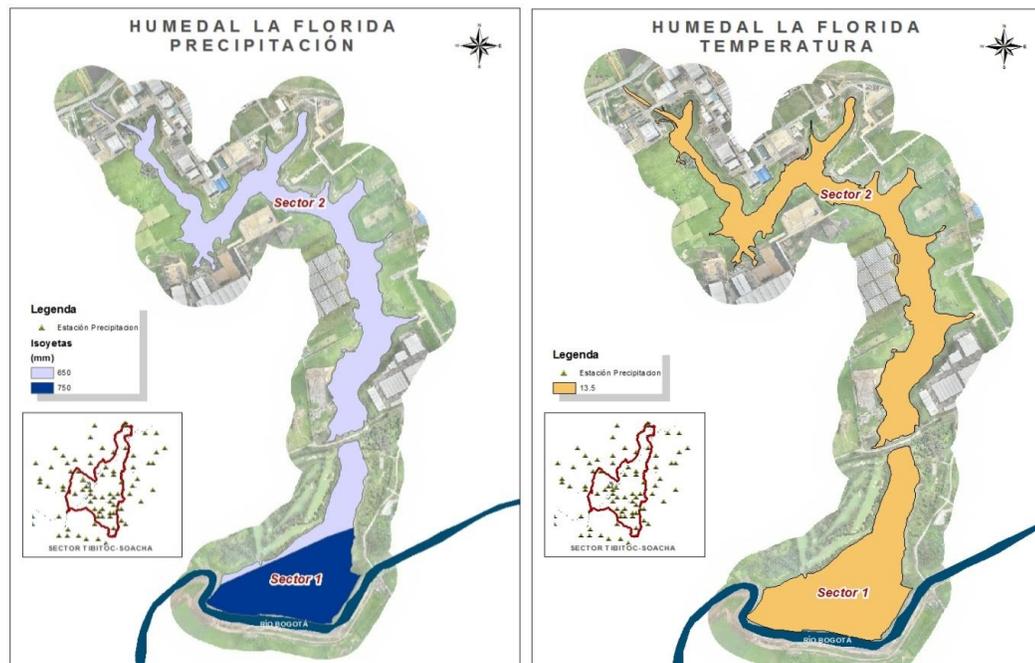
En relación a la información climatológica la información que en el siguiente cuadro se contempla el total de las estaciones climatológicas operadas por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM y la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá ubicadas al interior y exterior de la Subcuenca del río Bogotá Sector Tibitoc-Soacha (CAR, 2006b)

**Cuadro 8.** Climatología del humedal La Florida

CLIMATOLOGÍA					
Precipitación media anual (mm)			Temperatura media anual (mm)		
Máxima	Media	Mínima	Máxima	Media	Mínima
750	700	650	13.5	13.5	13.5
Distribución de la precipitación de tipo bimodal			Gradiente de temperatura varía a una Tasa de 0,6°C por cada 100 m		
Evaporación media anual (mm)			Evapotranspiración Potencial media anual (mm)		
Máxima	Media	Mínima	Máxima	Media	Mínima
950	950	950	925	925	925
Gradiente de evaporación varía a una Tasa de 24 mm por cada 100 m			Empleando la Fórmula de Turc		
Evapotranspiración Real media anual (mm)			Clasificación climática		
Máxima	Media	Mínima	Máxima	Media	Mínima
548	529	509	-	-	-
Obtenida a partir de la metodología de Turc, Langbein y Wun			Frío Semiárido (Fsa)		

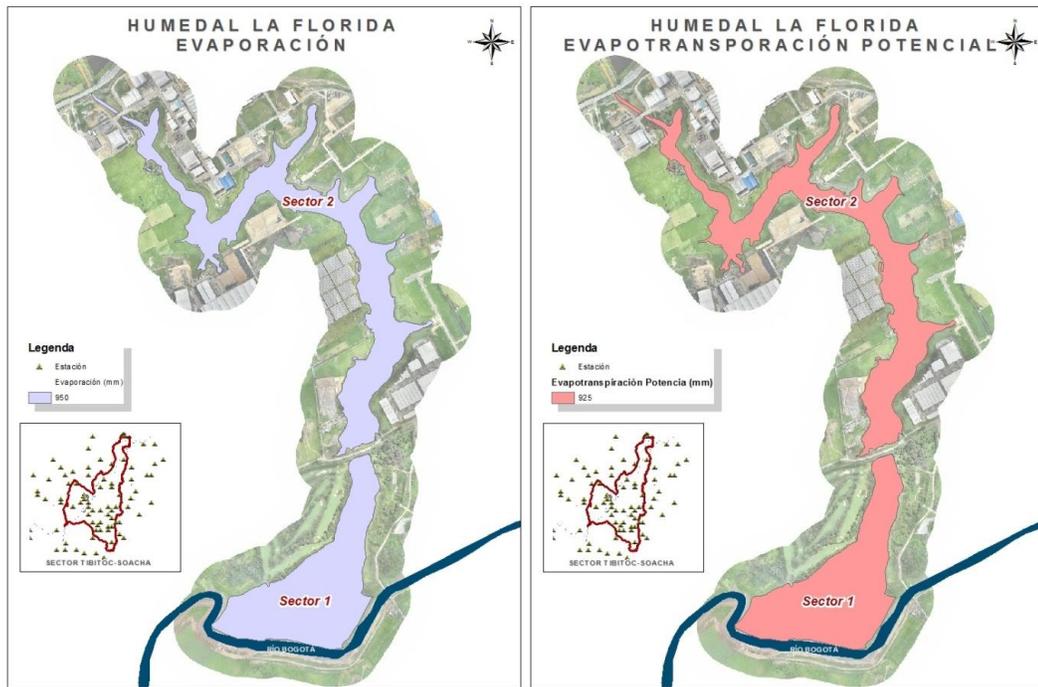
Fuente. Elaboración a partir de CAR (2006b).

**Figura 4.** Distribución espacial Precipitación y Temperatura Humedal La Florida



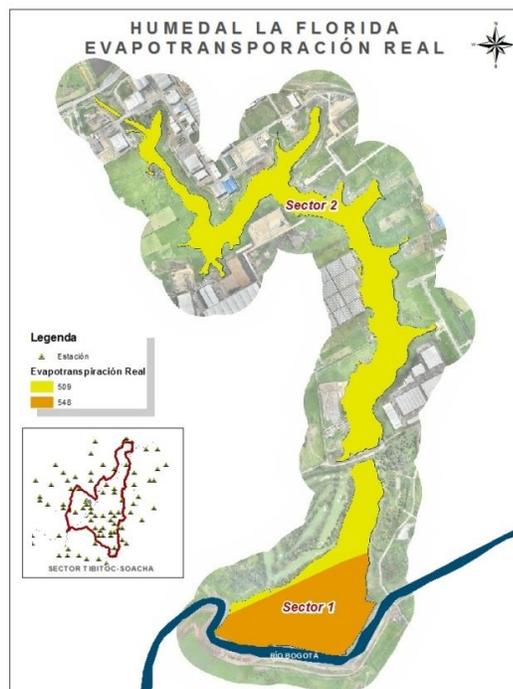
Fuente. Elaboración a partir de CAR (2006b).

**Figura 5.** Distribución espacial Evaporación y Evapotranspiración Potencial Humedal La Florida



**Fuente.** Elaboración a partir de CAR (2006b)

**Figura 6.** Distribución espacial Evapotranspiración Real Humedal La Florida



**Fuente.** Elaboración a partir de CAR (2006b).

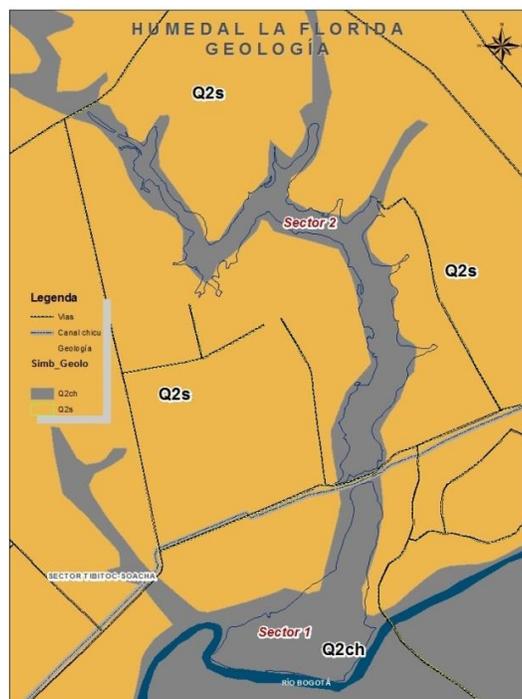
La base de información relacionada con la geología del humedal La Florida, corresponde a la cartografía geológica aplicada a la zonificación geomecánica de la Sabana de Bogotá del Servicio Geológico Colombiano (2004), a escala 1:25.000 (CAR & EPAM S.A. E.S.P, 2016).

**Cuadro 9.** Geología Humedal La Florida

<b>GEOLOGÍA</b>	
Formaciones geológicas del cuaternario	
<b>Formación Sabana (Q2s)</b>	Comprende sedimentos lacustres, constituidos principalmente por arcillas. Hacia los márgenes de la cuenca existe un incremento en las intercalaciones de arcilla orgánica, turba, arcillas arenosas, arenas arcillosas y en sectores puntuales, gravas, gravillas y arenas
<b>Formación Chía Q2ch (Stfl1)</b>	está constituida principalmente por arcillas de color gris claro, oscuro y amarillo, y localmente puede contener limos y arcillas orgánicas. Su espesor máximo puede alcanzar los 5 m. Se pueden interpretar como arcillas de inundación de una edad Pleistoceno Tardío a Holoceno. Abarca el humedal y la llanura de inundación del Río Bogotá

**Fuente.** CAR & EPAM S.A. E.S.P (2016).

**Figura 7.** Geología del Humedal La Florida



**Fuente.** Elaboración a partir de CAR (2006b).

La descripción de la geomorfología del humedal La Florida del Cuadro 10, tiene como base los siguientes estudios: “Levantamiento detallado de suelos en las áreas planas de 14 municipios de la Sabana de Bogotá. Departamento de Cundinamarca”, del IGAC (2012), a escala 1:10.000 y el “Estudio general y detallado de suelos de los municipios de Cota, Funza, Mosquera y parte de Madrid

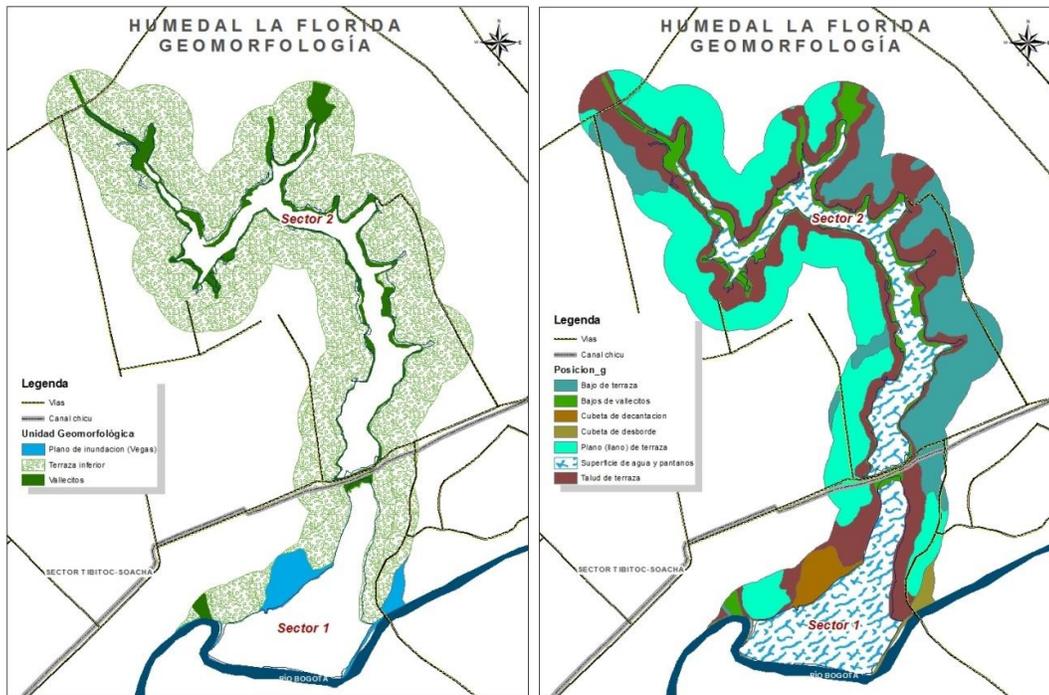
(Departamento de Cundinamarca)”, del IGAC (1977 ), con mapas a escala 1:25.000 (CAR & EPAM S.A. E.S.P, 2016).

**Cuadro 10.** Geomorfología Humedal La Florida

<b>GEOMORFOLOGÍA</b>	
<b>Unidad Fisiográfica: planicie fluvio lacustre Unidad geomorfológica</b>	
<b>Terraza nivel inferior</b>	Nivel de terreno plano, generalmente no inundable o solo parcialmente. Está constituida por arcillas, con turbas y arcillas orgánicas ocasionales. Su relieve es plano, con pendientes menores de 3% y su disección es nula. Dentro de la terraza se diferencia el plano o llano propiamente dicho, de pendiente más baja, que constituye el cuerpo o parte superior de la terraza, y el talud de terraza, que sirve de contacto con las unidades inferiores, constituido por una franja inclinada que bordea la terraza, cuya pendiente puede fluctuar entre 1 y 12%.
<b>Vallecitos</b>	Su posición geomorfológica en el conjunto de la planicie fluvio lacustre es la de bajos. Su relieve es plano cóncavo, con pendientes inferiores al 1%. Su proceso morfogenético es la sedimentación física y biológica. Por lo general, se encuentran ocupados por vegetación hidrófila y por humedales, con restos de espejos de agua y vegetación hidrofítica (flotante y enraizada).
<b>Plano de inundación</b>	Su relieve es plano a plano cóncavo, con pendientes entre 0 y 3%. Su proceso morfogenético es la sedimentación física por los materiales que traen las corrientes en los períodos de aguas altas y que se acumulan en los planos de inundación.

**Fuente.** CAR & EPAM S.A. E.S.P (2016).

**Figura 8.** Geología del Humedal La Florida



**Fuente.** Elaboración a partir de CAR (2006b).

## 4. Metodología

### 4.1 Fase de conocimiento y manejo del modelo

El proyecto implementó el Modelo Bidimensional del Flujo en Lámina Libre en Aguas Poco Profundas IBER 2D, que se trata de un modelo matemático bidimensional para la simulación del flujo en lámina libre y procesos de transporte en ríos y estuarios (Bladé et al., 2014). En este sentido, y para el adecuado desarrollo del modelo, se procedió con la revisión de los manuales básicos de funcionamiento del programa, así como a la realización de dos cursos online en la plataforma de [www.ibercursos.com](http://www.ibercursos.com), denominados: "Curso de modelización numérica bidimensional de flujo en lámina libre con IBER 2.3.2" y "Curso avanzado de modelización de calidad de aguas en ríos y estuarios con IBER 2.3.2", impartidos por profesores del Instituto Flumen de la Universidad Politécnica de Cataluña y del Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente de la Universidad de la Coruña, con una dedicación equivalente a 90 horas y 70 horas respectivamente entre mayo y julio de 2016.

### 4.2 Fase de obtención y procesamiento de información primaria y secundaria

Se procedió con la revisión y procesamiento de información primaria relacionada con calidad, hidrología e hidráulica del Humedal La Florida. Posteriormente, se estableció los requerimientos de información del modelo IBER 2D para la implementación del modelo computacional hidráulico y de calidad de agua en el Humedal La Florida, así mismo, se verificó en estudios y documentación existente sobre el humedal La Florida la disponibilidad de información necesaria para correr los modelos en mención (Ver Cuadro 11)

**Cuadro 11.** Requerimientos de información hidráulicos, hidrológicos y de calidad

Estudio	Disponibilidad información	Fuente de información
Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del Río Bogotá. Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca.	<ul style="list-style-type: none"><li>• Cartografía base en formato <i>shapefile</i> (Cuenca, subcuenca, río, drenaje, curvas de nivel, lagunas, predial)</li><li>• Cartografía temática en formato <i>shapefile</i> y <i>raster</i> (precipitación, temperatura, evaporación, evapotranspiración, hidrología, isothermas, isoyetas, geomorfología, geología, uso de suelo, unidad climática)</li></ul>	Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR - Consorcio Planeación Ecológica Ltda – Ecoforest Ltda. Contrato N° 721 del 2005.

Estudio	Disponibilidad información	Fuente de información
Elaborar el plan de manejo ambiental del Distrito de Manejo Integrado Cerro Juaica, reserva Hídrica <i>Humedal La Florida</i> , Reserva Hídrica Humedal El Juncal y actualización del plan de manejo ambiental de la reserva forestal protectora el robledal.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Levantamiento topográfico y batimétrico del humedal La Florida en formato dwg.</li> </ul>	Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca Convenio No. 1069 de 2008 con la Universidad Militar Nueva Granada.
Realizar los diseños detallados para la reconfiguración hidrogeomorfológica de los humedales La Florida, Gualí, Tres Esquinas y Lagunas del Funzhé, Laguna De La Herrera, Tierra Blanca y Neuta; determinar las capacidades de asimilación de nutrientes y contaminantes, y proponer las acciones a realizar para la rehabilitación y recuperación de sus hábitats.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cartografía base en formato <i>shapefile</i> (construcciones, curvas de nivel, vías, canal Chicú, Ramada, represa La Isla, predial)</li> <li>• Cartografía temática en formato <i>shapefile</i> y <i>raster</i> (Uso y conflictos del suelo, estudio de suelos, geología, geomorfología)</li> <li>• Modelo Digital de Elevación y Ortomosaico La Florida</li> <li>• Inventario de vertimientos</li> <li>• Monitoreos de calidad de agua en el humedal La Florida y vertimientos</li> </ul>	Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca Contrato No. 1390 de 2014.
Estudio de la calidad trófica de la ciénaga La Florida	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Plan de Muestreo Humedal La Florida en siete (7) puntos de La ciénaga (pH, Hierro, Fósforo Total, Oxígeno Disuelto, NTK.</li> <li>• Inventario de vertimientos</li> </ul>	Trabajo de grado, Escuela Colombiana de Ingeniería. (Baracaldo, 2017)
Monitoreos de calidad de agua históricos en el humedal La Florida	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Monitoreos de calidad de agua en el humedal La Florida y vertimientos.</li> </ul>	Laboratorio Ambiental de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR)
Datos monitoreados por la Estación denominada Apto El Dorado [21205790]	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Precipitación total (mm)</li> <li>• Temperatura media (°C)</li> <li>• Serie histórica registrada de 1972 y 2015</li> </ul>	IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales

Fuente. Elaboración propia.

### 4.3 Fase de depuración y definición de información para el Modelo

### 4.3.1 Inventario de aportes en el humedal La Florida Sector 2

De acuerdo con los estudios existentes sobre el humedal La Florida, se determinó las descargas de aguas lluvias, captaciones de agua y vertimientos existentes sobre la Florida Alta o Florida Sector 2 el cual se extiende entre el terraplén existente (al sur) y la carretera que lleva a la glorieta de Siberia a Funza (al norte). Posteriormente, se verificó la procedencia de los vertimientos que se encontraban inventariados, corroborando que la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la Zona de Operaciones Logísticas Funza (ZOL Funza) hace entrega del efluente tratado actualmente (0,5-0,7 L.p.s.) a la red de servicio de alcantarillado que Aguas de La Sabana presta en el sector. Del mismo modo, se constató y tomó una muestra en el vertimiento que se ubica junto a la bodega de la empresa Helados Rico, sin embargo, dicha empresa no se encontraba en funcionamiento, por lo tanto, no se tiene clara la procedencia del vertimiento de tal empresa.

De esta forma se culminó la etapa de depuración de información como se presenta en los siguientes cuadros, fotografías y Anexo 1, éste último contempla la información inicial recolectada.

**Cuadro 12.** Inventario de descargas de aguas lluvias y vertimientos Humedal La Florida Sector 2

Item	Nombre	Tipo	Este (m)	Norte (m)	Observación
1	Terrapuerto	Lluvias	992014,934	1015362,99	En los predios de Terrapuerto, al costado sur por la carretera al oriente que comunica con el Municipio de Funza
2	Terrapuerto	Lluvias	992151,855	1015561,76	Tubo de aproximadamente 24 pulgadas, ubicado en la parte trasera de los predios de Terrapuerto, anteriormente Finca Las Amelias, predio que se dedicaba al cultivo de flores. Actualmente, se ubica un parque industrial.
3	Terrapuerto	Lluvias	992266,24	1015728,34	Tubo de aproximadamente 40 pulgadas, localizado entre los predios de Terrapuerto y el nuevo proyecto de bodegas que está iniciando su construcción ubicado en la Finca Rosalinda.
4	Terrapuerto	Lluvias	992140,746	1015901,18	Tubo de aproximadamente 40 pulgadas, descarga de aguas lluvias
5	Intexzona	Lluvias	991837,512	1016534,8	Tubo de aproximadamente 30 pulgadas, localizado por el costado norte del humedal, de aguas lluvias. Se encuentra ubicado en los predios de Intexzona y Rosalinda.

Item	Nombre	Tipo	Este (m)	Norte (m)	Observación
6	Intexzona	Lluvias	991609,466	1016516,39	Tubo de aproximadamente 20 pulgadas. Se encuentra ubicado por el costado norte del humedal
7	Intexzona	Lluvias	991692,694	1016725,26	Tubería de aproximadamente 40 pulgadas. Está ubicado por el costado norte del humedal
8	Intexzona	Lluvias	991668,062	1016924,93	Tubería de aproximadamente 20 pulgadas. Aforo con un resultado igual a 0.8 L.p.s. Se encuentra ubicado por el costado norte del humedal.
9	Intexzona	Lluvias	991655,728	1016854,28	Tubería de aproximadamente 20 pulgadas. Aforo con un resultado igual a 0.005 L.p.s., se encuentra ubicado por el costado norte del humedal.
10	Flores Yata SA	Lluvias	991920	1016130	Tubería PVC 12 pulgadas, escorrentía vías e invernaderos
11	Intexzona	Lluvias	991729	1016848	Tubería 40' escorrentía vías internas
12	Intexzona	Lluvias	991448	1016623	Tubería 40' escorrentía vías internas
13	Intexzona (lluvias)	Lluvias	992034,739	1016528,64	Tubería de aproximadamente 50 pulgadas. En el momento de la visita se encontró seco. Está ubicado por el costado norte del humedal
14	Intexzona	Vertimiento	990666	1016891	Durante los recorridos para muestreos de calidad de agua se evidenció este vertimiento localizado en los predios de Intexzona, al parecer proveniente de una de sus bodegas, la cual se dedica a la elaboración de helados (Rico). En visita se informó que dicha empresa se encuentra en liquidación, no estaba en funcionamiento, sin embargo, la descarga continúa. En el estudio de CAR & EPAM, se reporta un caudal de 0,805 L.p.s. (enero de 2016). El día 11 de abril de 2017 se tomó una muestra de calidad de agua y se realizó un aforo obteniendo un caudal 0,64 L.p.s.
15	Intexzona	Lluvias	990740,037	1016825,22	Es una alcantarilla de agua lluvia

Item	Nombre	Tipo	Este (m)	Norte (m)	Observación
16	Zona de Operaciones Logísticas Funza (ZOL Funza) - Terraum	Lluvias	991148	1016069	Tubería de 52" de diámetro aproximadamente - Compuerta 1. Sistema de drenaje de Aguas lluvias de la Zona de Operaciones Logísticas Funza (ZOL Funza)
17		Lluvias	991210	1016082	Tubería de 52" de diámetro aproximadamente - Compuerta 2. Sistema de drenaje de Aguas lluvias de la Zona de Operaciones Logísticas Funza (ZOL Funza).

**Fuente.** Elaboración a partir de CAR & EPAM S.A. E.S.P, 2016 y Baracaldo (2017).

**Cuadro 13.** Aporte y extracción principal en el Humedal La Florida Sector 2

Nombre	Este (m)	Norte (m)	Observación
Afluente	992063,07	1015187,36	Box culvert y compuerta 1,50 * 1,50 m que forma parte del Sistema hidráulico de manejo ambiental y control de inundaciones, SHMACI Operación y control de los niveles de la ciénaga
Efluente	990524,69	1016989,05	Salida hacia la Estación elevadora de Tornillo SHMACI La Ramada alimentación del embalse La Isla

**Fuente.** CAR & EPAM S.A. E.S.P (2016).

A continuación, se presenta el registro fotográfico de visitas realizadas para este trabajo, en la verificación de descargas en el Humedal La Florida Sector 2.

**Foto 1.** Descargas Humedal La Florida Sector 2 junto a bodega Helados Rico E: 990666, N: 1016891



**Fuente.** Elaboración propia.

**Foto 2.** Descarga de aguas lluvias de Intexzona E: 9990714, N: 1016812



**Fuente.** Elaboración propia.

**Foto 3.** Descarga de aguas lluvias de Intexzona E: 9990714, N: 1016812



**Fuente.** Elaboración propia.

**Foto 4.** Descarga de aguas lluvias de Intexzona E: 990732, N: 1016865



**Fuente.** Elaboración propia.

**Foto 5.** Descargas de sistema de drenaje de aguas lluvias de ZOL Funza



**Fuente.** Elaboración propia.

**Foto 6.** Descarga de aguas lluvias seco para el momento de la visita E: 992034, N: 1016528



**Fuente.** Elaboración propia.

### 4.3.2 Datos de calidad de agua

Considerando que las sustancias y variables incorporadas en el módulo de calidad de IBER, corresponden a: salinidad, temperatura, Escherichia Coli, oxígeno disuelto, demanda bioquímica de materia orgánica carbonosa, nitrógeno orgánico, amoniacal, nitrógeno en forma de nitritos y nitratos; se hizo uso de información secundaria que contemplara el mayor número de dichos parámetros, en consecuencia, se retomaron los datos de calidad de agua del estudio contratado por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR con EPAM S.A. E.S.P., así como datos de los muestreos realizados por el Laboratorio Ambiental de la Corporación en diferentes puntos del Humedal La Florida durante el año 2016 (ver Anexo 2) .

Debido a que en la información disponible el método utilizado para cuantificar Escherichia Coli, corresponde al ensayo con tubos Multiple (NMP) y dado a que este método no admite una relación con la técnica del filtro membrana cuyos resultados se expresan en UFC/100 ml, no fue posible hacer uso de los resultados existentes de concentraciones de E. Coli en el humedal La Florida Sector 2.

Los resultados adoptados para el presente trabajo son los que se relacionan en los siguientes cuadros, de igual manera, se presentan como información adicional los resultados obtenidos para pH, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales y DQO.

**Cuadro 14.** Resultados de muestreos de calidad de agua en el Humedal La Florida sector 2 del estudio realizado por EPAM E.S.P. S.A.

Ítem		1	2	3	4
Fecha muestreo		4/8/2016	4/8/2016	4/8/2016	4/8/2016
Coordenadas / parámetro	X	992039	992047	992020	990689
	Y	1015217	1016127	1016517	1016886
DBO <sub>5</sub>	mg/L	7.68	<5.0	77	7.23
Nitratos N-N0 <sub>3</sub>	mg/L	9.07	9.53	12.9	3.11
Nitrógeno Amoniacal N-NH <sub>3</sub>	mg/L	3.76	0.106	21.5	5.84
Temperatura	°C	16.13	16.6	18.87	19.38
OD	mg/L	0.19	0.71	6.85	1.18
pH	Und	6.55	6.78	7.02	3.3
Conductividad Eléctrica	uS/cm	261	384	523	1218
Sólidos Disueltos totales	mg/L	131	192	219	609
DQO	mg/L	24.4	48.6	186	17.2

Fuente. CAR & EPAM S.A. E.S.P (2016).

**Cuadro 15.** Resultados de muestreos de calidad de agua en el Humedal La Florida sector 2 realizados por el Laboratorio Ambiental de la CAR

Punto	Fecha muestreo	Coordenadas		DBO <sub>5</sub>	Nitratos N-N0 <sub>3</sub>	Nitrógeno Amoniacal N-NH <sub>3</sub>	Temp agua	OD	Caudal	
		X	Y	mg/L	mg/L	mg/L	°C	mg/L	L/s	
5-6	Canal Chicú-Puerta De Derivación Parque La Florida	23/06/2016	992068	1015137	7.4	0.371	4.322	16.5	1.5	-
6-9	Ver Helados Rico	11/4/2017	990666	1016891	< 2	0.734	0	18.7	4.36	0.64
7-10	Canal arriba del puente Intexzona	11/5/2017	990732	1016865	15.2	0.673	3,619	18.6	4.3	-

Fuente. CAR (2017).

Los puntos muestreados se encuentran distribuidos a lo largo del humedal La Florida Sector 2, como se puede apreciar en la siguiente imagen.

**Figura 9.** Puntos de muestreo en el Humedal La Florida Sector 2



Fuente. Elaboración propia.

#### **4.4 Fase de implementación del modelo en el Humedal La Florida Sector 2**

En los siguientes numerales, se presentan las actividades llevadas a cabo para el montaje del modelo hidráulico y de calidad en el humedal La Florida sector 2 con el uso de IBER 2D.

##### **4.4.1 Condiciones hidrodinámicas**

La implementación del modelo hidráulico en el humedal La Florida, contempló las siguientes actividades:

##### **4.4.1.1 Balance hídrico**

Existen múltiples modelos para calcular el balance hídrico en una cuenca hidrográfica a escala mensual, por ejemplo: el Modelo T (Thornthwaite & Mather, 1955), Modelo P (Palmer, 1965), Modelo Temez (Temez, 1977), Modelo abcd (Thomas, 1981), entre otros.

Para los fines del presente estudio se referencian los modelos “abcd” y Modelo T (Thornthwaite & Mather, 1955) para estimar el balance hídrico de la cuenca, teniendo en cuenta que son los modelos más recomendados (Fernández, W, et al (2009)) de cuenca a nivel mensual en comparación con otros modelos según lo referenciado por Alley (1984, 1985)<sup>10</sup>.

**Modelo de Thomas (1981) – Modelo abcd.** El modelo de Thomas (1981) – Modelo "abcd", está compuesto por cuatro parámetros; dos relacionados con las características de la escorrentía, y dos relacionados con el agua subterránea (Thomas, 1981; Alley, 1984). Se define una variable de estado “ $W_i$ ” que corresponde al agua disponible en la cuenca y que es función de la precipitación “ $P_i$ ” y del almacenamiento de agua en el suelo “ $S_w$ ”.

$$W_i = P_i + S_{w\ i-1}$$

El modelo establece una segunda variable de estado “ $Y_i$ ”, que es la suma de la evapotranspiración actual “ $E_i$ ” durante el periodo “ $i$ ”, y el almacenamiento de humedad del suelo “ $S_i$ ” al final del mismo periodo “ $i$ ”; esta variable se expresa así:

$$Y_i = E_i + S_i$$

Esta variable se calcula como una función no lineal del agua disponible, así:

$$Y_i = \frac{W_i + b}{2a} - \left[ \left( \frac{W_i + b}{2a} \right)^2 - \frac{W_i * b}{a} \right]^{1/2}$$

Dónde,

$$a = \frac{2b}{Y_i b} - \left( \frac{b}{Y_i b} \right)^2$$

Asumiendo que el almacenamiento de humedad del suelo al inicio del mes equivale a “ $Y_i$ ”, se obtiene:

$$S_{w\ i} = Y_i \exp\left(\frac{-PE_i}{b}\right)$$

El escurrimiento superficial “ $R_{o\ i}$ ” y la recarga de agua subterránea “ $R_{g\ i}$ ” son respectivamente:

$$R_{o\ i} = (1 - c) * (W_i - Y_i)$$

$$R_{g\ i} = c * (W_i - Y_i)$$

---

<sup>10</sup> (Camargo, 2016)

El almacenamiento de agua en la zona saturada “ $S_{g i}$ ” durante el periodo “ $i$ ” es calculado empleando balance de masa, así:

$$S_{g i} = \frac{R_{g i} + S_{g i-1}}{d + 1}$$

El caudal de agua subterránea “ $Q_{g i}$ ” y el caudal total en el talweg principal “ $Q_i$ ”, son respectivamente:

$$Q_{g i} = d * S_{g i}$$

$$Q_i = R_{o i} + Q_{g i}$$

**Modelo de Thornthwaite & Mather (1955) – Modelo T.** En este modelo se asume que el suelo tiene una determinada capacidad “ $\phi$ ” de almacenamiento de agua (humedad); la variable de estado “ $S_i$ ” representa la humedad almacenada en el suelo al final del mes “ $i$ ”; la humedad del suelo puede añadirse o substraerse dependiendo de si la precipitación “ $P_i$ ” que cae en el mes, es mayor o menor que la evapotranspiración potencial “ $PE_i$ ” (Alley, 1984 ; Xu, Singh, & Yongqin, 2008 ; Karamouz, Nazif, & Falahi, 2013)

En el primer caso cuando  $P_i > PE_i$ , la solución del modelo se encuentra de la siguiente forma:

$$S_i = \min\{(P_i - PE_i) + S_{i-1}, \phi\}$$

Cuando  $P_i < PE_i$ , la solución del modelo es la siguiente:

$$S_i = S_{i-1} \exp\{-(PE_i - P_i)/\phi\}$$

El déficit de agua en cada mes “ $D_i$ ” se expresa de la siguiente forma:

$$D_i = \phi - S_i$$

En tanto que los aportes excedentes de caudal que en esencia aportan a la escorrentía superficial “ $Q_i$ ” del talweg principal, se expresan así:

$$\Delta Q_i = (P_i - PE_i) + S_{i-1} - \phi \quad S_i = \phi$$

Se determinarán, los caudales de ingreso puntuales de acuerdo con la información existente en el humedal, así como extraídos del cuerpo lagunar conforme a los usos identificados en el área.

- Datos de entrada:

Para estimar el balance hídrico en la cuenca se aplicó los Modelo de Thomas (1981) – Modelo “abcd” y Modelo T (Thornthwaite & Mather, 1955); empleando para ello los registros de

precipitación y temperatura medios mensuales de las estaciones denominadas: Aeropuerto El Dorado identificada con el código 21205790 operada por el IDEAM y La Ramada identificada con el código 2120516 operada por la CAR, en un periodo comprendido entre los años 1972 y 2015 de conformidad con la información disponible para uso. La información base de precipitación y temperatura empleadas en el balance se presentan en el Anexo 3.

**Cuadro 16.** Estaciones y registros empleados para el balance hídrico de la cuenca en estudio

Estación	Localización	Coordenadas	Altitud	Información disponible
Aeropuerto El Dorado código 21205790	Bogotá D.C.	Latitud: 04°42' Longitud: 74°09'	2547 msnm	Precipitación y temperatura media mensual (43 años de registros).
La Ramada código 2120516	Funza	Latitud: 04°43' Longitud: 74°11'	2945 msnm	Precipitación y temperatura media mensual (78 años de registros).

Fuente. Elaboración propia.

El área aferente al sector 2 del humedal La Florida, se obtuvo en ArcMap a partir de la cartografía base existente en el área y considerando la operación del Sistema Hidráulico de Manejo Ambiental y Control de Inundaciones La Ramada. En este sentido, se contempló la existencia del embalse La Isla ubicado hacia el suroccidente, el cual intercepta y redistribuye las aguas lluvias que se precipitan en la zona superior a dicha localización; con ello se obtuvo un área similar al valor obtenido en el Estudio de EPAM en el año 2016 (5,4 km<sup>2</sup>). Los valores definitivos identificando el área correspondiente al espejo de agua del cuerpo lagunar se especifican en el siguiente cuadro.

**Cuadro 17.** Área de drenaje en el humedal La Florida Sector 2

Área espejo de agua (Km <sup>2</sup> )	Área de drenaje (Km <sup>2</sup> )	Área total (Km <sup>2</sup> )
0,43	4,76	5,19

Fuente. Elaboración propia.

El método escogido para obtener la precipitación media en el área aferente al sector 2 del humedal La Florida, tuvo en consideración los siguientes factores: bajas variaciones en la precipitación, una topografía caracterizada por ser muy suave y unas condiciones atmosféricas uniformes (Heras, 1981), (Silva, 1984); en este sentido, se aplicó una media aritmética a los datos de las estaciones en mención en el periodo antes señalado.

Para el cálculo de la precipitación que cae sobre la superficie del espejo de agua del humedal La Florida Sector 2, debido a la ausencia de información y con el fin de considerar la disminución de las corrientes de aire ascendente sobre la superficie del agua, que ayudan a la

formación de precipitaciones locales convectivas (Heras, 1981), se adoptó una deducción del 20% de la precipitación anual.

La información de entrada al modelo corresponde a los valores medios mensuales multianuales tanto de precipitación como de temperatura; a partir de la temperatura se calcula la evapotranspiración potencial media multianual aplicando la fórmula de Thornthwaite, así:

Debido a que la elevación media en el área aferente al humedal La Florida en el Sector 2 es 2546 m.s.n.m., así mismo dado a que las estaciones del Aeropuerto El Dorado y La Ramada se ubican entre los 2547 y 2545 m.s.n.m., y que el gradiente de temperatura para la cuenca es del orden de 0,6°C por cada 100 m (CAR, 2006b), se decide adoptar los valores registrados en las estaciones sin realizar corrección por elevación.

**Cuadro 18.** Valores de precipitación y temperatura media mensual a emplear en este estudio

TEMPERATURA MEDIA MENSUAL MULTIANUAL				PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL MULTIANUAL			
MES	AEROPUERTO EL DORADO (°C)	LA RAMADA (°C)	MEDIA ARITMÉTICA (°C)	MES	AEROPUERTO EL DORADO (mm)	LA RAMADA (mm)	MEDIA ARITMÉTICA (mm)
ENE	13,3	14,4	13,8	ENE	31,00	26,69	28,8
FEB	13,6	14,3	13,9	FEB	48,46	47,30	47,9
MAR	13,9	14,6	14,2	MAR	74,07	65,24	69,7
ABR	14,1	14,8	14,4	ABR	113,24	100,30	106,8
MAY	14,1	14,9	14,5	MAY	102,85	91,12	97,0
JUN	13,9	14,5	14,2	JUN	58,62	54,45	56,5
JUL	13,5	14,0	13,7	JUL	44,83	40,79	42,8
AGO	13,5	14,1	13,8	AGO	46,47	43,53	45,0
SEP	13,5	14,2	13,9	SEP	66,26	60,62	63,4
OCT	13,5	14,4	14,0	OCT	111,90	97,87	104,9
NOV	13,6	14,6	14,1	NOV	97,14	89,44	93,3
DIC	13,4	14,4	13,9	DIC	59,70	51,56	55,6

Fuente. Elaboración propia.

Los valores de la evapotranspiración potencial mensual media multianual empleados en el balance, fueron derivados a partir de la fórmula de Thornthwaite ya referenciada; los resultados de este cálculo se indican en el siguiente cuadro:

**Cuadro 19.** Cálculo de evapotranspiración potencial mensual media multianual La Florida Sector 2

MES	t (i) (°C)	i <sub>j</sub>	I	a	PE (i) (mm) (SIN CORREGIR)	K (FACTOR DE CORRECCION)	PE (i) (mm) (CORREGIDA)
ENERO	13,8	4,65089	57,25207	1,39230	54,5	1,04	56,6
FEBRERO	13,9	4,70201			55,0	0,94	51,7

MES	t (i) (°C)	i <sub>j</sub>	I	a	PE (i) (mm) (SIN CORREGIR)	K (FACTOR DE CORRECCION)	PE (i) (mm) (CORREGIDA)
MARZO	14,2	4,85651			56,7	1,04	58,9
ABRIL	14,4	4,96044			57,8	1,01	58,4
MAYO	14,5	5,01269			58,3	1,04	60,7
JUNIO	14,2	4,85651			56,7	1,01	57,2
JULIO	13,7	4,59996			53,9	1,04	56,1
AGOSTO	13,8	4,65089			54,5	1,04	56,6
SEPTIEMBRE	13,9	4,70201			55,0	1,01	55,6
OCTUBRE	14,0	4,75332			55,6	1,04	57,8
NOVIEMBRE	14,1	4,80482			56,1	1,01	56,7
DICIEMBRE	13,9	4,70201			55,0	1,04	57,2

Fuente. Elaboración propia.

- Resultados del balance hídrico:

El balance hídrico del área en estudio obtenido mediante los modelos de Thomas (1981) y modelo T (Thornthwaite & Mather, 1955), tienen una dinámica bastante similar en lo que respecta a los caudales mensuales pico (o producción de agua en la el área → variable  $S \approx Q$  en el modelo T, y variable Q en el modelo abcd) (ver Figura 11 y Figura 13); también se observan diferencias en los caudales bajos de los meses febrero, marzo, junio, julio, agosto y septiembre; así como diferencias importantes en otras variables que hacen parte del balance y que pueden compararse con fines referenciales, principalmente en lo concerniente a la cantidad de agua existente en el subsuelo (ST en el modelo T, Qg en el modelo abcd) (ver Figura 10 y Figura 12).

El balance hídrico refleja una condición de un clima bimodal marcado por dos periodos de lluvia (meses de abril-mayo y meses de octubre-noviembre) y dos periodos de estiaje (meses de diciembre-marzo y junio-septiembre). En líneas generales, se evidencia una tendencia de la cuenca a presentar déficit de agua en los meses de enero-febrero y julio-agosto, épocas en las cuales la producción de agua es la más baja en todo el año (producción igual o cercana a 0 mm/mes).

Respecto a la producción de agua en la cuenca, es importante precisar que, si bien el comportamiento a lo largo de todo el año es similar, el modelo T arrojó una ligera tendencia a aumentar la producción de agua durante los periodos de invierno, y una tendencia similar, pero a disminuir la producción de agua durante los periodos de estiaje. De acuerdo con lo anterior y al tenor de las limitaciones que tiene la información insumo de estos modelos, se concluye que el modelo abcd en este caso, presenta resultados más conservadores, frente a los resultados del modelo T. Por lo tanto, los caudales mensuales de entrada al modelo son:

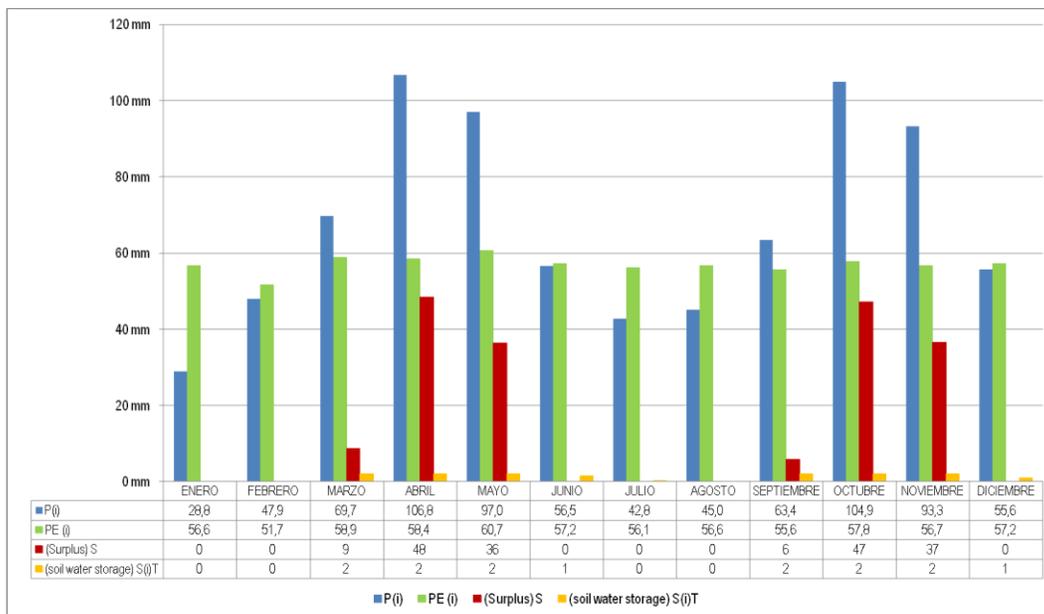
**Cuadro 20.** Caudales de producción de agua en el humedal La Florida Sector 2

MES	Q (i) (m <sup>3</sup> /s)
ENERO	0,000
FEBRERO	0,008
MARZO	0,041
ABRIL	0,079
MAYO	0,069
JUNIO	0,024
JULIO	0,011
AGOSTO	0,013
SEPTIEMBRE	0,033
OCTUBRE	0,079
NOVIEMBRE	0,066
DICIEMBRE	0,026

Fuente. Elaboración propia.

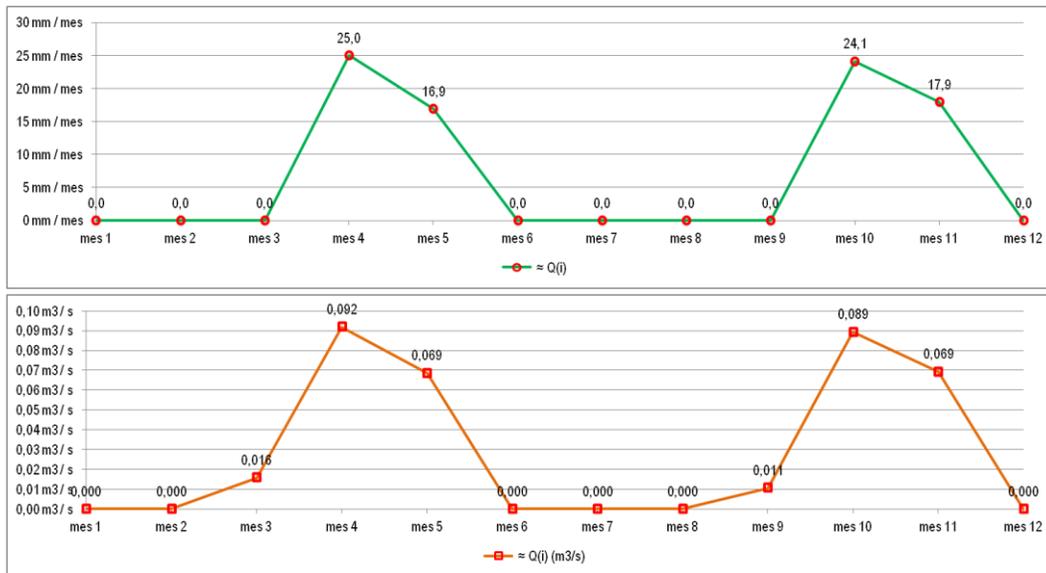
Las hojas de cálculo de la aplicación de los métodos de Thomas (1981) y modelo T (Thornthwaite & Mather, 1955), se presentan en el Anexo 4 y Anexo 5 respectivamente.

**Figura 10.** Balance hídrico en el humedal La Florida Sector 2 – modelo de Thornthwaite & Mather (1955)



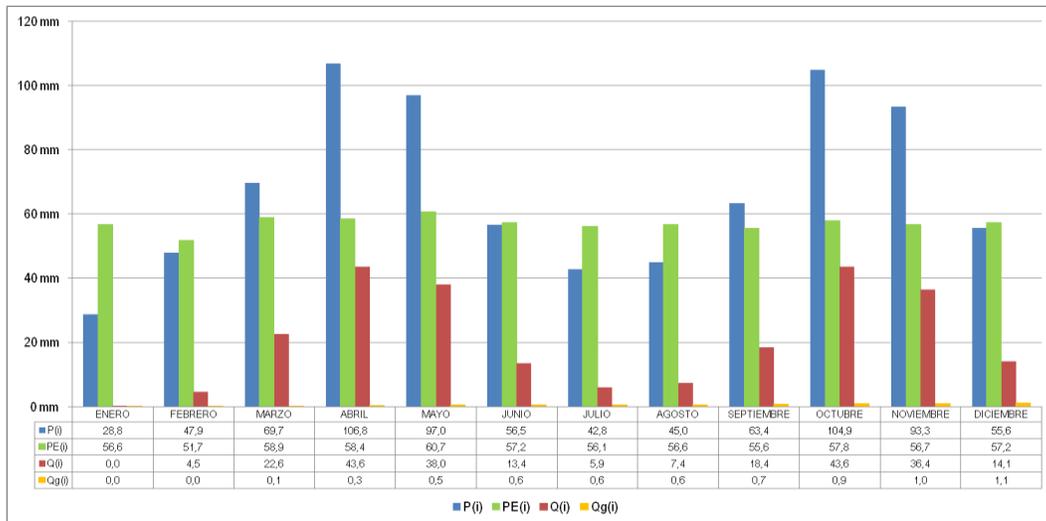
Fuente. Elaboración propia.

**Figura 11.** Producción de agua en el área aferente al Humedal La Florida aplicando el modelo de Thornthwaite & Mather (1955), expresada en profundidad de agua (arriba) y tasa volumétrica de flujo (abajo)



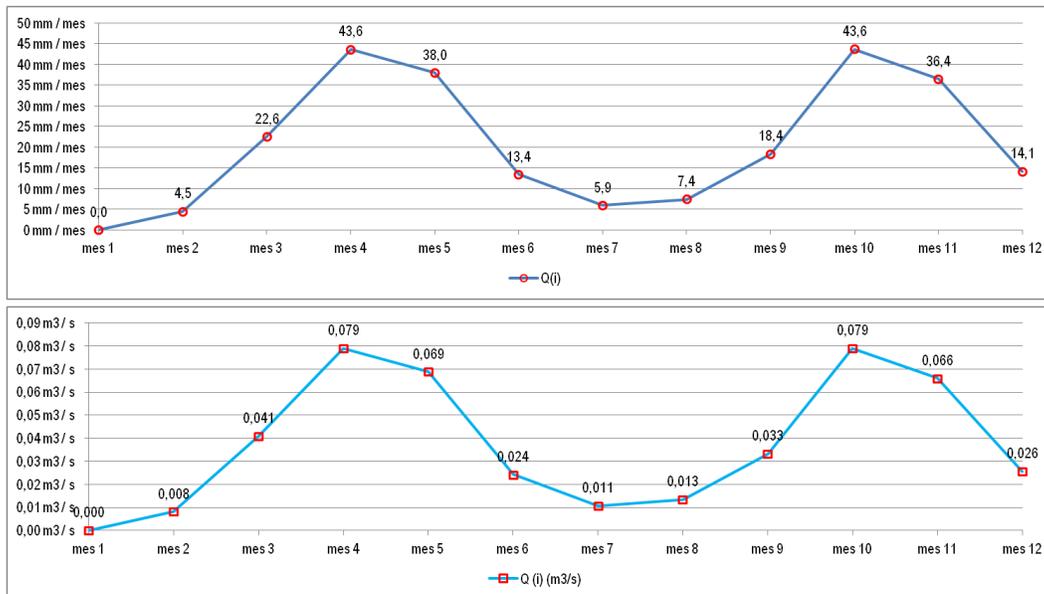
Fuente. Elaboración propia.

**Figura 12.** Balance hídrico de la cuenca en estudio – modelo de Thomas (1981)



Fuente. Elaboración propia.

**Figura 13.** Producción de agua en la cuenca en estudio aplicando el modelo de Thomas (1981), expresada en profundidad de agua (arriba) y tasa volumétrica de flujo (abajo)



Fuente. Elaboración propia.

#### 4.4.1.2 Definición de la geometría y rugosidad

Se realizó la digitalización de las coberturas en el humedal La Florida Sector 2, con el uso de ArcMap y empleando como base el ortomosaico obtenido en el estudio de la CAR & EPAM S.A. E.S.P. (2016); para ello se contemplaron las siguientes categorías:

- Espejo de agua sin vegetación flotante ni emergente, en dos clasificaciones: primero para tramos rectos, limpios y en planicies, el segundo, con las mismas características, pero en un tramo serpenteante o sinuoso.
- Estructura hidráulica u obstrucción que ocupa más del 50% del área de la sección transversal.
- Pradera o pasto corto, considerando valores con un mantenimiento pobre
- Vegetación emergente: se consideran dos clases el primero, para zonas con una vegetación muy densa y con imponente altura, el segundo para plantas emergentes arraigadas con un valor medio.
- Vegetación flotante, para superficies de agua en donde predomina la existencia de macrófitas.
- Arbustos, para zonas en donde se identifican matorrales de medios a densos.

**Foto 7.** Digitalización de áreas de humedal con cobertura de vegetación emergente



**Fuente.** Elaboración propia.

**Foto 8.** Digitalización de áreas de humedal con cobertura de vegetación flotante



**Fuente.** Elaboración propia.

**Foto 9.** Digitalización de áreas de humedal con cobertura de praderas



**Fuente.** Elaboración propia.

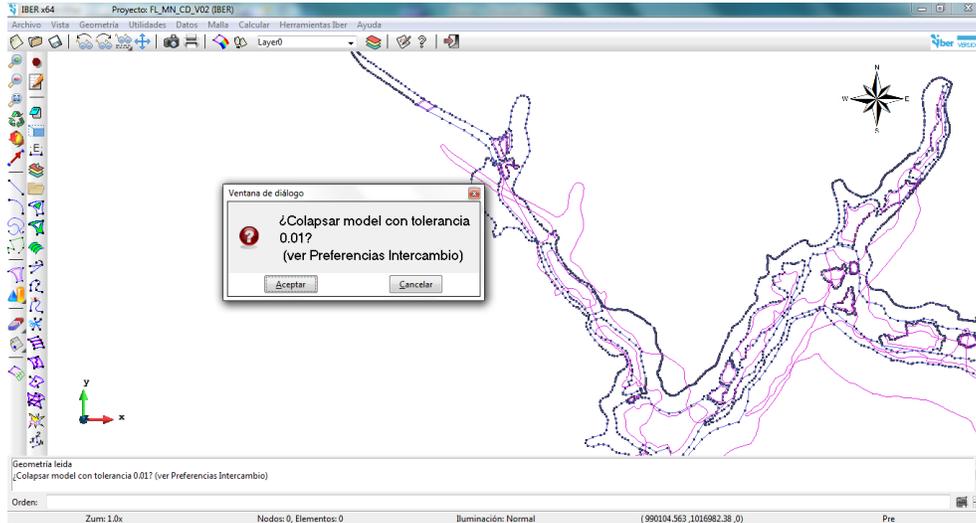
**Foto 10.** Digitalización de áreas de humedal con espejos de agua sin vegetación



**Fuente.** Elaboración propia.

En formato Shapefile se obtuvo los polígonos de las coberturas del humedal La Florida, este archivo se importó a IBER y se colapsó el modelo con una tolerancia de 0,01m. En total se generaron 70 superficies.

**Figura 14.** Edición de geometría en Iber



**Fuente.** Elaboración propia.

Se procedió a editar las superficies y a asignarles de acuerdo con el tipo de cobertura el coeficiente de Manning "n", tomando como referencia los valores indicados en la literatura. Ver Cuadro 21.

**Cuadro 21.** Literatura de coeficientes de Manning afectados por la existencia de la vegetación en un cuerpo de agua

Tipo de vegetación	Manning $n$ ( $s/m^{1/3}$ )	Descripción
Emergente <sup>11</sup>	0,67 <sup>A</sup>	Cattail, mixed cattail and mixed graminoids Valor calibrado en el modelo en el modelo HD en áreas densas
	0,05-0,10 <sup>E</sup>	Larga. Hierba de césped que crece donde la profundidad media de flujo es menos de la mitad de la altura de la vegetación; Arbustos espesos de aproximadamente 1 año con maleza a lo largo de las laderas laterales (toda la vegetación en follaje completo), o cattails densos creciendo a lo largo del fondo del canal; Árboles entremezclados con malas hierbas y cepillo (toda la vegetación en follaje completo).

<sup>11</sup> Las plantas emergentes están arraigadas en el fondo del cuerpo de agua, pero sus hojas y tallos se extienden fuera del agua. Crecen en los humedales y a lo largo de la orilla, donde la profundidad del agua es 1,2 o 1,5 m por lo general.

<b>Tipo de vegetación</b>	<b>Manning <math>n</math> (s/m<sup>1/3</sup>)</b>	<b>Descripción</b>
	0,10-0,20 <sup>E</sup>	Extreme. Sauce denso espesa, mezquite y pino salado (toda la vegetación en todo el follaje), o soporte de madera pesada, unos árboles caídos, ramas profundidad de alcanzar flujo
	0,05 <sup>G</sup>	Cañas emergentes, juncos, pabellón y grandes hierbas [Partes sobre el terreno]
	0,3 <sup>G</sup>	Plantas arraigadas emergentes (Valor medio)
	0,15 <sup>B</sup>	Tramos con muchas malezas, pozos profundos o canales de crecientes con muchos árboles con matorrales bajos (Valor máximo considerando con un mantenimiento pobre)
Flotante <sup>12</sup>	0,12 <sup>A</sup>	Las plantas flotantes como algas
	0,05 <sup>D</sup>	
	0,1 <sup>G</sup>	Las plantas flotantes como algas. Plantas de raíces flotantes arraigadas, típicamente nenúfares en aguas más lentas y profundas (Valor medio)
	0,08 <sup>B</sup>	Tramos lentos, con malezas y pozos profundos
Arbusto <sup>13</sup>	1,00 <sup>A</sup>	
	0,885-0,902 <sup>F</sup>	
	0,08 <sup>B</sup>	Pocos matorrales y árboles en verano
	0,16 <sup>B</sup>	Matorrales medios a densos en verano
Espejo de agua sin vegetación	0,035 <sup>C</sup>	
	0,033 <sup>B</sup>	Corrientes en planicies, limpio, recto, sin montículos ni pozos profundos (Valor máximo considerando un mantenimiento pobre)
	0,045 <sup>B</sup>	Corrientes en planicies, limpio, serpenteante, algunos pozos y bancos de arena (Valor máximo considerando un mantenimiento pobre)
Pradera	0,021 <sup>G</sup>	Césped de varios centímetros de altura
	0,03 <sup>H</sup>	Hierba corta (normal)
	0,035 <sup>B y C</sup>	Pasto Corto (Valor máximo considerando un mantenimiento pobre)
Estructura Hidráulica	0,024 <sup>A</sup>	
	0,02-0,03 <sup>E</sup>	Apreciable. Las obstrucciones ocupan de 15 a 50 por ciento del área de la sección transversal, o el espacio entre las obstrucciones es lo suficientemente pequeño como para hacer que los efectos de varias obstrucciones sean añadidos, bloqueando así una parte equivalente de una sección transversal.
	0,04-0,05 <sup>E</sup>	Severo. Las obstrucciones ocupan más del 50 por ciento del área de la sección transversal, o el espacio entre las obstrucciones es lo suficientemente pequeño como para causar turbulencia en la mayor parte de la sección transversal

<sup>12</sup> Una planta de agua que flota en la superficie de un cuerpo de agua con sus raíces arrastrándose en el agua

<sup>13</sup> Una planta leñosa que es más pequeña que un árbol y tiene varios tallos principales que surgen en o cerca del suelo.

Tipo de vegetación	Manning $n$ (s/m <sup>1/3</sup> )	Descripción
A.	(Min & Wise, 2010)	
B.	(Chow, 1959)	
C.	(Min & Wise, 2009)	
D.	(Medeiros, Hagen, & Weishampel, 2012)	
E.	(Arcement & Schneider, 1989)	
F.	(Galema, 2009)	
G.	(Fisher & Dawson, 2003)	
H.	Modified from Chow (1959) and Thomsen and Hjalmarsen (1991), citado por (Phillips & Tadayon, 2007)	

Fuente. Elaboración propia.

La selección de los coeficientes de rugosidad para ser asignados en las superficies creadas sobre el humedal La Florida, tienen en consideración los siguientes factores:

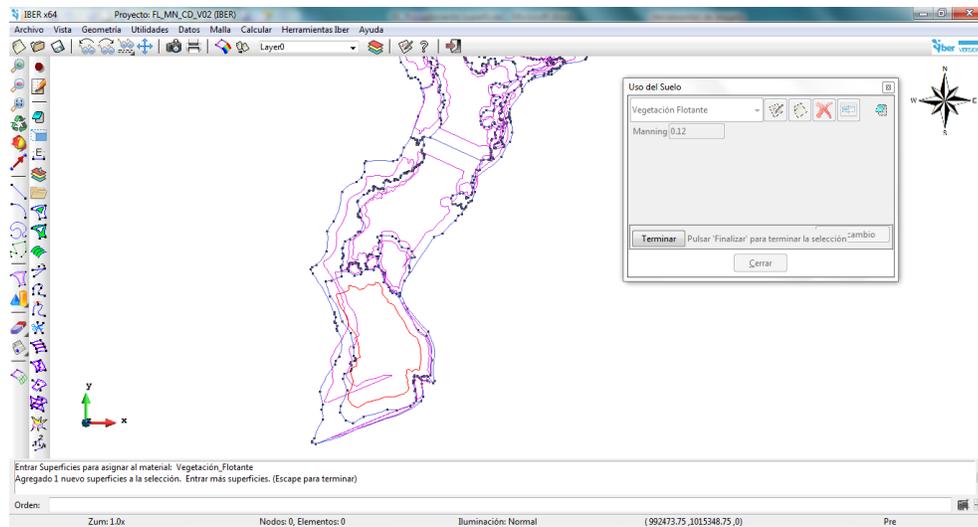
- Existencia de vegetación emergente y flotante. La vegetación puede considerarse como una clase de rugosidad superficial, pero también reduce de manera notable la capacidad del canal, retarda el flujo y controla la distribución del flujo (Chow, 1959), (Paudel, Grace, Galloway, Zamorano, & Jawitz, 2013)
- La caracterización de la variabilidad de los regímenes hidráulicos es importante para determinar el desempeño del tratamiento del humedal (Paudel et al., 2013).
- Se tiene en cuenta que al no realizarse un mantenimiento o limpieza en un determinado número de años, el crecimiento de vegetación puede considerarse abundante de tal modo que se encuentren valores de  $n > 0.100$  (Chow, 1959).
- Las irregularidades en el perímetro mojado, variaciones en la sección transversal, tamaño y forma de ésta a lo largo de la ciénaga, introducen rugosidad adicional a la causada por la rugosidad superficial y otros factores. En este caso, el incremento en  $n$  puede ser 0.005 o mayor (Chow, 1959).
- Los coeficientes de Manning se seleccionan considerando los rangos reportados en la literatura, resultado de investigaciones con profundidades de agua medias, como se distinguen en el cuadro anterior.
- No se considera el perfil vertical de resistencia de la vegetación, en el caso de plantas sumergidas pueden ser estratificadas.
- Se asigna el coeficiente de rugosidad de acuerdo con la característica de mayor predominancia.

**Cuadro 22.** Coeficientes de Manning aplicados al modelo

Tipo de vegetación		Manning $n$ (s/m <sup>1/3</sup> )
Espejo de agua sin vegetación	Corrientes en planicies, limpio, recto, sin montículos ni pozos profundos (Valor máximo considerando un mantenimiento pobre)	0,033
	Corrientes en planicies, limpio, serpenteante, algunos pozos y bancos de arena (Valor máximo considerando un mantenimiento pobre)	0,045
Estructura Hidráulica	Severo. Las obstrucciones ocupan más del 50 por ciento del área de la sección transversal, o el espacio entre las obstrucciones es lo suficientemente pequeño como para causar turbulencia en la mayor parte de la sección transversal	0,05
Pradera	Pasto Corto (Valor máximo considerando un mantenimiento pobre)	0,035
Emergente	Cattail, mixed cattail and mixed graminoids Valor calibrado en el modelo en el modelo HD en áreas densas	0,67
	Plantas arraigadas emergentes (Valor medio)	0,3
Flotante	Las plantas flotantes como algas	0,12
Arbusto	Matorrales medios a densos en verano	0,16

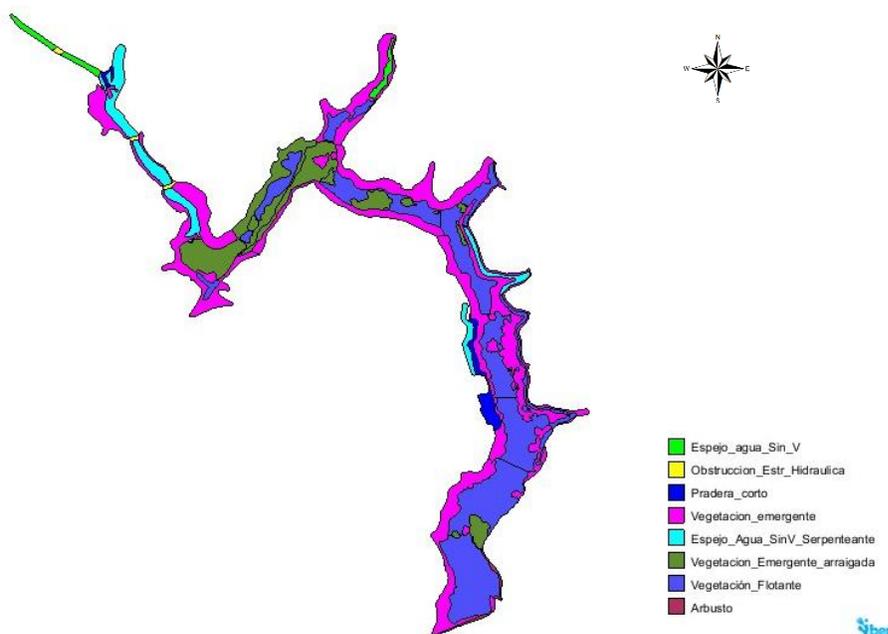
Fuente. Elaboración propia.

**Figura 15.** Etapa de asignación de coeficientes de Manning a las superficies con IBER



Fuente. Elaboración propia.

**Figura 16.** Resultados de asignación de los coeficientes de rugosidad en el humedal La Florida Sector 2 en IBER



Fuente. Elaboración propia.

#### 4.4.1.3 Condiciones de contorno e iniciales

En el modelo se aplicó el comportamiento hidrológico del humedal en condiciones de un año medio, sin embargo, es posible manipular cada una de las variables a criterio del investigador considerando los cambios inducidos en factores que se identifiquen como claves (Beltrán Vargas, 2012). Para el caso del humedal La Florida Sector 2, es necesario considerar la operación del Sistema Hidráulico de Manejo Ambiental y Control de Inundaciones La Ramada, debido a que los niveles de cuerpo lagunar son regulados a través de la alimentación de agua desde el canal Chicú o conocido anteriormente como La Florida, así como, de la maniobra sincronizada de las estaciones de bombeo del embalse La Isla. Inicialmente, se estableció el siguiente escenario de simulación y procedimiento de cálculo, para definir en conjunto con el modelo de calidad las constantes cinéticas que permitan realizar el montaje del segundo escenario de calidad, como se describe a continuación.

**Cuadro 23.** Condición de contorno e inicial - Escenario 1

<p><b>Escenario 1 Condición Inicial.</b> Humedal La Florida Sector 2 con un volumen de almacenamiento inicial, alimentado exclusivamente por escorrentía superficial aportada por las áreas de drenaje aferentes a este cuerpo lagunar.</p>
<p><b>Datos de entrada Escenario 1</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Caudales medios mensuales en m<sup>3</sup>/s obtenidos en el balance hídrico en la sección 4.4.1.1 del este documento.</li> </ul>

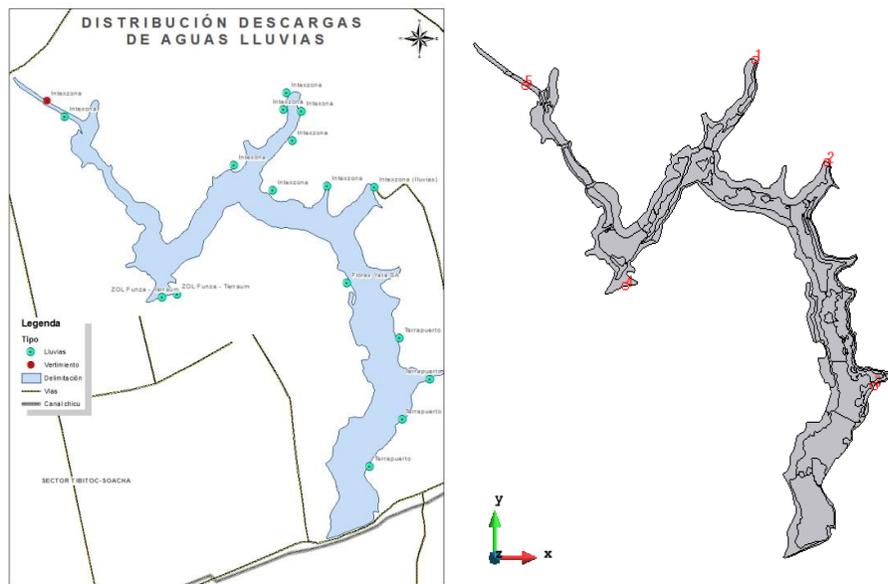
**Escenario 1 Condición Inicial.** Humedal La Florida Sector 2 con un volumen de almacenamiento inicial, alimentado exclusivamente por escorrentía superficial aportada por las áreas de drenaje aferentes a este cuerpo lagunar.

- En el proceso de asignación de las condiciones de contorno se tuvo en consideración el inventario de descarga de aguas lluvias y su distribución a lo largo del perímetro del humedal La Florida, encontrando que el 75% de las descargas (12) se localizan hacia el nororiente y el 25% de las descargas (4) al suroccidente. Así mismo, en cada sector se seleccionaron puntos de ingreso de caudal representativos a las descargas existentes, como se indica en el siguiente cuadro.

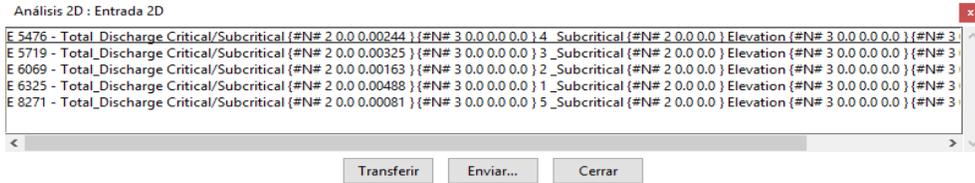
MES	Q (i) (m <sup>3</sup> /s)	Nororiente 75%	Noroccidente 25%
AGOSTO	0.013	0.00975	0.00325

Número de Entradas (m <sup>3</sup> /s)				
①	②	③	④	⑤
Nororiente 75%			Noroccidente 25%	
6 Alcant	2 Alcant	4 Alcant	3 Alcant	1 Alcant
50%	17%	33%	0.75	0.25
0.00488	0.00163	0.00325	0.00244	0.00081

En el modelo IBER se definen cinco (1-5) condiciones de entrada en régimen crítico/subcrítico procedentes de escorrentía del mes de agosto y repartido en puntos claves de acuerdo con la distribución de las alcantarillas existentes en el cuerpo lagunar. Ver siguiente imagen.

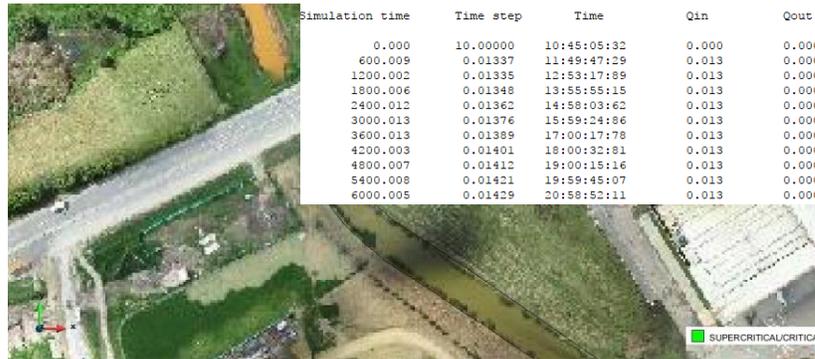


**Escenario 1 Condición Inicial.** Humedal La Florida Sector 2 con un volumen de almacenamiento inicial, alimentado exclusivamente por escorrentía superficial aportada por las áreas de drenaje aferentes a este cuerpo lagunar.



**Datos de salida Escenario 1**

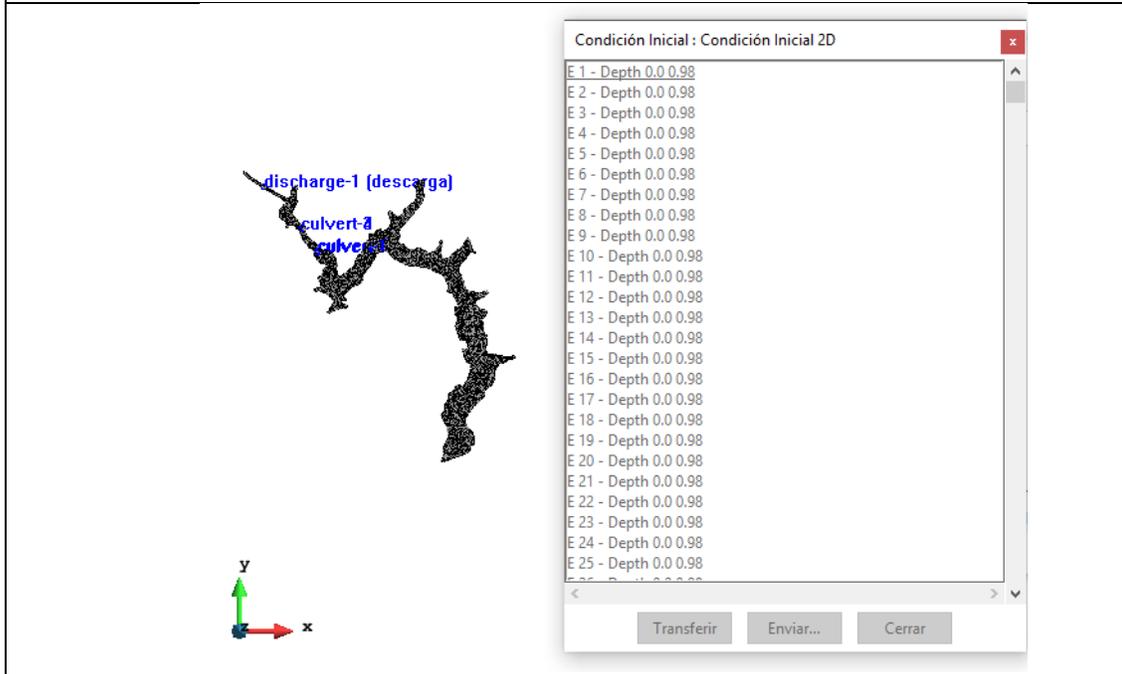
- Para este escenario se considera una condición de salida que permita el flujo de posibles excesos de caudal, se asigna en condición de flujo supercrítico. Sin embargo, el modelo para estas condiciones no registra caudal de salida como se aprecia en la siguiente imagen.



**Condición Inicial Escenario 1**

- La cota del agua promedio en el humedal La Florida Sector 2 según el estudio de la CAR & EPAM (2016) es 2542.27 (mes de agosto) m.s.n.m. Teniendo en cuenta este valor y la curva de capacidad de almacenamiento del humedal La Florida referida en el mismo estudio, se asigna al dominio conformado por 70 superficies como condición inicial un calado de 0.98 m.

**Escenario 1 Condición Inicial.** Humedal La Florida Sector 2 con un volumen de almacenamiento inicial, alimentado exclusivamente por escorrentía superficial aportada por las áreas de drenaje aferentes a este cuerpo lagunar.



Fuente. Elaboración propia.

**Cuadro 24.** Condición de contorno e inicial - Escenario 2

**Escenario 2 Apertura de compuertas.** Humedal La Florida Sector 2 con un volumen de almacenamiento inicial, alimentado por escorrentía superficial aportada por las áreas de drenaje aferentes a este cuerpo lagunar, así como, por el Río Bogotá a través de la *compuerta* de derivación en el canal Chicú.

Para el humedal La Florida Sector 2, es necesario considerar la operación del Sistema Hidráulico de Manejo Ambiental y Control de Inundaciones La Ramada, debido a que los niveles de cuerpo lagunar son regulados a través de la alimentación de agua del canal Chicú o La Florida, así como de la maniobra sincronizada de las estaciones de bombeo del embalse La Isla.

El Canal Chicú o la Florida, con una longitud 4.00 Km, tiene una capacidad para transportar 5.6 m<sup>3</sup>/s y conduce la totalidad del caudal derivado del Río Bogotá hasta la estructura de derivación ubicada sobre el borde de la Ciénaga La Florida. Esta estructura permite entregar a dicha Ciénaga 2.5 m<sup>3</sup>/s de caudal con destino a la estación de bombeo La Isla. El canal Florida se encuentra diseñado con pendientes longitudinales que coinciden aproximadamente con las pendientes generales del terreno, en el primer tramo hasta la Ciénaga La Florida la pendiente es de 0.09 m/km. Para conducir el caudal de diseño de 5.6 m<sup>3</sup>/s tiene una sección de 3.00 m de ancho de fondo, taludes laterales de 1.5:1 y profundidad normal de flujo de 2.30 m. La

**Escenario 2 Apertura de compuertas.** Humedal La Florida Sector 2 con un volumen de almacenamiento inicial, alimentado por escorrentía superficial aportada por las áreas de drenaje aferentes a este cuerpo lagunar, así como, por el Río Bogotá a través de la *compuerta* de derivación en el canal Chicú.

velocidad de flujo resultante es de 0.38 m/s (Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, 1989).

La estructura de derivación a la Ciénaga La Florida consiste básicamente en transiciones suaves de entrada y salida y una cámara rectangular. Dicha cámara está dotada de una compuerta de 1.5 m \* 1.5 m para controlar el flujo en el Canal (Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Bogotá, Ubaté y Suárez, 1989).

De acuerdo con los datos mencionados, se realizó el siguiente cálculo a fin de obtener los caudales para la simulación del humedal La Florida Sector 2, contemplando la apertura de la compuerta que permita el ingreso de agua desde el Río Bogotá.

Calculo del caudal de ingreso de la Compuerta

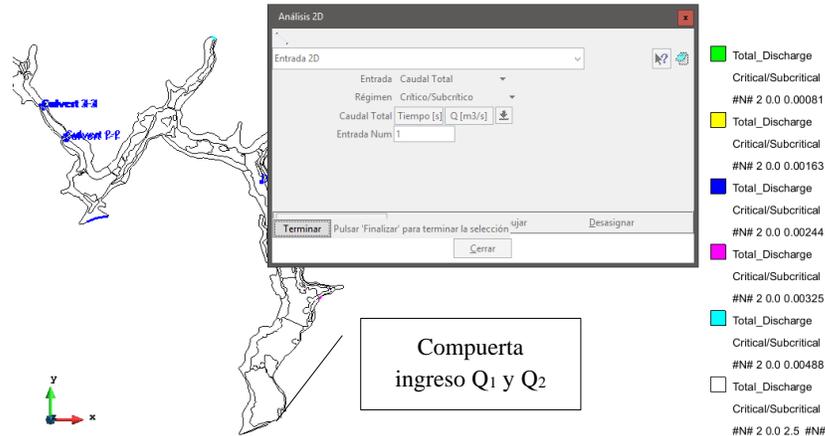
<b>Ecuación</b>	$Q = C_d b a \sqrt{2gy_1} \quad C_d = \frac{C_c C_v}{\sqrt{1 + \frac{C_c a}{y_1}}} \quad C_v = 0.96 + 0.079 \frac{a}{y_1}$		
	<p>En donde: <i>b</i> = ancho compuerta (m), <i>a</i> = abertura compuerta (m), <i>l</i> = tirante aguas arriba compuerta (m), <i>C<sub>d</sub></i> = coeficiente de descarga, <i>C<sub>c</sub></i> = coeficiente de contracción, <i>C<sub>v</sub></i> = coeficiente de velocidad</p>		
<b>Datos de la Compuerta</b>	Ancho (b) =	1.5 m	1.5 m
	Tirante aguas arriba =	2.3 m	2.3 m
	Abertura de la compuerta (a) =	0.45 m	0.33 m
	Coeficiente de contracción (C <sub>c</sub> ) =	0.6	0.6
<b>Resultados</b>	Coeficiente de velocidad (C <sub>v</sub> ) =	0.9755	0.9714
	Coeficiente de descarga (C <sub>d</sub> ) =	0.5537	0.5591
	Caudal (Q) =	2.5106 m <sup>3</sup> /s	1.876 m <sup>3</sup> /s
	% del caudal diseñado para ingreso a la ciénaga La Florida =	100%	75%

Fuente. Elaboración propia.

**Datos de entrada Escenario 2**

- Se mantienen las condiciones de entrada procedentes de escorrentía del mes de agosto establecidas para el escenario 1 y se procede contemplando la apertura de la compuerta a asignar en régimen crítico los caudales Q1 = 2.5 m<sup>3</sup>/s y Q2 = 1.87 m<sup>3</sup>/s, como ingreso de agua desde el Río Bogotá hacia el humedal La Florida sector 2. Ver siguiente imagen.

**Escenario 2 Apertura de compuertas.** Humedal La Florida Sector 2 con un volumen de almacenamiento inicial, alimentado por escorrentía superficial aportada por las áreas de drenaje aferentes a este cuerpo lagunar, así como, por el Río Bogotá a través de la *compuerta* de derivación en el canal Chicú.



**Datos de salida Escenario 2**

- Este escenario contempla de acuerdo con el registro del año 2016 (Contrato CAR No. 1185/2014), la operación del Sistema Hidráulico de Manejo Ambiental y Control de Inundaciones La Ramada, en este sector, con dos bombas de tornillo de 0.625 m<sup>3</sup>/s cada una, es decir, un caudal total de 1.25 m<sup>3</sup>/s, desde el extremo occidental de la ciénaga La Florida Sector 2 para la alimentación del embalse La Isla.

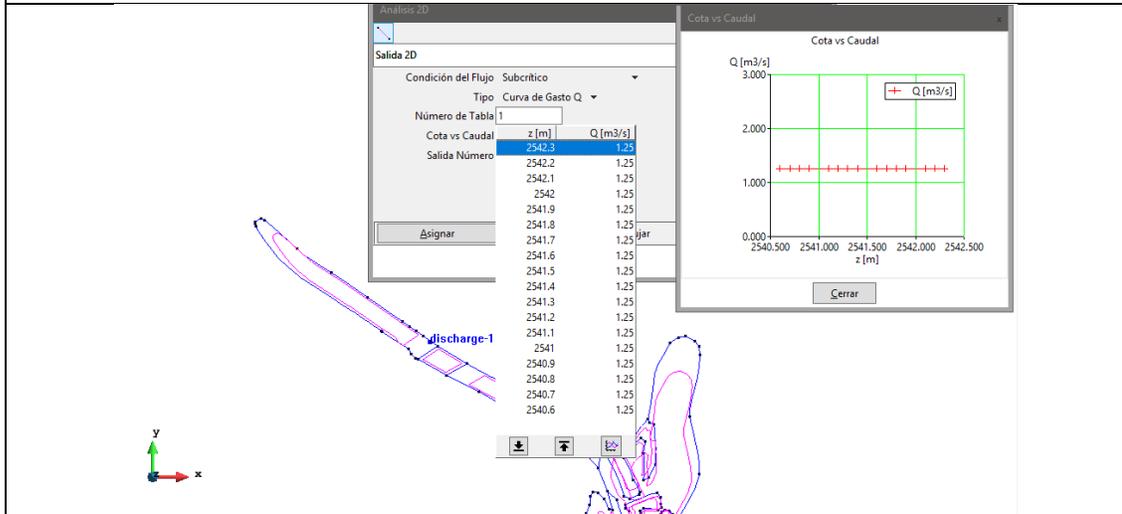
En este sentido, se procede a asignar en condición de flujo subcrítico una curva de gasto en el canal a la salida del humedal, a partir de la verificación de la cota máxima del agua en el extremo occidental.

Curva de gasto – Condición de salida

Cota	Q Bomba 1 (m <sup>3</sup> /s)	Q Bomba 2 (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>Total</sub> (m <sup>3</sup> /s)
2542.3	0.625	0.625	1.25
2542.2	0.625	0.625	1.25
2542.1	0.625	0.625	1.25
2542	0.625	0.625	1.25
2541.9	0.625	0.625	1.25
2541.8	0.625	0.625	1.25
2541.7	0.625	0.625	1.25
2541.6	0.625	0.625	1.25
2541.5	0.625	0.625	1.25
2541.4	0.625	0.625	1.25
2541.3	0.625	0.625	1.25
2541.2	0.625	0.625	1.25
2541.1	0.625	0.625	1.25
2541	0.625	0.625	1.25
2540.9	0.625	0.625	1.25
2540.8	0.625	0.625	1.25
2540.7	0.625	0.625	1.25
2540.6	0.625	0.625	1.25

Fuente. Elaboración propia.

**Escenario 2 Apertura de compuertas.** Humedal La Florida Sector 2 con un volumen de almacenamiento inicial, alimentado por escorrentía superficial aportada por las áreas de drenaje aferentes a este cuerpo lagunar, así como, por el Río Bogotá a través de la *compuerta* de derivación en el canal Chicú.



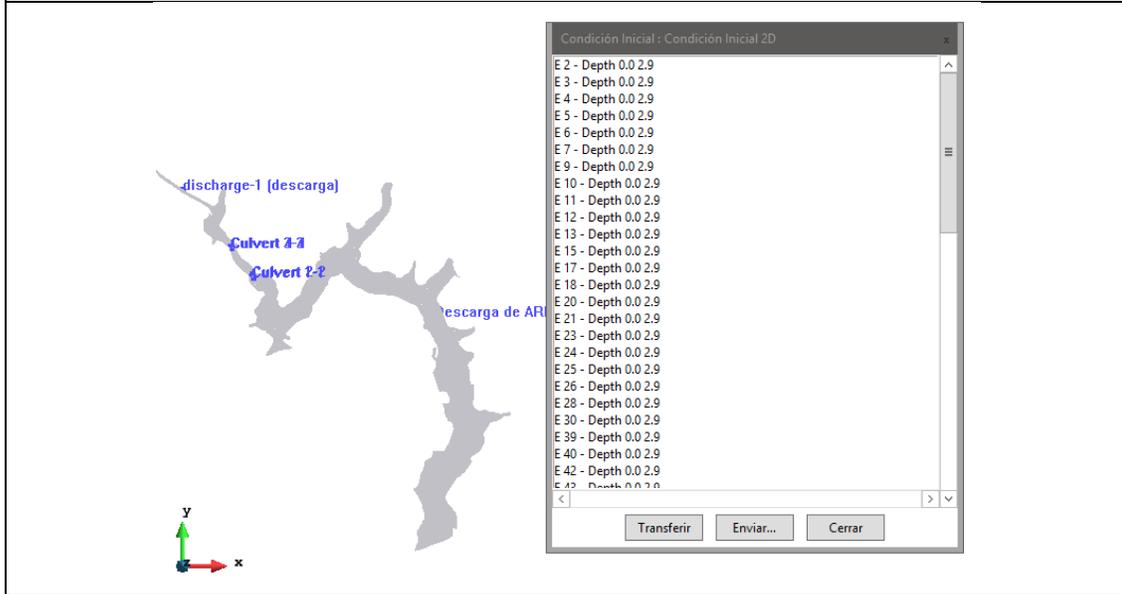
### Información de salida IBER 2D

Simulation time	Time step	Time	Qin	Qout
0.000	10.00000	14:31:54:64	0.000	0.000
600.006	0.00886	16:42:36:79	2.510	1.247
1200.003	0.00900	18:52:09:28	2.512	1.246
1800.006	0.00912	20:59:56:49	2.513	1.246
2400.004	0.00916	23:06:23:87	2.513	1.245
3000.008	0.00917	1:12:48:05	2.513	1.245
3600.007	0.00917	3:19:13:79	2.513	1.245
4200.009	0.00916	5:25:48:25	2.513	1.245
4800.001	0.00916	7:32:08:01	2.513	1.245
5400.005	0.00915	9:38:30:96	2.513	1.246
6000.003	0.00915	11:44:58:83	2.513	1.246
6600.001	0.00914	13:51:30:86	2.513	1.246
7200.001	0.00914	15:58:17:35	2.513	1.246
7800.002	0.00914	18:05:06:82	2.513	1.246
8400.005	0.00913	20:11:55:85	2.513	1.246
9000.001	0.00913	22:18:55:99	2.513	1.246

### Condición Inicial Escenario 2

- Para este escenario se asigna al dominio conformado por 70 superficies, como condición inicial un calado de 2.9 m, que de acuerdo con el perfil de profundidad permite alcanzar el nivel para la alimentación del embalse la isla a partir de la operación de las dos bombas de tornillo.

**Escenario 2 Apertura de compuertas.** Humedal La Florida Sector 2 con un volumen de almacenamiento inicial, alimentado por escorrentía superficial aportada por las áreas de drenaje aferentes a este cuerpo lagunar, así como, por el Río Bogotá a través de la *compuerta* de derivación en el canal Chicú.



Fuente. Elaboración propia.

**Cuadro 25.** Condición de contorno e inicial – Escenario 3

**Escenario 3 Descarga de ARD.** Humedal La Florida Sector 2 con un volumen de almacenamiento inicial, alimentado por la escorrentía superficial aportada por las áreas de drenaje aferentes a este cuerpo lagunar, así como, por el Río Bogotá a través de la *compuerta* de derivación en el canal Chicú y con una descarga de Agua Residual Doméstica (ARD).

Este escenario adopta la condición hidrodinámica del Escenario 2 e incorpora una descarga de Agua Residual Doméstica (ARD) al interior del dominio en las coordenadas E: 991935, N: 1016250 en la abscisa 2100 m, con características de un efluente con un tratamiento terciario<sup>14</sup>, de una actividad residencial. La descarga de agua residual da cumplimiento con la norma de vertimiento fijada a nivel nacional en el artículo 8 de la Resolución MADS No. 631 de 2015, en términos de la DBO<sub>5</sub>, debido a que los demás parámetros objeto del presente análisis se encuentran representados como análisis y reporte en la citada norma.

Características de una descarga de ARD con tratamiento terciario

Parámetro	Unidad de Medida	Salida PTAR
Temperatura	°C	18
DBO <sub>5</sub>	mg/l	34
Nitratos (N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	mg/l	0,513

<sup>14</sup> Sistema de tratamiento de agua residual compuesto por unidades de: homogenización, reactor biológico, sedimentación, filtración y desinfección.

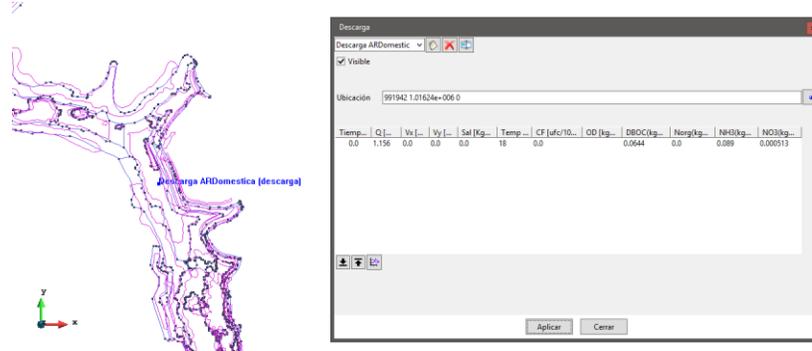
**Escenario 3 Descarga de ARD.** Humedal La Florida Sector 2 con un volumen de almacenamiento inicial, alimentado por la escorrentía superficial aportada por las áreas de drenaje aferentes a este cuerpo lagunar, así como, por el Río Bogotá a través de la *compuerta* de derivación en el canal Chicú y con una descarga de Agua Residual Doméstica (ARD).

Nitrógeno Amoniacal (N-NH <sub>3</sub> )	mg/l	89
Caudal	m <sup>3</sup> /s	1.156

Fuente. Elaboración propia.

Los valores que se ingresan al modelo corresponden a: DBOC = 0.06444 Kg/m<sup>3</sup>, Nitratos N-NO<sub>3</sub> = 0.000513 Kg/m<sup>3</sup>, Nitrógeno Amoniacal N-NH<sub>3</sub> = 0.089 Kg/m<sup>3</sup>, Temperatura = 18°C y Caudal = 1.156 m<sup>3</sup>/s, como se puede apreciar en la siguiente imagen.

Incorporación en el dominio de la descarga de ARD con tratamiento terciario



Fuente. Elaboración propia.

## 4.4.2 Montaje modelo de calidad

Las constantes que intervienen en el módulo de calidad de IBER para las sustancias y variables como oxígeno disuelto, demanda bioquímica de materia orgánica carbonosa, nitrógeno amoniacal, nitrógeno en forma de nitratos; fueron inicialmente adoptados de la literatura tomando como referencia la calidad de agua y estudios existentes sobre el Río Bogotá en el tramo ubicado entre la parte alta y media de esta cuenca, dado a que es el agua de dicha fuente hídrica la principal fuente de abastecimiento del Humedal La Florida Sector 2, a través de la captación de agua en la estación de Bombeo El Chicú del Sistema Hidráulico de Manejo Ambiental y Control de Inundaciones, operado por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR).

### 4.4.2.1 Demanda Bioquímica de Oxígeno Carbonosa (DBOC)

El modelo numérico de IBER trabaja con la Demanda Bioquímica de Oxígeno Carbonosa DBOC total, también llamada DBOC última (DBCC<sub>0</sub>), dado a que la degradación de la materia orgánica carbonosa es uno de los principales consumos de oxígeno disuelto en una masa de agua. En este

sentido y teniendo en cuenta que los resultados de las muestras existentes sobre el humedal La Florida se encuentran expresadas como  $DBO_5$ , es necesario transformar los datos para obtener la DBOC última. Para ello, se tuvo en cuenta valores teóricos expuestos en la literatura y valores de la constante de degradación de materia orgánica carbonosa ( $k$ ) obtenidos en estudios técnicos desarrollados sobre el Río Bogotá -principal afluente en época seca del humedal-, aguas arriba del punto de captación de agua para suministro del Sistema Hidráulico para Control de Inundaciones de La Ramada, los cuales se presentan con su respectiva referencia en el siguiente cuadro.

**Cuadro 26.** Constante de degradación de materia orgánica carbonosa

Constante de degradación de materia orgánica carbonosa ( $k$ )	Referencia	
0.16 - 0.05	Potomac Estuary US EPA (1979)	Citados por (Bowie, Mills, Porcella, Campbell, & Chamberlin, 1985)
0.23	Cape Fear R. Estuary, NC	
0.2	San Francisco Bay Estuary Chen (1970)	
0.16 - 0.21	Potomac Estuary Thomann and Fitzpatrick (1982)	
0.15	Río Bogotá a la altura de Puente Vargas (Consortio Cuencas & CAR, 2006)	
0.16	(UNAL & EAAB, 2008)	
0.06	Río Bogotá en los tramos del Río Fucha - Tunjuelo - Canoas (Diaz M, 2004)	

**Fuente.** Elaboración propia.

La relación de la DBOC ejercida en un tiempo  $t$  ( $DBOC_t$ ) con la DBOC, fue calculada con una constante de degradación de materia carbonosa igual a  $k = 0.15$ , de esta forma el valor obtenido a través del uso de la expresión y variables ilustradas a continuación (1.90) se aplicó en cada uno los resultados de  $DBO_5$  existentes en el humedal La Florida.

$$DBOC_5 = DBOC_0(1 - e^{-k \cdot 5})$$

$$\frac{DBOC_0}{DBOC_5} = \frac{1}{(1 - e^{-k \cdot 5})} \quad \text{a} \quad \frac{DBOC_0}{DBOC_5} = 1.90$$

En donde:

$DBOC_5$  = Demanda Orgánica Carbonosa ejercida en 5 días

$DBOC_0$  = Demanda Orgánica Carbonosa total o última

$K$  = Constante de degradación de materia orgánica carbonosa ( $k = 0,15 \text{ d}^{-1}$ )

En el siguiente cuadro, se presentan los resultados de cálculo de la Demanda Bioquímica de Oxígeno Carbonosa Total ( $DBOC_0$ ), correspondientes a los datos que finalmente se ingresan en el modelo IBER.

**Cuadro 27.** Cálculo de la Demanda Bioquímica de Oxígeno Carbonosa Total (DBOC<sub>0</sub>)

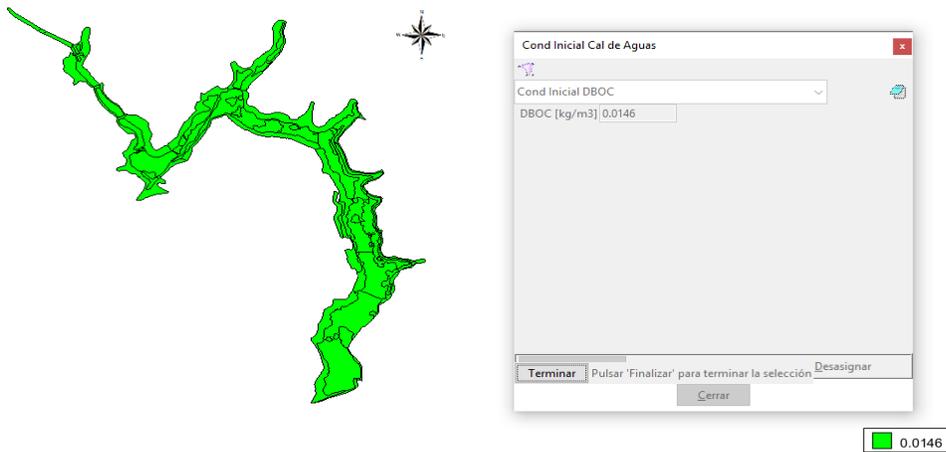
Datos Puntos	Coordenadas		DBO <sub>5</sub>	DBOC <sub>0</sub>
	X (Este)	Y (Norte)	mg/L	Kg/m <sup>3</sup>
1	992039	1015217	7.68	0.0146
2	992047	1016127	<5.0	0.0095
3	992020	1016517	77	0.1459
4	990689	1016886	7.23	0.0137

**Fuente.** Muestreos CAR & EPAM (2016).

**Cuadro 28.** Condición de contorno e inicial DBOC

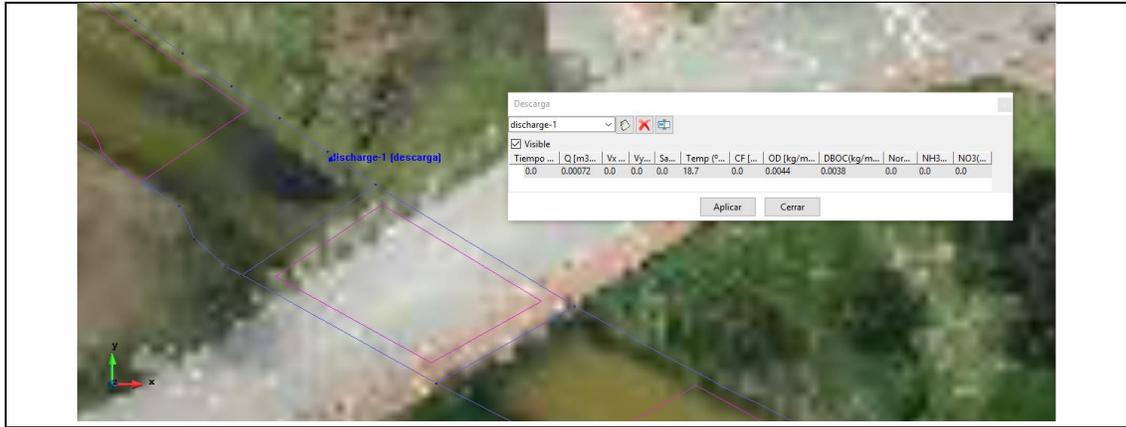
**Condición contorno:** se asigna en cada uno de los contornos de entrada definidos en el componente hidrodinámico, las concentraciones de la Demanda Bioquímica de Oxígeno Carbonosa Total indicadas en el Cuadro 27, adoptando los datos de los puntos 2 y 3 como condiciones de frontera. El punto 4, no se ingresa al modelo y se mantiene como punto de control.

**Condición inicial:** en todo el dominio se impuso la condición inicial de la DBOC registrada en el punto 1, de acuerdo con los resultados obtenidos en la jornada de muestreo desarrollada el 4 de agosto de 2016 por parte de EPAM, en un valor 0.0146 Kg/m<sup>3</sup>.



**Descarga:** el vertimiento procedente de la zona de Intexzona, ubicado en las coordenadas E: 990666, N: 1016891, tiene según los caudales aforados valores entre 0.000805 y 0.00064 m<sup>3</sup>/s, para este caso se adopta un valor promedio de 0.00072 m<sup>3</sup>/s. La concentración de la Demanda Bioquímica de Oxígeno Carbonosa Total de este vertimiento corresponde a DBOC<sub>0</sub> = 0.0038 Kg/m<sup>3</sup>.

**Datos – Calidad de Aguas – Descarga**



Fuente. Elaboración propia.

Cuadro 29. Ingreso de datos de cálculo en IBER - DBOC

Parámetros	Descripción
Salinidad (Nula)	<p> <input type="checkbox"/> Peligrosidad personalizada             <input type="checkbox"/> Turbulencia             <input type="checkbox"/> Sedimentos             <input type="checkbox"/> Via Intenso Desagüe             <input type="checkbox"/> Brecha             <input type="checkbox"/> Calidad de Aguas         </p> <p>Salinidad Leer</p> <p>Series Temporales Salinidad: Tiempo [s]   Salinidad [kg/m3]</p>
Temperatura Promedio agua 17.7 °C	<p>Temperatura Leer</p> <p>Series Temporales Temp: Tiempo [s]   Temperatura [°C]</p> <p>0.0   17.7</p> <p>Coliformes</p>
$K_{dboc}$ Tasa de degradación 0.17 [1/d]	<p> <math>K_T = k_{20} \theta^{(T-20)}</math> (Bowie et al., 1985)  <math>\theta = 1.047</math>, factor corrección temperatura  <math>K_T = 0.15</math> T = 17.7 °C         </p> <p>DBOC Activ</p> <p>Coefficiente de difusión DBOC [m<sup>2</sup>/s] 0</p> <p>Núm Schmidt DBOC 0.7</p> <p>Tasa de degradación [1/d] 0.17</p> <p>Velocidad de caída [m/d] 0.04</p> <p>Esquema DBOC 1erOrden</p>
Velocidad de caída 0.04 [m/d]	<p><b>Fórmula de Stokes</b></p> $V_s = \frac{1}{18} g \left( \frac{\rho_s - 1}{\eta} \right) d^2$ <p>           Temperatura = 17.7 °C            Viscosidad cinemática (n) = 1.07 E-02 cm<sup>2</sup>/s            Diámetro partícula coloide = 0.0010 cm            Gravedad = 980 cm/s<sup>2</sup>            Densidad relativa coloide = 1.01            Velocidad de sedimentación = 0.0001 cm/seg = 0.04 m/d         </p>

Fuente. Elaboración propia.

#### 4.4.2.2 Demanda de oxígeno del sedimento (SOD)

De acuerdo con los datos referidos en el Cuadro 30 se adopta un valor de  $K_{dos} = 0.0012 \text{ Kg/m}^2\text{d}$

**Cuadro 30.** Demanda de Oxígeno del Sedimento

Demanda de Oxígeno del Sedimento (SOD) ( $\text{KgO}_2/\text{m}^2 \text{ d}$ )	Referencia	
0.001 – 0.007	Green Bay, Lake Michigan Gardiner et al. (1 984)	Citados por (Bowie et al., 1985)
0.0004 – 0.0026 0.00021 – 0.0015	Swedish lakes Edberg & Hofsten (1973)	
0.0021 (13.2-16.1 °C)	Horseshoe Lake Butts & Evans (1979)	
0.00072 – 0.0084	Lakes James (1974)	
0.00084 – 0.0033	Lake Apopka, FL Balenger (1981)	
0.00114 – 0.00126 (19.9 °C) 0.00118 – 0.00131 (20 °C)	Río Bogotá – Puente Vargas (UNAL & EAAB, 2008)	

**Fuente.** Elaboración propia.

#### 4.4.2.3 Oxígeno disuelto (OD)

**Condición contorno:** se asigna en cada uno de los contornos de entrada definidos en el componente hidrodinámico, las concentraciones del Oxígeno Disuelto en  $\text{Kg/m}^3$ . Se adopta los datos 2 y 3 como condiciones de frontera. El punto 4, no se ingresa al modelo y se mantiene como punto de control.

**Cuadro 31.** Concentraciones de Oxígeno Disuelto Ingresados al modelo

Datos Puntos	Coordenadas		OD	OD
	X (Este)	Y (Norte)	mg/L	$\text{Kg/m}^3$
1	992039	1015217	0.19	Cond <sub>Inicial</sub>
2	992047	1016127	0.71	0.0007
3	992020	1016517	6.85	0.0069
4	990689	1016886	1.18	0.0012

**Fuente.** Elaboración propia.

**Condición inicial:** se establece como condición inicial en el humedal La Florida Sector 2, un valor equivalente al oxígeno disuelto de saturación del punto de muestreo 1, de acuerdo con los resultados obtenidos en la jornada de muestreo desarrollada el 4 de agosto de 2016 por parte de

EPAM. El cálculo se realizó mediante el uso de las ecuaciones de APHA (1992) y Zison et al. (1978), indicadas a continuación:

$$\ln[OD_{sat}(T, S, 0)] = -139,34411 + \frac{1,575701 * 10^5}{T} - \frac{6,642308 * 10^7}{T^2} + \frac{1,243800 * 10^{10}}{T^3} - \frac{8,621949 * 10^{11}}{T^4} - S \cdot \left( 1,764 * 10^{-2} - \frac{10,754}{T} + \frac{2140,7}{T^2} \right)$$

En donde:

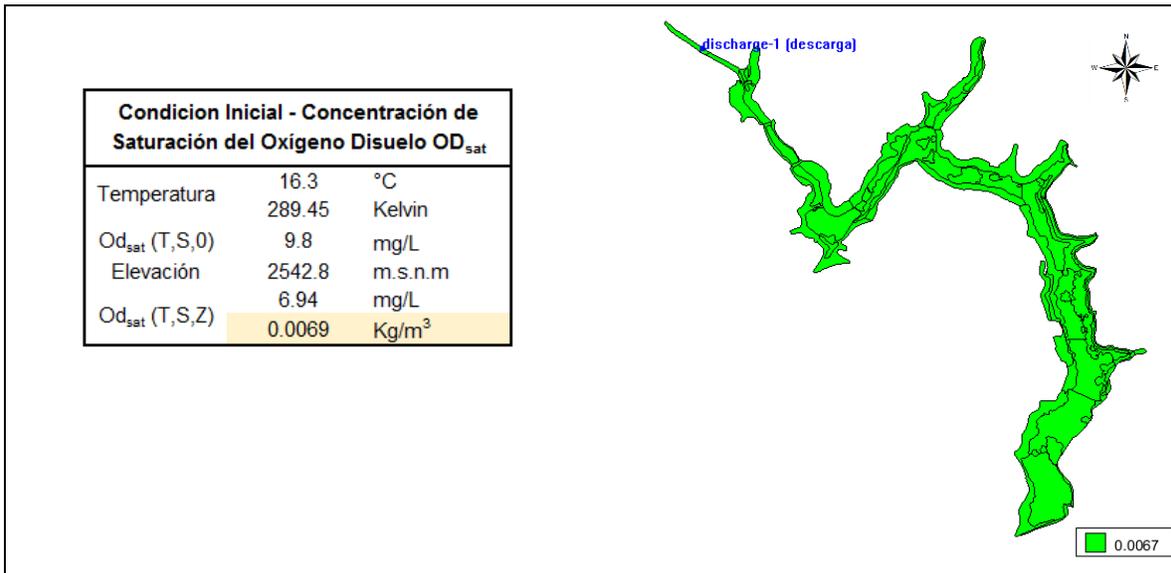
$OD_{sat}(T, S, 0)$  = Concentración de saturación de oxígeno disuelto en  $mg/l$  a la temperatura  $T$  en Kelvin, con una salinidad del agua  $S$  en  $kg/m^3$  y al nivel del mar

El efecto de la altitud sobre el nivel del mar se tiene en cuenta con la siguiente ecuación:

$$OD_{sat}(T, S, z) = OD_{sat}(T, S, 0) \cdot (1 - 0,0001148Z)$$

Siendo  $Z$  la altitud sobre el nivel del mar en metros.

**Cuadro 32.** Cálculo oxígeno disuelto de saturación  $OD_{sat}$



**Fuente.** Elaboración propia.

#### 4.4.2.4 Nitrógeno $N-NO_3$ y $N-NH_3$

**Condición contorno:** se asigna en cada uno de los contornos de entrada definidos en el componente hidrodinámico, las concentraciones de Nitrógeno Amoniacal ( $N-NH_3$ ) y en forma de Nitratos ( $N-NO_3$ ) expresados en  $Kg/m^3$ . Se adopta los datos de los puntos 2 y 3 como condiciones de frontera. El punto 4, no se ingresa al modelo y se mantiene como punto de control.

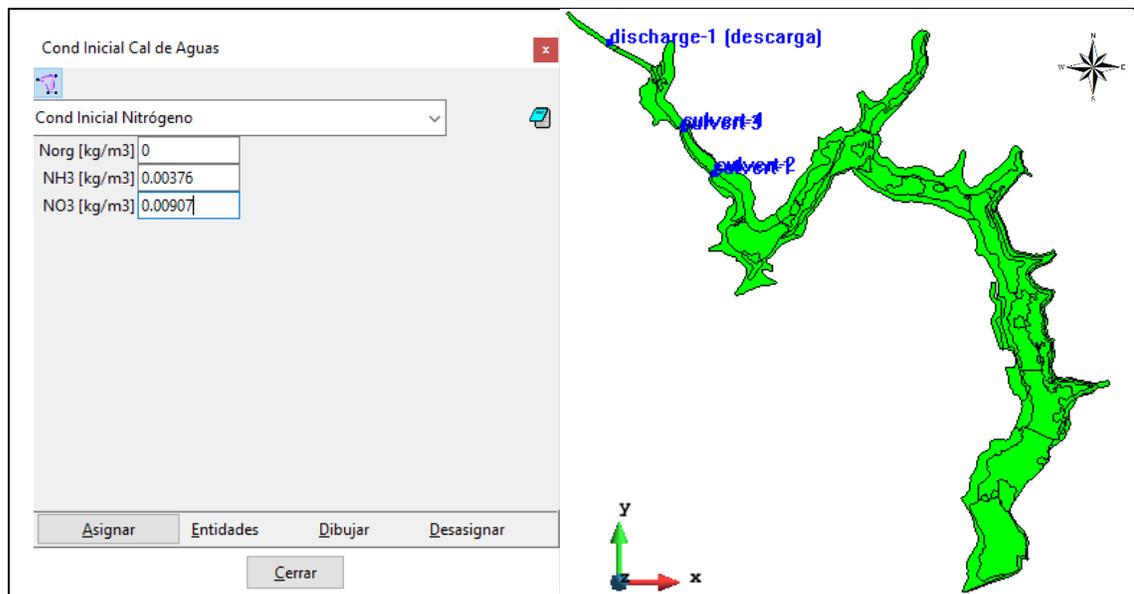
**Cuadro 33.** Concentraciones de Nitrógeno N-NH<sub>3</sub> y N-NO<sub>3</sub> Ingresados al modelo

Datos Puntos	Coordenadas		Nitratos N-NO <sub>3</sub>	Nitrógeno Amoniacal N-NH <sub>3</sub>
	X (Este)	Y (Norte)	Kg/m <sup>3</sup>	Kg/m <sup>3</sup>
1	992039	1015217	Cond <sub>Inicial</sub>	Cond <sub>Inicial</sub>
2	992047	1016127	0.00953	0.000106
3	992020	1016517	0.0129	0.0215
4	990689	1016886	0.00311	0.00584

**Fuente.** Elaboración propia.

**Condición inicial:** se establece como condición inicial en el humedal La Florida Sector 2, concentraciones de Nitrógeno Amoniacal (N-NH<sub>3</sub>) y en forma de Nitratos (N-NO<sub>3</sub>) del punto de muestreo 1, de acuerdo con los resultados obtenidos en la jornada de muestreo desarrollada el 4 de agosto de 2016, por parte de EPAM.

**Cuadro 34.** Concentraciones Nitrógeno Amoniacal (N-NH<sub>3</sub>) y en forma de Nitratos (N-NO<sub>3</sub>)



**Fuente.** Elaboración propia.

Definimos las constantes cinéticas: los valores de las constantes cinéticas adoptadas con base en la literatura revisada corresponden a: Tasa de Nitrificación  $K_{nit}$  0.1 d<sup>-1</sup> y Tasa de desnitrificación  $K_{nit}$  0.27 d<sup>-1</sup>.

**Cuadro 35.** Tasa de Nitrificación  $K_{nit}$ 

Tasa de Nitrificación $K_{nit}$ (d-1)	Referencia	
0.09-0.13	Potanac Estuary Thomann and Fitzpatrick, 1982	Citados por (Bowie et al., 1985)
0.20	Lake Huron and Saginaw Bay Di Toro and Matystik, 1980	
0.025	New York Bight O' Connor et al. 1981	
0.11	Big Blue River, Nebraska Bansa1 (1976)	
0.3	Delaware River Estuary Bansa1 (1976)	
0.1	Río Bogotá a la altura de Puente Vargas (Consortio Cuencas & CAR, 2006)	
0.1-2.0	Camacho – Río Magdalena citado por Modelación Río Bogotá en los tramos del Río Fucha - Tunjuelo -Canoas (Diaz M, 2004)	
1.7	Modelación Río Bogotá en los tramos del Río Fucha - Tunjuelo - Canoas (Diaz M, 2004)	

**Fuente.** Elaboración propia.

**Cuadro 36.** Tasa de desnitrificación  $K_{desnit}$ 

Tasa de desnitrificación $K_{desnit}$ (d-1)	Referencia	
0 – 1.0	Baca & Arnett (1976)	Citados por (Bowie et al., 1985)
0.002	Jorgensen (1976)	
0.05 – 0.25	Camacho – Río Magdalena citado por Modelación Río Bogotá en los tramos del Río Fucha - Tunjuelo -Canoas (Diaz M, 2004)	
0.278	Río Bogotá a la altura de Puente Vargas (Consortio Cuencas & CAR, 2006)	
0.12	Modelación Río Bogotá en los tramos del Río Fucha - Tunjuelo - Canoas (Diaz M, 2004)	

**Fuente.** Elaboración propia.

Respecto al número de Schmidt, no se cambia el valor por defecto definido en IBER, debido a que no se dispone de datos precisos para la calibración del modelo. En cuanto a la Tasa de amonificación, no se define en el modelo debido a que se considera la concentración de nitrógeno orgánico como cero en toda la ciénaga. Lo mismo ocurre con la velocidad de sedimentación del nitrógeno orgánico.

#### 4.4.3 Generación de mallado: IBER 2D

En el dominio de estudio se decide implementar una malla no estructurada que puede estar conformada por elementos de 3 a 4 lados, debido a que este tipo de malla se adapta a cualquier tipo de geometría, considerada como la condición apropiada para la irregularidad de la geometría del humedal La Florida en el Sector 2. En la definición del mallado se realizó pruebas con mallas compuestas por celdas con tamaños de 5 m, 10 m y 25 m, a partir de los cuales se corrió el modelo hidrodinámico obteniendo los resultados que se aprecian en las siguientes gráficas.

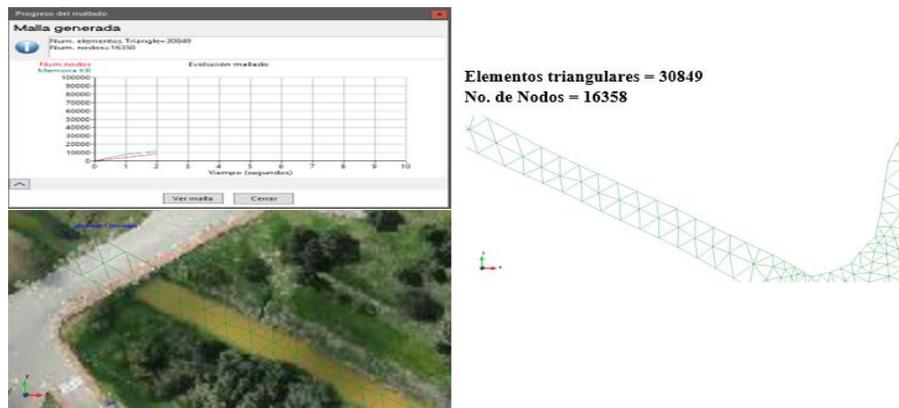
La sección más angosta del humedal (salida hacia el embalse La Isla), tiene un ancho promedio de 20 m, es decir, que, con una malla con elementos de cinco (5) m de longitud por lado, se genera una malla con cuatro (4) elementos a lo ancho del canal de salida; con elementos de diez 10 m de longitud por lado, se genera una malla con solo dos (2) elementos a lo ancho del canal de salida; y finalmente con elementos de 25 m, se genera una malla con un solo elemento a lo ancho del canal de salida.

**Figura 17.** Malla de cálculo no estructurada celda de 5m



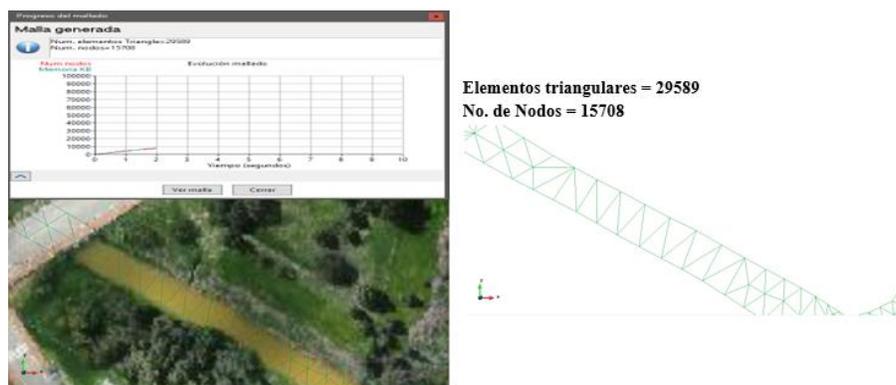
Fuente. Elaboración propia.

**Figura 18.** Malla de cálculo no estructurada celda de 10m



Fuente. Elaboración propia.

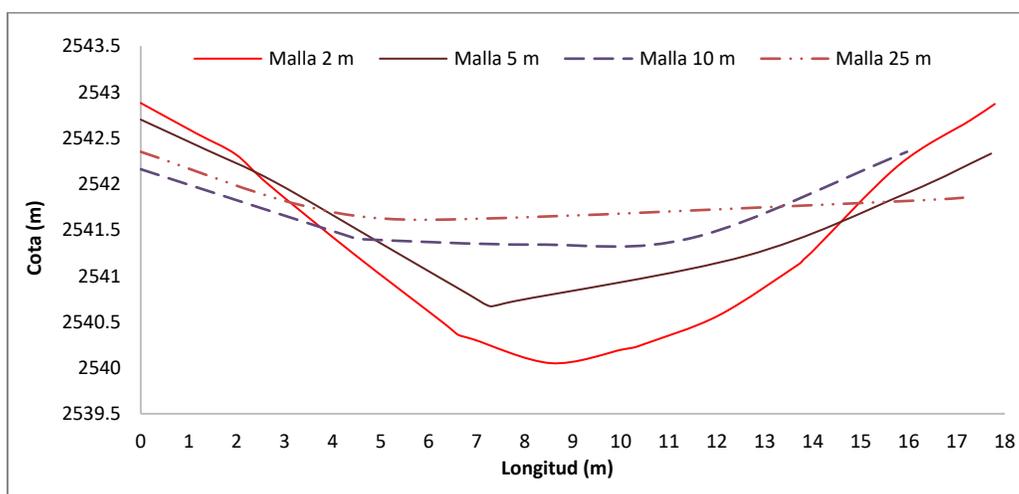
**Figura 19.** Malla de cálculo no estructurada celda de 25m



**Fuente.** Elaboración propia.

Debido a la extensión del humedal La Florida Sector 2, para elementos de malla con elementos de 5 m de longitud e inferiores, los tiempos computacionales requieren más de 72 horas de simulación, aspecto que restringe el uso de una malla más fina, tanto por el tiempo como por la capacidad del equipo de cómputo empleado para este estudio, sin embargo, IBER 2D permite optar por el uso de una malla refinada en ciertos sectores en los que se requiera tener un nivel de detalle mayor, como es el caso al interior del humedal de las superficies con espejo de agua. Ahora bien, a través de un corte transversal en el canal de salida del humedal La Florida Sector 2, es posible apreciar como con la implementación de mallas con elementos conformados por 10 y 25 m, se generaliza de manera importante la topografía real, razón por la cual se descarta su uso.

**Figura 20.** Corte transversal canal de salida humedal La Florida Sector 2 con diferente mado



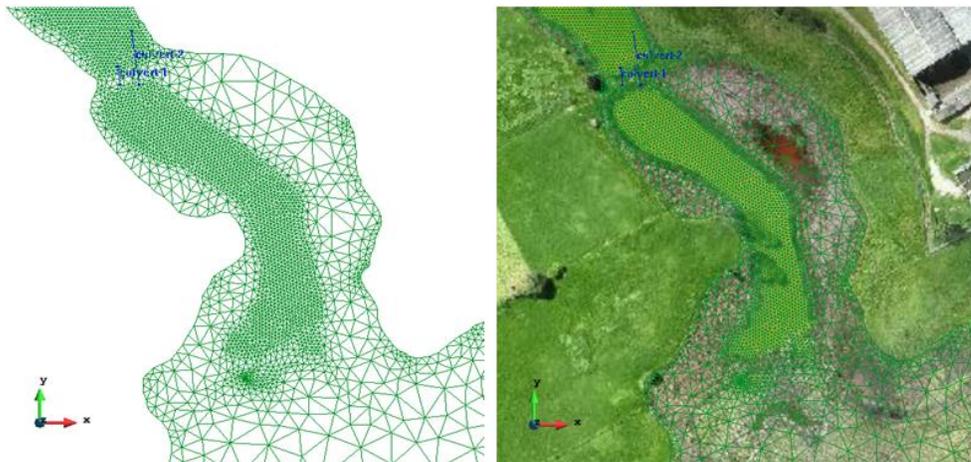
**Fuente.** Elaboración propia.

Por lo anterior, y a pesar de contar con diferentes superficies que identifican las áreas ocupadas con cobertura vegetal en el cuerpo lagunar y dado a que el modelo se concentra particularmente en el comportamiento del cuerpo de agua, tomando como referencia la profundidad promedio del

agua en el humedal y la separación entre secciones de las batimetrías realizadas en el cuerpo lagunar por CAR y EPAM S.A. E.S.P (2016), se adopta trabajar con dos tamaños de malla con elementos de lado de 5 m, para la superficie del humedal cubierto por vegetación flotante y emergente, así como, de 2 m para los elementos que cubren el espejo de agua en el canal de salida en el humedal La Florida Sector 2.

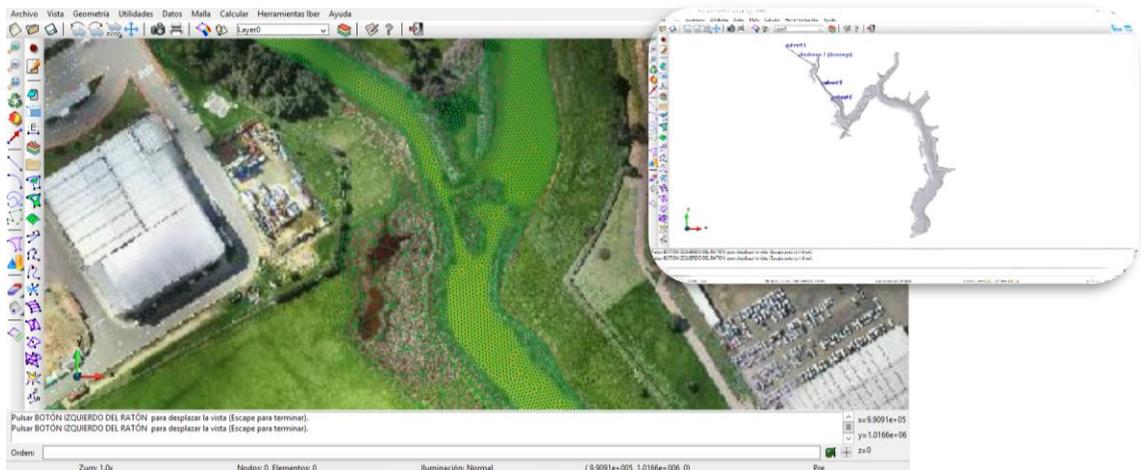
Posteriormente, la elevación de la malla se asignó con el archivo del Modelo Digital de Elevación generado por la CAR y EPAM S.A. E.S.P (2016), el cual fue transformado a un archivo en formato ASCII empleando el software Arcmap, específicamente la herramienta Raster to ASCII.

**Figura 21.** Malla de cálculo no estructurada



Fuente. Elaboración propia.

**Figura 22.** Detalle de malla de cálculo no estructurada y elevación

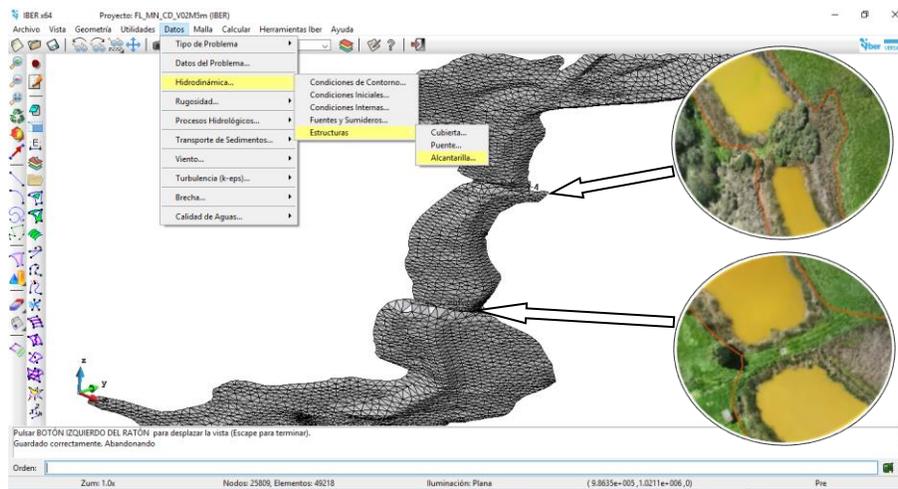


Fuente. Elaboración propia.

Debido a la topografía del terreno y con el objeto de permitir el tránsito del caudal en dos puntos en los cuales en el modelo digital de elevación sobresalen dos diques, se ingresó al modelo sobre la malla generada dos (2) alcantarillas en cada uno de los pasos artesanales existentes en el humedal e

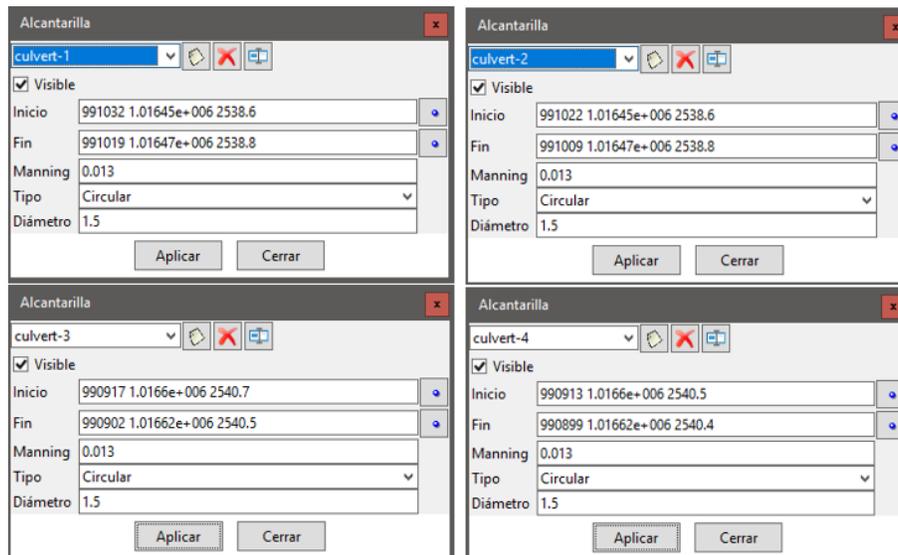
identificados en las coordenadas E: 990907, N: 1016606 y E: 991013, N: 1016452. Dichas alcantarillas permiten con un diámetro de 1.5 m, y luego de ser chequeados con una pendiente de 0.001 m/m, una rugosidad de 0.013 para canales revestidos en concreto, transportar con un tirante de 0.75m un caudal de 1.1 m<sup>3</sup>/s en régimen subcrítico y a tubo lleno un caudal máximo de 2.2 m<sup>3</sup>/s. En este sentido, se verificó que los caudales bombeados en el canal de succión de la estación de bombeo La Isla, equivalentes a 1.25 m<sup>3</sup>/s pueden circular por medio de las alcantarillas introducidas en el modelo.

**Figura 23.** Alcantarillas introducidas al modelo en los pasos artesanales existentes



Fuente. Elaboración propia.

**Figura 24.** Coordenadas de las alcantarillas introducidas al modelo



Fuente. Elaboración propia.

#### 4.4.4 Selección de las constantes cinéticas

Con la finalidad de evaluar el potencial del programa IBER para la construcción de un modelo hidráulico y de calidad del agua en el humedal La Florida, el presente trabajo académico adopta los resultados de los muestreos llevados a cabo sobre el humedal La Florida Sector 2 del año 2016 por la CAR & EPAM, acordes con el comportamiento de las sustancias de calidad de agua en el tiempo y en el espacio. Bajo esta hipótesis y tomando como base las constantes cinéticas propuestas a partir de la literatura según se describió en el numeral 4.4.2 del presente documento, se procedió a realizar la calibración de las variables tomando como punto de comparación los resultados de calidad de agua de la muestra No. 4 ubicada a la salida del humedal en las coordenadas E: 990689, N: 1016886 hacia el canal de succión de la estación de bombeo La Isla.

Inicialmente se realizó varias pruebas para determinar el comportamiento de las sustancias y la capacidad del modelo para simular las condiciones de calidad de agua en el humedal La Florida Sector 2, haciendo uso de un equipo con un procesador Intel Core i7-2670QM CPU de 2.2 GHz con sistema operativo de 64 bits, para el cual el programa requiere con una malla conformada con 49192 elementos y una simulación de 3600 segundos, un tiempo de cálculo de aproximadamente 7 horas (Escenario 1).

Las simulaciones A a G (Ver Cuadro 37) conservan el modelo hidrodinámico definido en este estudio para el escenario 1 y en cuanto al módulo de calidad incluyen la variación de las constantes cinéticas, considerando los valores mínimos y máximos recomendados en el Manual de Referencia de IBER (2015), los valores adoptados de la literatura (numeral 4.4.2) y otros valores introducidos manualmente a prueba y error que son necesarios cambiar para obtener un mejor ajuste de la dinámica del modelo (Mancera, Peña, Giraldo, & Santos, 2003).

**Cuadro 37.** Constantes empleadas en las simulaciones de calidad de agua en el humedal La Florida Sector 2

Constante	Proceso	Unid	Valor	Valor	Valor	Prueba	Prueba	Prueba	Prueba
			Mín.	Máx.	Literatura	1	2	3	4
			A	B	C	D	E	F	G
$K_{nit}$	Nitrificación	1/día	0.01	1	0.1	0.01	0.01	0.01	0.01
$K_{denit}$	Desnitrificación	1/día	0.001	0.1	0.27	0.001	0.001	0.001	0.001
$K_{dboc}$	Degradación MOC	1/día	0.02	3.4	0.17	2.1	2.15	2.4	1.95
$V_{sDBOC}$	Sediment MOC	m/día	0.01	0.36	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
$K_{dos}$	Demanda OD sedimento	Kg/m <sup>2</sup> /día	0	0.01	0.0012	0	0.0013	0.0021	0.008

Fuente. Elaboración propia.

Los resultados de las simulaciones con cada una de las constantes cinéticas propuestas para la Demanda Bioquímica de Oxígeno Carbonosa (DBOC total), Oxígeno Disuelto (OD), Nitrógeno

Amoniacal (N-NH<sub>3</sub>) y en forma de Nitratos (N-NO<sub>3</sub>), se representan en la Figura 25, Figura 26, Figura 27 y Figura 28 (Ver Anexo 6)

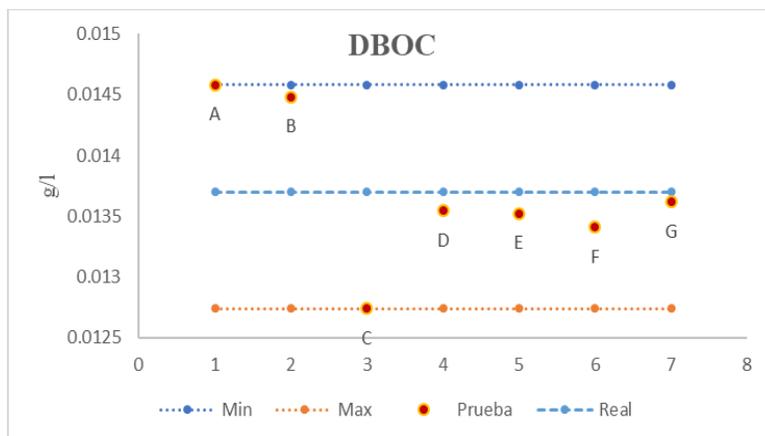
Como se ha descrito en el presente documento tres puntos o resultados de los muestreos fueron empleados para la alimentación del modelo y el último ubicado en la salida noroccidental del humedal La Florida Sector 2 para verificación, en consecuencia, las gráficas que a continuación se presentan indican el valor observado en campo del punto 4 (Línea azul discontinua), con respecto a los valores simulados en cada una de las pruebas.

En cuanto a DBOC total, las pruebas realizadas demuestran una diferencia de 0.6% con respecto al valor real en la simulación "G". Los demás resultados oscilan entre 0,6% y 7.5%, encontrando esta corrida con la mayor precisión en comparación con los datos medidos en campo. Teniendo en cuenta que los resultados por cada una de las variables corresponden a los resultados de una simulación integral, para OD dicha simulación arrojó una diferencia entre el valor real y simulado del 59.3%. Con respecto a N-NH<sub>3</sub> y N-NO<sub>3</sub> diferencias iguales a 55.4% y 65.7% respectivamente. Por lo tanto, se anota que solo se logró un buen ajuste para la concentración de la Demanda Bioquímica de Oxígeno Carbonosa (DBOC total).

Los resultados de la prueba C demuestran que, empleando valores máximos en los coeficientes cinéticos, es posible mejorar la simulación de OD en un 11.9% en comparación con el valor real, sin embargo, aumenta en un 6.9% la diferencia entre los datos reales y simulados para la DBOC total.

Ahora bien, con respecto a N-NH<sub>3</sub> y N-NO<sub>3</sub> el modelo no presenta un buen ajuste con los valores medidos en campo en el punto 4 del Humedal La Florida Sector 2. Con ninguno de los coeficientes cinéticos empleados se obtiene una diferencia menor al 55% como se observa en la Figura 27 y Figura 28, por ello, incluir otros valores en los coeficientes cinéticos diferentes a los evaluados implicaría el uso de constantes por fuera de los rangos recomendados en la literatura y por tanto, se pierde la credibilidad del modelo.

**Figura 25.** Análisis de las pruebas de calidad de agua para DBOC



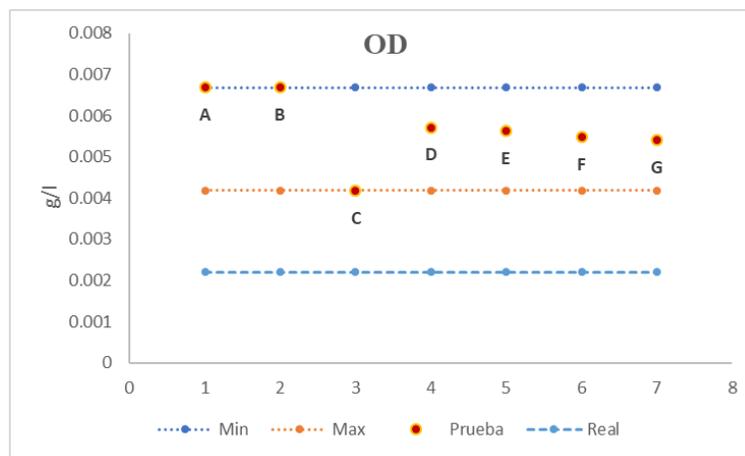
Fuente. Elaboración propia.

**Cuadro 38.** Resultados simulaciones de DBOC Total en el humedal La Florida Sector 2

Variable	Mínimo	Valor Literatura	Máximo	Prueba	Prueba	Prueba	Prueba	Valores reales (g/l)
	(g/l)	(g/l)	(g/l)	1	2	3	4	
	A	B	C	D	E	F	G	Real
<i>DBOC</i>	0.01458	0.01448	0.01274	0.01355	0.01352	0.01341	0.01362	0.0137
<i>% error</i>	6.0%	5.4%	7.5%	1.1%	1.3%	2.2%	0.6%	-

Fuente. Elaboración propia.

**Figura 26.** Análisis de las pruebas de calidad de agua para OD



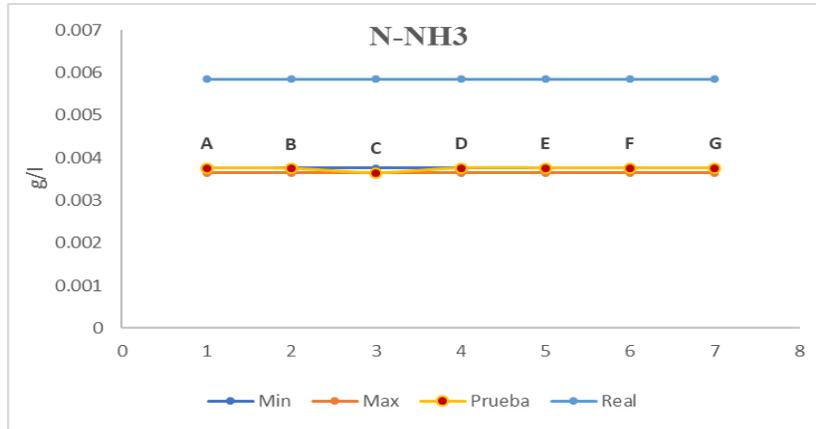
Fuente. Elaboración propia.

**Cuadro 39.** Resultados simulaciones de OD Total en el humedal La Florida Sector 2

Variable	Mínimo	Valor Literatura	Máximo	Prueba	Prueba	Prueba	Prueba	Valores reales (g/l)
	(g/l)	(g/l)	(g/l)	1	2	3	4	
	A	B	C	D	E	F	G	Real
<i>OD</i>	0.0066885	0.0066907	0.0041804	0.0057181	0.0056345	0.005486	0.0054082	0.0022
<i>% error</i>	67.1%	67.1%	47.4%	61.5%	61.0%	59.9%	59.3%	0.0%

Fuente. Elaboración propia.

**Figura 27.** Análisis de las pruebas de calidad de agua para N-NH<sub>3</sub>



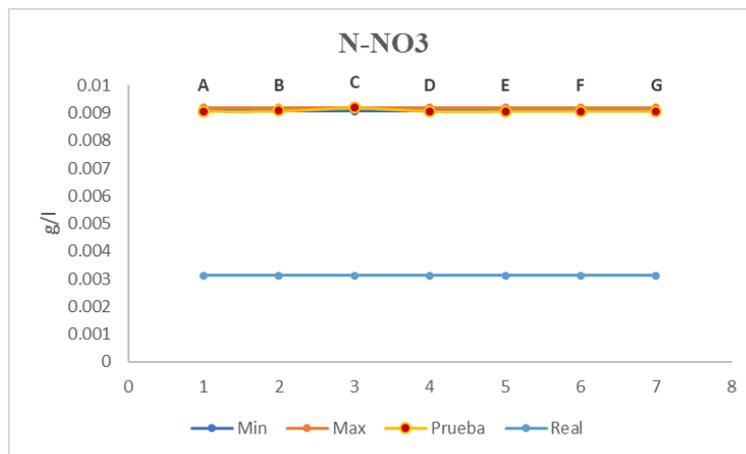
Fuente. Elaboración propia.

**Cuadro 40.** Resultados simulaciones de N-NH<sub>3</sub> Total en el humedal La Florida Sector 2

Variable	Mínimo	Valor Literatura	Máximo	Prueba	Prueba	Prueba	Prueba	Valores reales (g/l)
	(g/l)	(g/l)	(g/l)	1	2	3	4	
	A	B	C	D	E	F	G	Real
N-NH <sub>3</sub>	0.00376	0.00375	0.00364	0.00376	0.00376	0.00376	0.00376	0.00584
% error	55.4%	55.8%	60.3%	55.4%	55.4%	55.4%	55.4%	0.0%

Fuente. Elaboración propia.

**Figura 28.** Análisis de las pruebas de calidad de agua para N-NO<sub>3</sub>



Fuente. Elaboración propia.

**Cuadro 41.** Resultados simulaciones de N-NO3 Total en el humedal La Florida Sector 2

Variable	Mínimo	Valor Literatura	Máximo	Prueba	Prueba	Prueba	Prueba	Valores reales (g/l)
	(g/l)	(g/l)	(g/l)	1	2	3	4	
	A	B	C	D	E	F	G	
<i>N-NO3</i>	0.00907	0.00908	0.00918	0.00907	0.00907	0.00907	0.00907	0.00311
<i>% error</i>	65.7%	65.7%	66.1%	65.7%	65.7%	65.7%	65.7%	0.0%

Fuente. Elaboración propia.

**Cuadro 42.** Resultados de las pruebas de calidad de agua en el humedal La Florida Sector 2

Variable	Mínimo (g/l)	Valor adoptado (g/l)	Máximo (g/l)	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Valores reales (g/l)
	A	B	C	D	E	F	G	
<i>DBOC</i>	0.014582	0.014482	0.012743	0.013546	0.013523	0.013408	0.013618	0.0137
<i>OD</i>	0.0066885	0.0066907	0.0041804	0.0057181	0.0056345	0.005486	0.0054082	0.0022
<i>N-NH3</i>	0.0037588	0.0037479	0.0036426	0.0037588	0.0037588	0.0037588	0.0037588	0.00584
<i>N-NO3</i>	0.0090712	0.0090758	0.0091844	0.0090712	0.0090712	0.0090712	0.0090712	0.00311
Nombre Archivo	01M5mCalidad	02M5mCalidad	04M5mCalidad	05M5mCalidad	06M5mCalidad	07M5mCalidad	08M5mCalidad	-

Fuente. Elaboración propia.

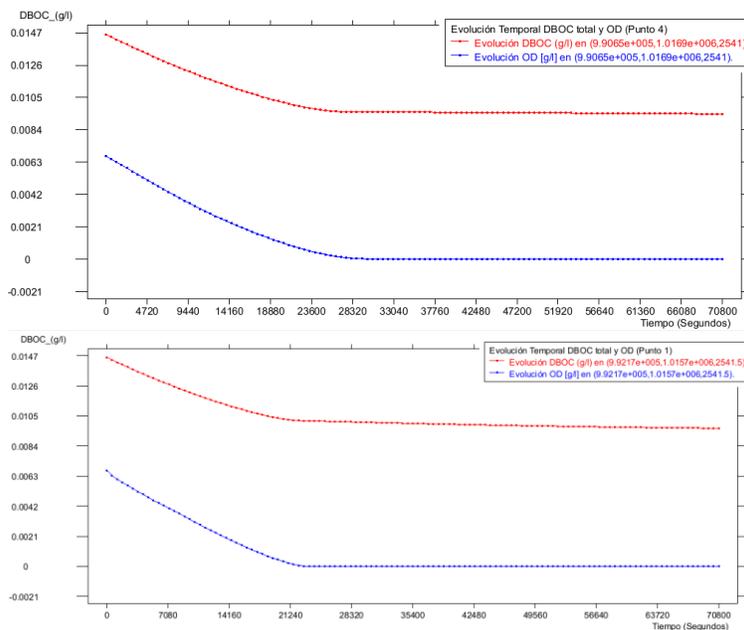
De acuerdo con lo expresado, las constantes cinéticas que se adoptan para el análisis del comportamiento de la calidad del agua en el humedal La Florida Sector 2 corresponden a las utilizadas en la prueba 4 o G, es decir:  $K_{nit} = 0.01$  1/día,  $K_{denit} = 0.001$  1/día,  $K_{dboc} = 1.95$  1/día,  $V_{sDBOC} = 0.04$  m/día y  $K_{dos} = 0.008$  Kg/m<sup>2</sup>/día.

Tras las pruebas realizadas en el presente estudio se establece que para alcanzar un estado estacionario<sup>15</sup> en las variables Demanda Bioquímica de Oxígeno Carbonosa (DBOC total) y Oxígeno Disuelto (OD) se requiere un tiempo mínimo de simulación 27000 segundos equivalentes a 7.5 horas; en cuanto a Nitrógeno Amoniacal (N-NH3) y Nitratos (N-NO3), tal condición es más variable, sin embargo, a pesar de que el estado estacionario puede alcanzarse en estos parámetros desde los 16000 segundos, para efectos de análisis de resultados las simulaciones se pueden correr desde los 27000 hasta los 30000 segundos, que exige un tiempo computacional de alrededor de 48 horas (1.9 días), para el caso del escenario 1, y los demás escenarios 2 y 3 de 72 horas (3 días)

<sup>15</sup> Un sistema o proceso está en estado estacionario si las variables que definen su comportamiento, respecto al tiempo, permanecen invariantes. Un sistema puede ser estático que significa que se mantiene constante en el tiempo, también puede presentar dos tipos de conductas, generalmente cuando inicia su funcionamiento para por un estado dinámico y luego alcanza un estado estacionario o de régimen.

La evolución temporal de cada una de las variables hasta alcanzar el estado estacionario se demuestra en las Figura 29 y Figura 30.

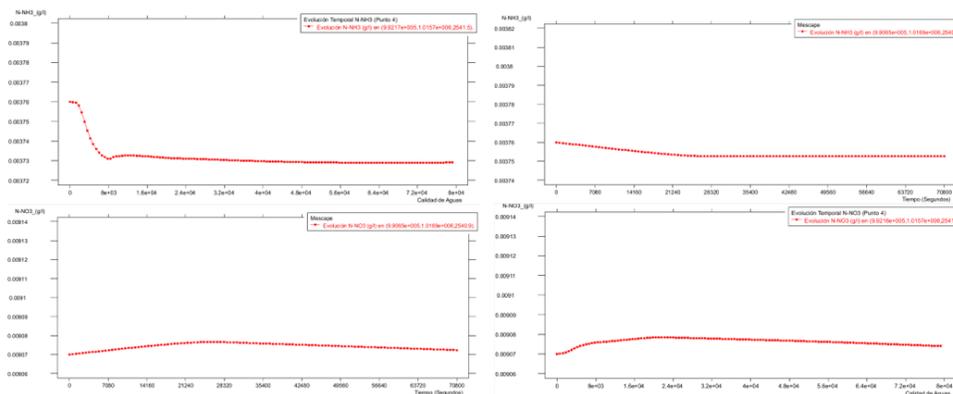
**Figura 29.** Evolución temporal de la DBOC total y OD (Punto 4 y 1)



Fuente. Elaboración propia.

La DBOC total al ser un contaminante no conservativo, tal como se aprecia en la figura tiene una concentración que disminuye en el tiempo, de igual manera, tal comportamiento se refleja en la evolución temporal del Oxígeno Disuelto que llega a niveles de 0 g/l debido a la gran cantidad de materia orgánica en la ciénaga.

**Figura 30.** Evolución temporal de N-NH3 y N-NO3 (Punto 4 y 1)



Fuente. Elaboración propia.

Para el presente caso no se cuenta con información suficiente que admita realizar la verificación del modelo, es decir, no se cuenta con otro grupo de datos en un escenario diferente con los cuales sea posible evaluar el comportamiento del modelo aplicando las constantes cinéticas resultantes de la calibración. Esta situación confirma la necesidad de establecer puntos de control y monitoreo continuos en el humedal La Florida Sector 2, con el fin de validar el modelo y obtener las constantes cinéticas que permitan que las simulaciones coincidan con los muestreos de campo.

Por último, se resumen en el siguiente cuadro las condiciones hidrodinámicas y de calidad aportados en el desarrollo del presente trabajo

**Cuadro 43.** Resumen de condiciones hidrodinámicas y de las modelaciones realizadas con IBER 2D

Escenario	Identificador de gráfica	Condición general	Nombre del Archivo IBER
1	Q <sub>0</sub>	Aporte de caudal por escorrentía	09AM5mCalidad_Ago_Tesis.gid
2	Q1	Q1 (2.5 m <sup>3</sup> /s) Calado 2.9m con Alcantarillas	0M52mCompuertaQ1RVp29.gid
	Q2	Q2 (1.87 m <sup>3</sup> /s) Calado 2.9m con Alcantarillas	02M52mCompuertaQ2RVp29.gid
	SIN ALCANTARILLAS		
	Q1-3	Q1 (2.5 m <sup>3</sup> /s) Calado 2.9m sin Alcantarillas	3M52mCompuertaQ1RVp29SinAlc.gid
3	DESCARGA DE AGUA RESIDUAL		
	Q1+AR	Q1 (2.5 m <sup>3</sup> /s) Calado 2.9m con Alcantarillas + Descarga de ARD	5M52mCompuertaQ1RVp29conalcAR.gid
	Q2+AR	Q2 (1.87 m <sup>3</sup> /s) Calado 2.9m con Alcantarillas + Descarga de ARD	6M52mCompuertaQ2RVp29conalcAR.gid
	Q1-3+AR	Q1 (2.5 m <sup>3</sup> /s) Calado 2.9m sin Alcantarillas + Descarga de ARD	4M52mCompuertaQ1RVp29SinAlcAR.gid

**Fuente.** Elaboración propia.

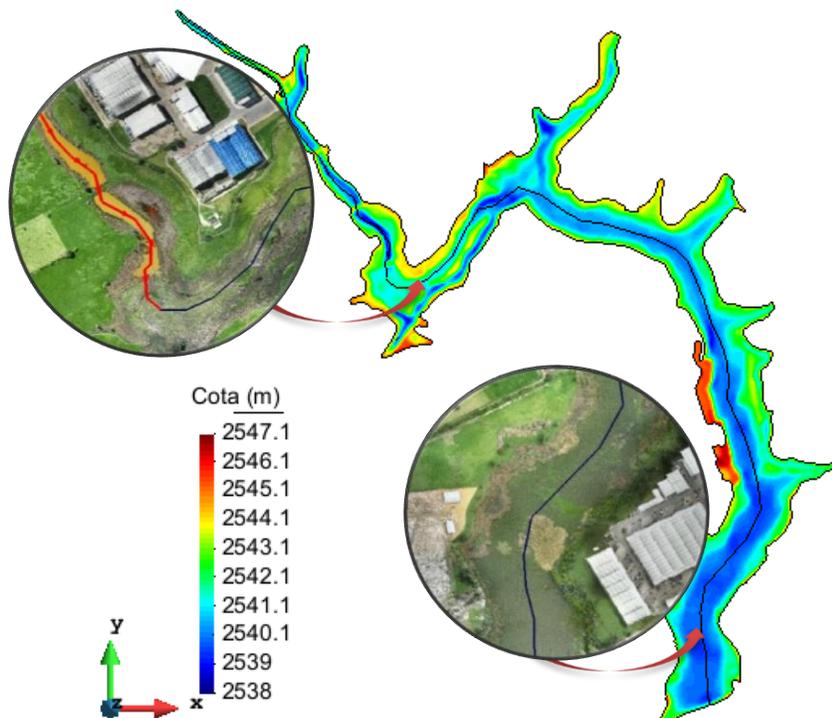
## 5. Resultados

Las salidas producidas por el modelo hidráulico y de calidad en el humedal La Florida, para los diferentes escenarios, con el uso de los módulos básico de modelación hidráulica y avanzado de calidad del agua de IBER 2D, se describen en los siguientes ítems.

### 5.1 Escenario 1 Condición Inicial

Para este escenario, es decir, para cuando la cota promedio del agua en el humedal La Florida esté sobre los 2542.27 (mes de agosto) m.s.n.m. (CAR & EPAM, 2016) y la profundidad promedio sea 2.1 m, es importante indicar que la condición de flujo tiende a efectuarse desde el costado noroccidental transportando el flujo con velocidades que oscilan entre  $0.38$  y  $6.32 \cdot 10^{-5}$  m/s hacia el costado sur colindando con el canal Chicú. Este comportamiento bajo las condiciones señaladas obedece a la topografía de la ciénaga, sin embargo, para cuando se analice el segundo escenario con los caudales de ingreso (Q1 y Q2) desde la compuerta ubicada sobre el canal Chicú al sur del humedal en dirección al embalse La Isla, cambia el sentido del flujo. Ver Figura 31.

**Figura 31.** Corte longitudinal Humedal La Florida Sector 2 (Longitud total 3290 m)



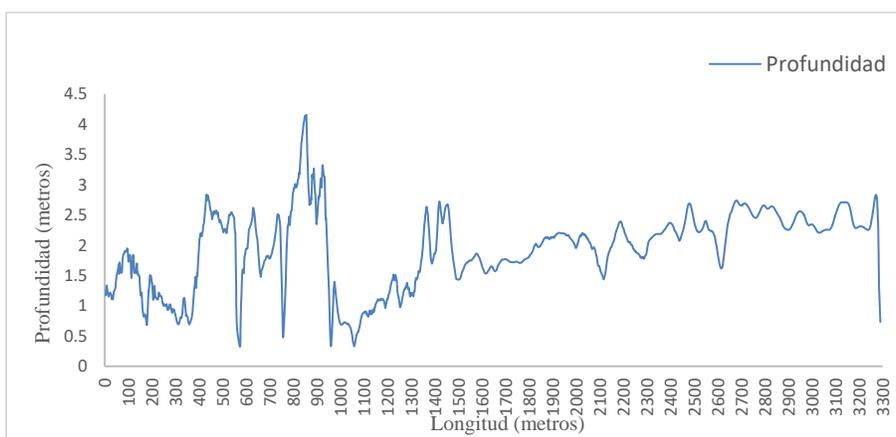
**Fuente.** Elaboración propia.

Tal como se aprecia en la figura anterior, sobre el eje del humedal La Florida Sector 2 se realizó un corte longitudinal que representa el trayecto principal del agua en una longitud total de 3290 m. El perfil de profundidades del corte realizado se presenta en la Figura 32, con profundidades que no superan los 2 metros en los primeros 400 metros en donde se distingue una sección del humedal sin

vegetación y un ancho superficial de máximo 20 metros; continúa el humedal con un trayecto importante (500 m) de un espejo de agua sin vegetación con una superficie más amplia y profundidades más variables que van desde los 0.5 m hasta los 3.8 m. Entre los 900 y 3290 metros de longitud, el humedal se caracteriza por la presencia de vegetación emergente y flotante en superficies amplias de hasta 150 m y profundidades más homogéneas entre 2 y 2.5 m aproximadamente.

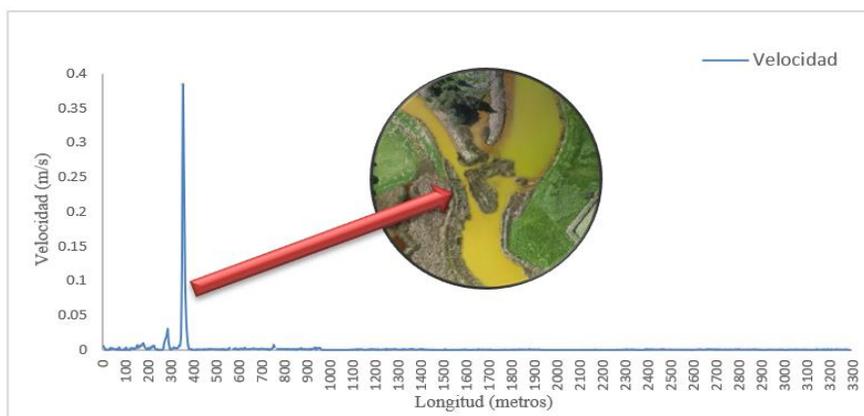
Con respecto a la velocidad del flujo, en un tramo ubicado entre los 300 y 400 m se evidencia una velocidad máxima de 0.38 m/s, en el resto del humedal las velocidades oscilan entre 0.9 m/s y  $6.32 \cdot 10^{-5}$  m/s, tendiendo a aguas estancadas. El pico de velocidad obedece, a una reducción ostensible del ancho superficial del humedal, en el que se llega aproximadamente a 3 metros en una garganta creada entre el lecho de agua y la vegetación del cuerpo lagunar (Ver Figura 33).

**Figura 32.** Perfil de profundidades en el Escenario 1 corte longitudinal en el humedal La Florida Sector 2 (Instante 30.000 seg.)



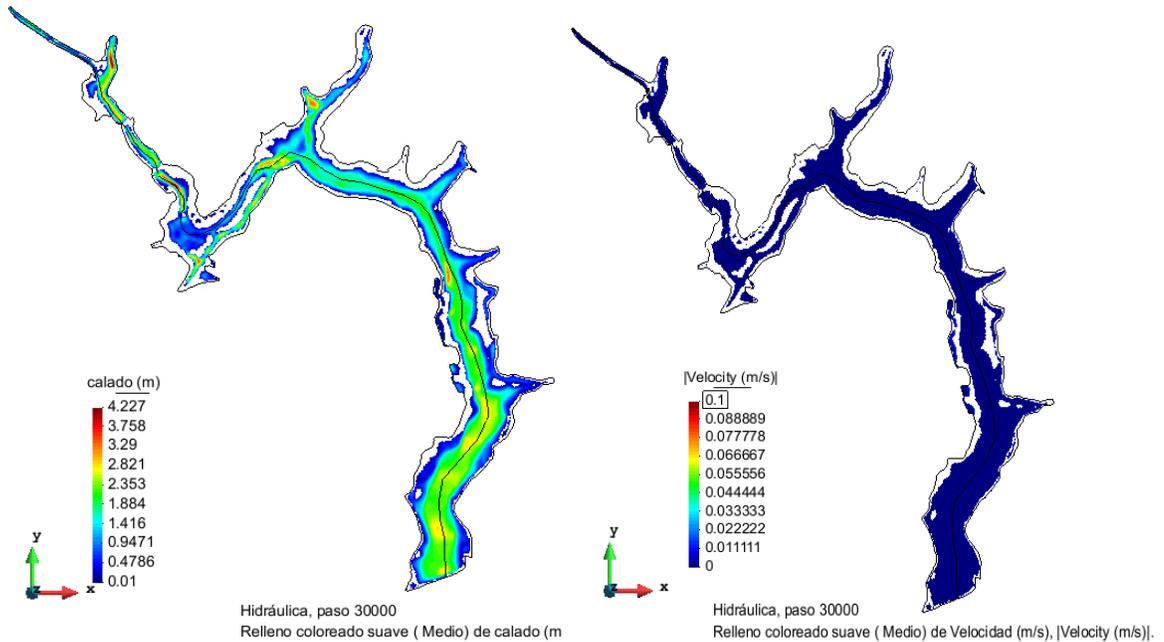
Fuente. Elaboración propia.

**Figura 33.** Perfil de velocidad en el Escenario 1 corte longitudinal en el humedal La Florida Sector 2 (Instante 30.000 seg.)



Fuente. Elaboración propia.

**Figura 34.** Distribución espacial de profundidades y velocidades en el Escenario 1 Humedal La Florida Sector 2 (Instante 30.000 seg.)

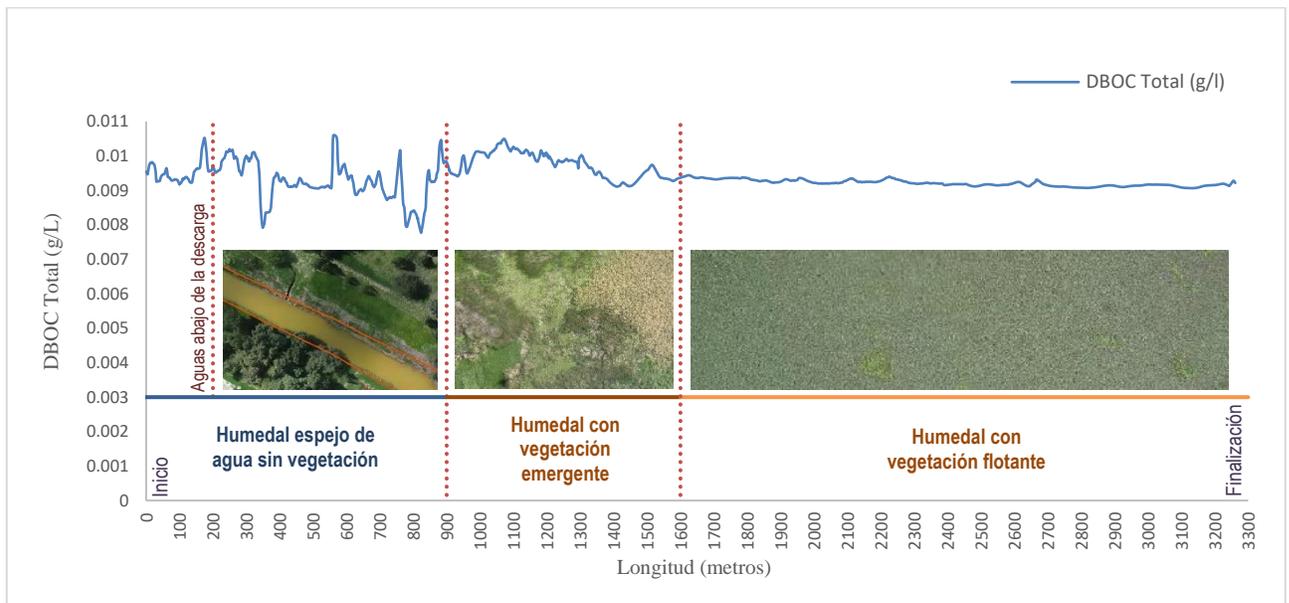


Fuente. Elaboración propia.

### DBOC Total

Durante la modelación, las concentraciones de DBOC Total presentan una leve variación en un rango entre 8 y 10 mg/L durante los primeros 1500 metros, en este tramo caracterizado por la ausencia de vegetación emergente y flotante, se encuentra una descarga con un caudal promedio de 0.72 L/s y una concentración de DBO Total de 3.8 mg/L; específicamente entre la abscisa 200 y 800 metros en el humedal La Florida Sector 2 se presenta una disminución en la concentración de la DBO Total de hasta 7.7 mg/L, demostrando la degradación de este contaminante. Sin embargo, al iniciar el trayecto del humedal con vegetación emergente entre la abscisa 900 y 1500 metros la DBO Total aumenta y se mantiene hasta los 3290 m en una concentración promedio de 9.2 mg/L.

**Figura 35.** Evolución de la DBOC Total en el Escenario 1 corte longitudinal del Humedal La Florida Sector 2 (Instante 30.000 seg.)

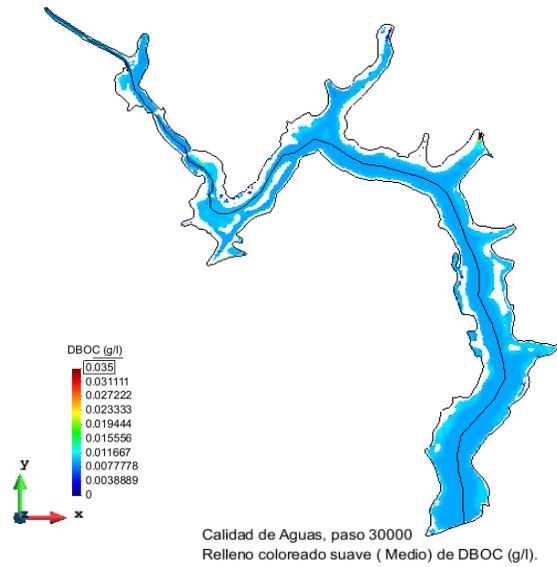


Fuente. Elaboración propia.

Al observar la Figura 35 y Figura 36, podría relacionarse la fluctuación de la DBOC Total a lo largo del humedal conforme la vegetación cambia. En este caso, la ausencia de vegetación en el humedal en sus primeros 900m, coincide con una alta fluctuación de la DBOC Total; en los 700m siguientes (entre la abscisa 900 y 1600m) donde predomina vegetación emergente, se puede apreciar un tramo con menor fluctuación de la DBOC Total; y finalmente, en los últimos 1700m (entre la abscisa 1600 y 3300m) donde existe predominancia de vegetación flotante, la fluctuación de la DBOC Total es mínima. Sin embargo, los coeficientes de rugosidad asignados en las 70 superficies del dominio para las diferentes coberturas en el humedal no demuestran una influencia significativa en la evolución longitudinal de las sustancias, por lo tanto, se asocia dichas variaciones a la irregularidad de la batimetría del humedal y estructuras hidráulicas existentes en el tránsito del caudal.

El efecto de la vegetación en los procesos físicos y biogeoquímicos de los humedales sometidos a descargas de aguas residuales, ha sido objeto de numerosos estudios y es aún tema de debate (Shelef, Gross, & Rachmilevitch, 2013). Actualmente es complejo predecir cuándo, en qué magnitud o bajo qué circunstancias o factores la vegetación de un humedal influirá en los procesos de descontaminación del agua, toda vez que estas plantas han demostrado ser una variable muy sensible a las perturbaciones de su entorno, y en esa medida, impactan positiva o negativamente, muchos de los procesos que se desarrollan en este tipo de cuerpo de agua, tales como, remoción de SST, mejoramiento de la conductividad hidráulica, reducción de la velocidad de flujo, liberación de oxígeno, producción de biomasa, fitoremediación de sales y metales, almacenamiento y consumo de nutrientes, eliminación de patógenos, control de olores e insectos, modificación del microclima, evapotranspiración, hábitat para fauna silvestre, biodiversidad, entre otros (Kadlec, 1990; Vymazal, 2011; Shelef et al., 2013).

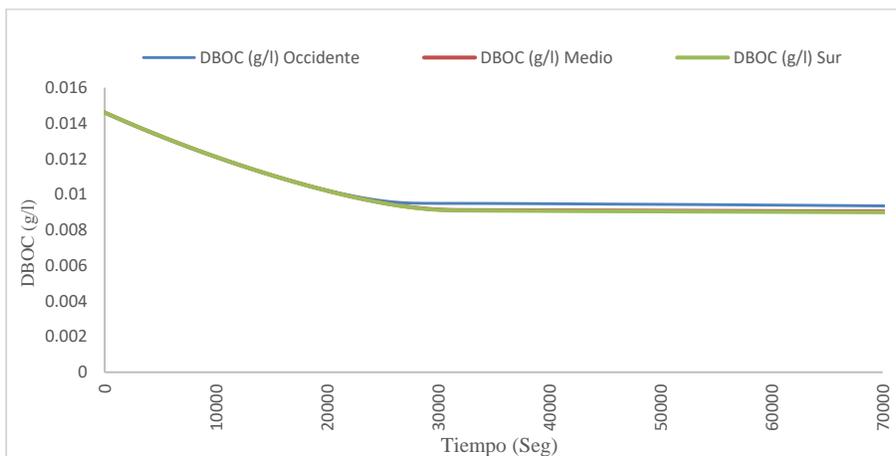
**Figura 36.** Evolución espacial de DBOC Total en el Escenario 1 Humedal La Florida Sector 2 (Instante 30.000 seg.)



**Fuente.** Elaboración propia.

En la Figura 37, se aprecia la evolución temporal de la DBOC Total en tres puntos diferentes del humedal La Florida Sector 2, demostrando que en este cuerpo lagunar hacia su parte media y sur (en dirección al canal Chicú) disminuye levemente la concentración de este parámetro, pero mantiene el mismo comportamiento alcanzando un estado estacionario desde los 27000 segundos o 7.5 horas de simulación.

**Figura 37.** Evolución temporal de DBOC Total en el Escenario 1 Humedal La Florida Sector 2 (Instante 30.000 seg.)

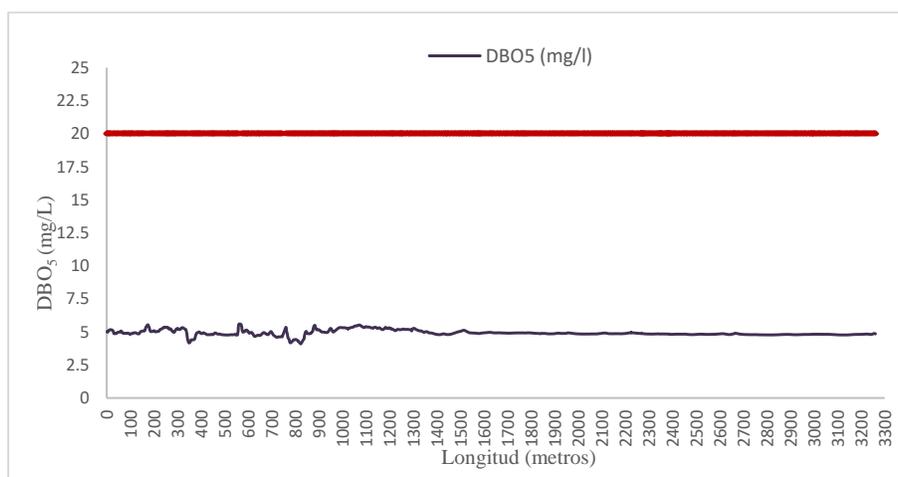


**Fuente.** Elaboración propia.

Tal como se aprecia en la Figura 38, la evolución longitudinal de la DBO<sub>5</sub> en el humedal La Florida Sector 2, oscila entre los 4.1 y 5.6 mg/L indicando que la concentración de la materia orgánica biodegradable en el humedal se mantiene homogénea con unas mínimas variaciones debidas a los procesos de degradación y a las condiciones hidráulicas del humedal.

La concentración de la DBO<sub>5</sub> en el humedal La Florida Sector 2, en toda su extensión para el escenario en estudio, es inferior al objetivo de calidad mínimo asignado a la calidad de agua de humedales ubicados dentro de la cuenca del río Bogotá, clasificado como Clase III con un horizonte proyectado al año 2020, según el Acuerdo CAR 43 de 2006. En este sentido, en las condiciones actuales, el humedal La Florida Sector 2 no excede la cantidad de materia orgánica permisible en cuerpos de agua de esta naturaleza en jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca.

**Figura 38.** Evolución DBO<sub>5</sub> en el Escenario 1 corte longitudinal Humedal La Florida Sector 2 (Instante 30.000 seg.)



Fuente. Elaboración propia.

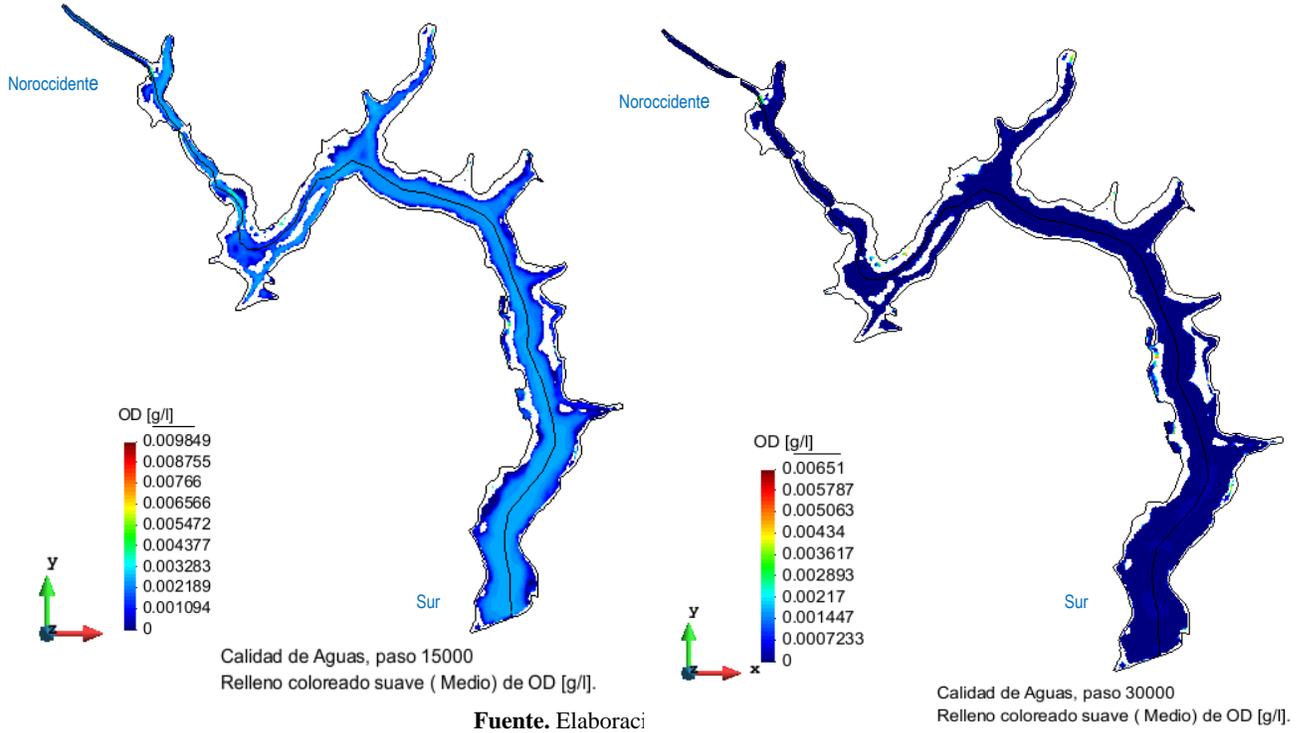
### Oxígeno Disuelto

El oxígeno disuelto de saturación calculado mediante el uso de las ecuaciones de APHA (1992) y Zison et al. (1978), para el humedal La Florida Sector 2 es del orden de 6.94 mg/L, este valor adoptado como condición inicial en todo el dominio disminuye durante los primeros 30,000 segundos de simulación de manera ostensible hasta alcanzar concentraciones de 0 mg/L en todos los sectores de la ciénaga (Ver Figura 39).

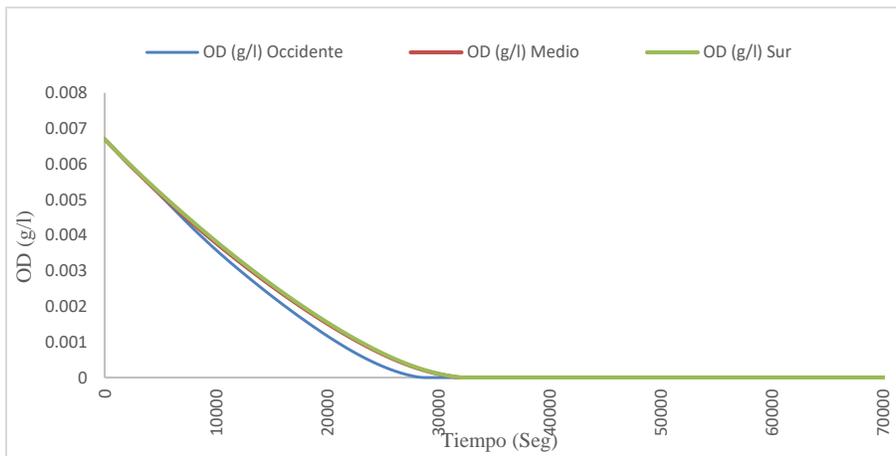
Los resultados obtenidos en la modelación podrían indicar que tanto la cantidad de materia orgánica presente en el humedal como los procesos de degradación que consumen el oxígeno disponible, reducen rápidamente a cero la concentración del oxígeno disuelto en el humedal (Baedecker, 1980). Sin embargo, debido a la diferencia del 59.3% entre las concentraciones reales y simuladas (sobreestimación), los resultados no se consideran confiables y demuestran la necesidad de correr el

modelo con muestreos de calidad tomados en condiciones diferentes a aguas quietas o estancadas como las empleadas en el presente trabajo.

**Figura 39.** Evolución Oxígeno Disuelto en el Escenario 1 Humedal La Florida Sector 2 (Instantes 15.000 y 30.000 seg.)



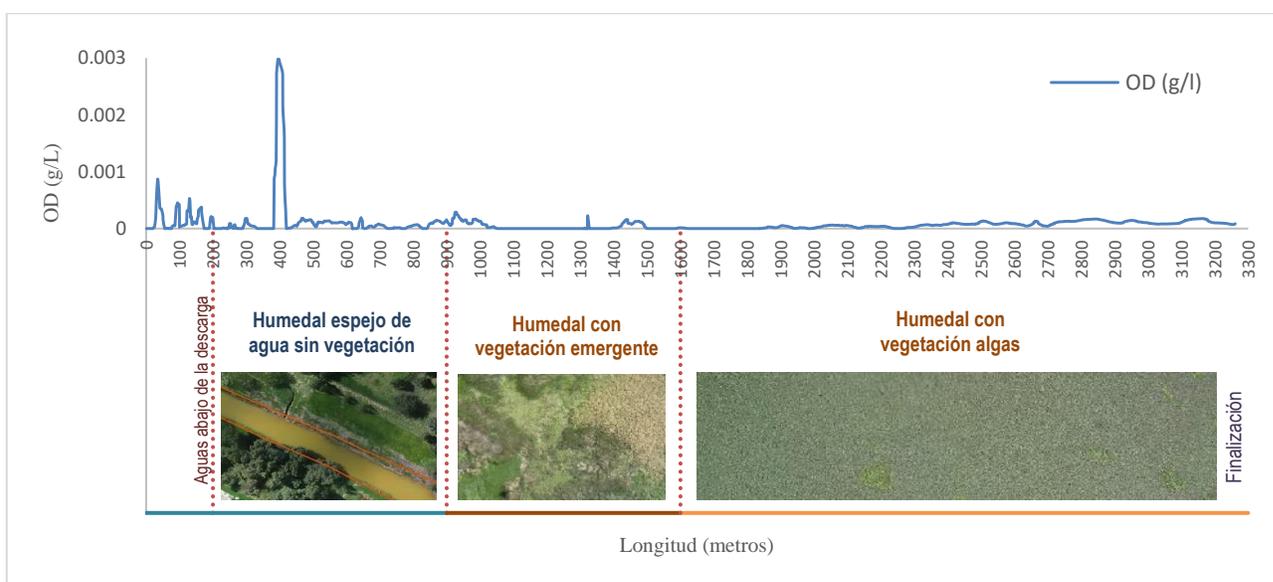
**Figura 40.** Evolución temporal del OD en el Escenario 1 Humedal La Florida Sector 2 (Instante 30.000 seg.)



**Fuente.** Elaboración propia.

A través del corte longitudinal del humedal La Florida Sector 2, se evidencia en los primeros 400 metros el aumento del Oxígeno Disuelto (2.98 mg/L), al parecer ocasionado por la reducción ostensible del ancho superficial del canal, un cambio en la topografía al incrementarse la profundidad en alrededor de 2 metros, lo cual puede incidir en el aumento de la velocidad (0.38 m/s) y podría generar la captura de oxígeno del aire a través del proceso de reaeración, sin embargo, no se considera un resultado consistente dadas las condiciones hidrodinámicas del modelo. Por otra parte, tampoco se encuentra una influencia relevante por la descarga existente en la zona con un caudal promedio de 0.72 L/s y una concentración de OD de 4.4 mg/L, debido a que ésta se realizó a una distancia de 200 m de la abscisa 400 m en donde se presenta el pico en el oxígeno.

**Figura 41.** Evolución del OD en el Escenario 1 corte longitudinal del Humedal La Florida Sector 2 (Instante 30.000 seg.)



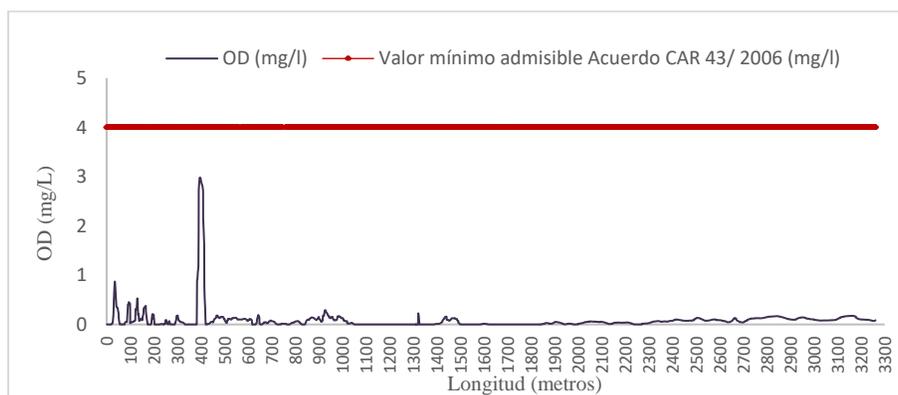
Fuente. Elaboración propia.

Luego de abscisa 400 m, la variación de la concentración del Oxígeno Disuelto es mínima, manteniéndose en valores cercanos a cero. El oxígeno empieza a recuperarse desde la abscisa 1800 m, con valores de hasta 0.17 mg/L. El Oxígeno disuelto en este escenario es inferior al valor mínimo admisible establecido como criterio de calidad de humedales ubicados dentro de la cuenca del río Bogotá, clasificado como Clase III con un horizonte proyectado al año 2020, según el Acuerdo CAR 43 de 2006.

Frente a este punto, conviene considerar el rol de la vegetación y la composición de los suelos como variables que determinan la concentración de oxígeno disuelto en el humedal. En este sentido, con fundamento en la Figura 41, se podría asociar la presencia de vegetación con los niveles de oxígeno disuelto, tal es así, que en el último tramo del humedal (entre la abscisa 1600 y 3300m), la existencia de vegetación flotante (algas y plantas similares) que cubre el espejo de agua, conforma una barrera que según lo descrito por Kadlec & Wallace (2009), se considera que puede incidir en la dificultad

para el intercambio de oxígeno con la atmósfera, lo que normalmente induce a la disminución del OD del agua y al desarrollo de condiciones anaerobias.

**Figura 42.** Evolución OD en el Escenario 1 corte longitudinal Humedal La Florida Sector 2 (Instante 30.000 seg.)



Fuente. Elaboración propia.

## Nitrógeno

En este escenario la velocidad del agua en el Humedal La Florida Sector 2 es tan baja ( $V_{prom} = 0.00107$  m/s), que las aguas se comportan como aguas en reposo consideradas como comunidades cerradas en las que los materiales alimenticios se mantienen o acumulan por circulación a través de los diferentes niveles tróficos, especialmente cuando los flujos entrantes y salientes son pequeños (Fair & Geyer, 2001).

Es así, como se evidencia que el nitrógeno amoniacal<sup>16</sup> y el nitrógeno en forma de nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) y de nitritos ( $\text{NO}_2^-$ )<sup>17</sup>, en el humedal mantienen concentraciones casi constantes en el tránsito por el humedal, con excepción del tramo comprendido entre la abscisa 600 y 900 m, en el que hay un descenso del nitrógeno amoniacal (3.08 mg/L) debido a los procesos de degradación de materia orgánica y de nitrificación, este último proceso generando un aumento en la concentración de los nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) de 9.7 a 10.51 mg/L.

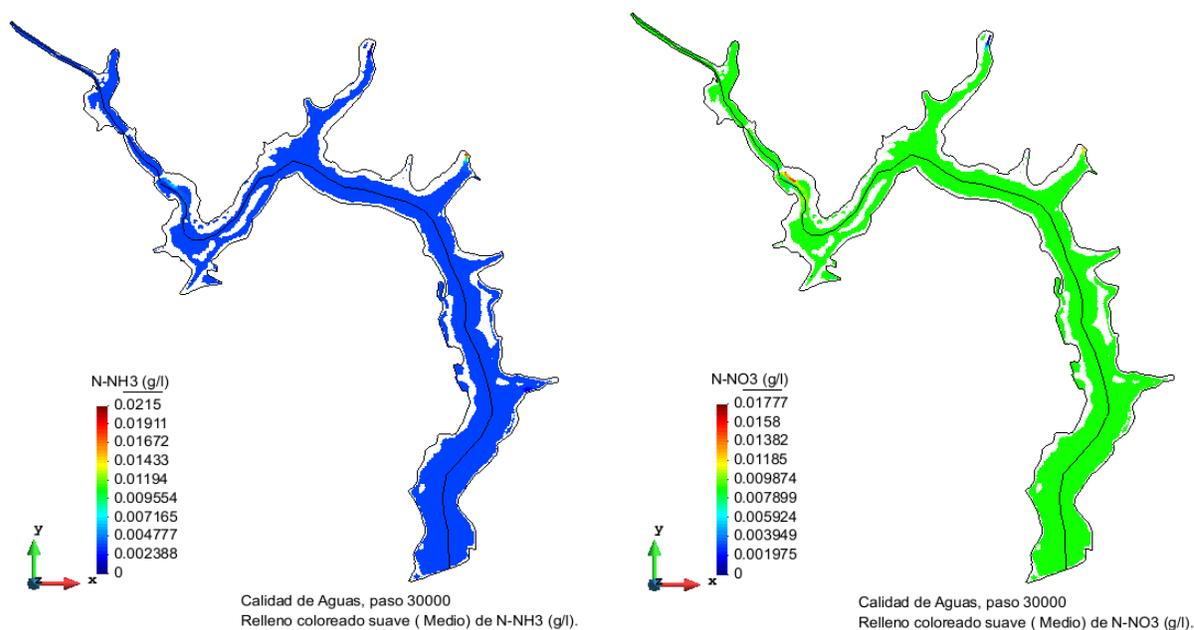
El modelo hidrodinámico tiene una condición que perturba el modelo de calidad, esto ocurre entre la abscisa 600 y 800 m, tramo en donde se encuentran dos alcantarillas por punto, instaladas para permitir el tránsito del caudal como consecuencia de los diques existentes en el modelo digital de elevación, tal como quedó plasmado en el numeral 4.4.3 del presente documento. Tales estructuras, representan la condición real del humedal La Florida, sin embargo, en los resultados del modelo de calidad de agua se identifican como factores que alteran la solución numérica de IBER 2D.

<sup>16</sup> Iber considera únicamente el nitrógeno amoniacal total sin hacer distinción entre amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) y de ion amonio ( $\text{NH}_4^+$ )

<sup>17</sup> Iber considera de forma conjunta los nitritos y nitratos, ya que generalmente la conversión entre estas dos formas es muy rápida. No se distingue, por lo tanto, entre los procesos de nitrificación y nitratación.

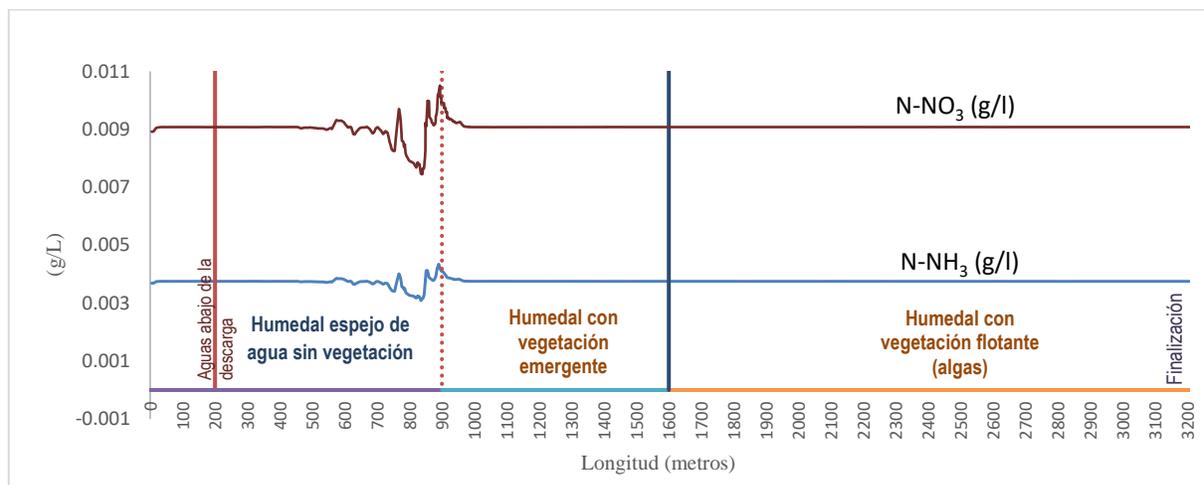
A partir de, la abscisa 900 m en adelante los valores de la concentración en el humedal de nitrógeno amoniacal ( $\text{N-NH}_3$ ) y en forma de nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) retornan a los iniciales, con una concentración promedio de oxígeno disuelto en el humedal de 0.0506178 mg/L, oxígeno que desde el inicio de la simulación se consume en los procesos de degradación de materia orgánica y de nitrificación, sin que de forma natural por procesos de reaireación se pueda evidenciar una recuperación del oxígeno en el trayecto restante. Dicho comportamiento, puede relacionarse como una consecuencia del crecimiento desmedido de algunas especies vegetales (como buchón de agua) que cubren con manto vegetal el agua (Cárdenas, 2005) y pueden repercutir directamente en la calidad del agua (por ejemplo, obstrucción del curso de agua, etc.) o indirectamente exacerbando otros problemas (por ejemplo, oxígeno, toxicidad del amoniaco, etc.) (Chapra, 1997).

**Figura 43.** Evolución espacial del Nitrógeno Amoniacal y en forma de Nitratos en el Escenario 1 Humedal La Florida Sector 2 (Instante 30.000 seg.)



Fuente. Elaboración propia.

**Figura 44.** Evolución Nitrógeno Amoniacal y Nitratos en el Escenario 1 corte longitudinal del Humedal La Florida Sector 2 (Instante 30.000 seg.)



**Fuente.** Elaboración propia.

Las concentraciones del nitrógeno amoniacal (N-NH<sub>3</sub>) y en forma de nitratos (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) en el humedal La Florida Sector 2, como se aprecia en la Figura 44, representan el comportamiento de la calidad del agua muestreadas en los puntos 1 (además considerado como condición inicial) y 2 (Ver Cuadro 44), el cual fue adoptado por el modelo para el dominio de estudio, por otro lado, el punto de verificación del muestreo No. 4 presenta una relación inversa a los puntos 1 y 2, por lo tanto, en la verificación del modelo el nitrógeno amoniacal (N-NH<sub>3</sub>) fue subestimado y los nitratos (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) fueron sobre estimados. Estos resultados, confirman la necesidad de contar con un monitoreo constante de la calidad de agua de este humedal, con el fin de estudiar con mayor precisión la evolución de contaminantes al interior de este.

**Cuadro 44.** Muestréos de calidad N-NH y NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en el humedal La Florida Sector 2

Ítem		1	2	3	Verificación 4
<b>Fecha muestreo</b>		4/8/2016	4/8/2016	4/8/2016	4/8/2016
<b>Coordenadas / parámetro</b>	<b>X</b>	992039	992047	992020	990689
	<b>Y</b>	1015217	1016127	1016517	1016886
<b>Nitratos N-NO<sub>3</sub></b>	<b>mg/L</b>	9.07	9.53	12.9	3.11
<b>Nitrógeno Amoniacal N-NH<sub>3</sub></b>	<b>mg/L</b>	3.76	0.106	21.5	5.84

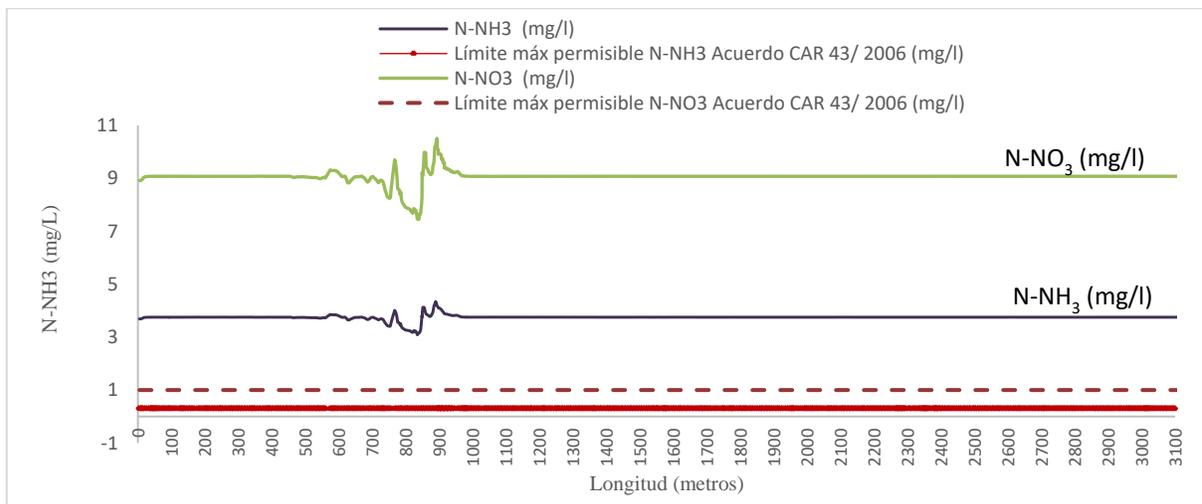
**Fuente.** CAR & EPAM S.A. E.S.P (2016).

Los nitratos así como los fosfatos, éstos últimos fuera del alcance de este trabajo, constituyen parte de los nutrientes esenciales para muchos organismos autótrofos o fotosintéticos y, en este sentido, su presencia en el agua puede ocasionar fenómenos de eutrofización (Cárdenas, 2005). Dicho fenómeno ha sido evaluado a partir de la aplicación de las metodologías propuestas por Vollenweider y Karydis, determinando que en el Humedal La Florida se encuentra en un estado eutrófico, condición que pone en riesgo la flora y fauna que este alberga (Baracaldo, 2017)

La concentración del nitrógeno amoniacal (N-NH<sub>3</sub>) y en forma de nitratos (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) en el humedal La Florida Sector 2, en toda su extensión para el presente escenario, exceden el objetivo de calidad mínimo asignado al recurso agua en humedales ubicados dentro de la cuenca del río Bogotá, clasificado como Clase III con un horizonte proyectado al año 2020, según el Acuerdo CAR 43 de 2006.

Frente a lo descrito, es de resaltar que la principal fuente de recarga del humedal es aportada por el Sistema Hidráulico de Manejo Ambiental y Control de Inundaciones (SHMACI), a través de la captación de agua del Río Bogotá que se realiza desde la estación Chicú (Baracaldo, 2017), la cual se constituye en un aportante trascendental de contaminantes como nitrógeno Amoniacal (N-NH<sub>3</sub>) con concentraciones que van de 3.9 a 4.5 mg/L, nitratos (N-NO<sub>3</sub>) con valores entre 0.164 a 0.371 mg/L, nitritos (N-NO<sub>2</sub>) entre 0.01 y 0.037 mg/L y fósforo entre 0.55 y 0.637 mg/L, estos datos como referencia, recopilados de las muestras sobre el Río Bogotá y Canal Chicú tomadas por el Laboratorio Ambiental de la CAR en junio del año 2016. Por otro lado, pueden existir otras fuentes de contaminación del humedal a través de descargas intermitentes asociadas a los parques industriales existentes en la periferia al cuerpo lagunar o residuales de fertilizantes empleados en actividades agrícolas.

**Figura 45.** Evolución Nitrógeno Amoniacal y Nitratos en el Escenario 1 corte longitudinal del Humedal La Florida Sector 2 (Instante 30.000 seg.)



Fuente. Elaboración propia.

Los aportes de contaminantes desde el Río Bogotá al humedal, bajo la condición actual, es decir, en aguas con poco movimiento y zonas en contraflujo, y teniendo en cuenta que, tanto el amoniacado como el nitrato son nutrientes esenciales para la fotosíntesis, pueden estimular el crecimiento excesivo de las plantas, lo que constituye un problema de calidad del agua por derecho propio (Chapra, 1997).

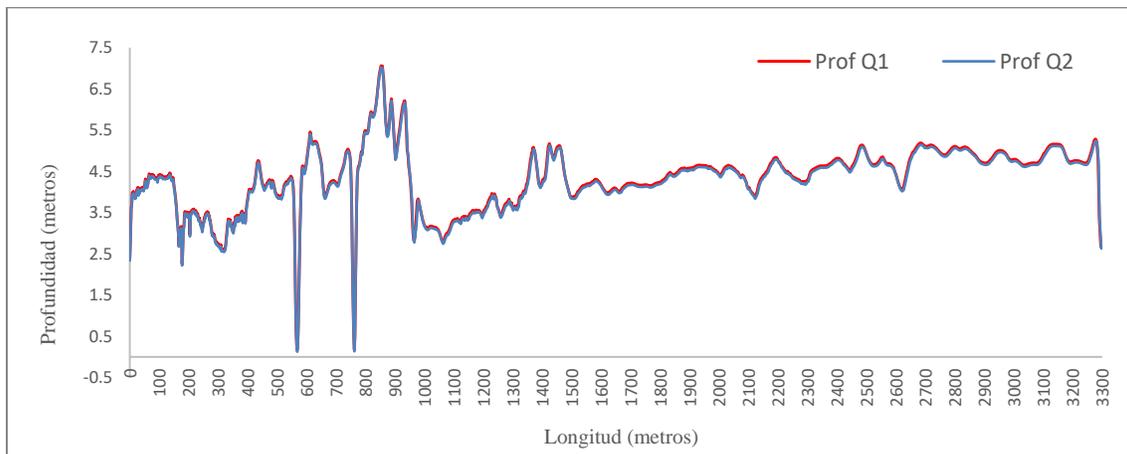
## 5.2 Escenario 2 Apertura de la compuerta en el Canal Chicú

Este escenario simula la recarga del Sistema Hidráulico de Manejo Ambiental y Control de Inundaciones (SHMACI), a través de la captación de agua del Río Bogotá realizada desde la estación Chicú en dirección al embalse La Isla transportando los caudales de ingreso  $Q1 = 2.5 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $Q2 = 1.87 \text{ m}^3/\text{s}$  por el humedal La Florida, bajo un calado con una condición inicial de 2.9 m.

El modelo hidrodinámico en el instante 30,000 segundos, con una condición inicial de calado de 2.9 m, registra una profundidad promedio en el humedal de 4.35 m para un caudal de ingreso  $Q1 = 2.5 \text{ m}^3/\text{s}$  y para el caudal de ingreso  $Q2 = 1.87 \text{ m}^3/\text{s}$ , la profundidad promedio se encuentra en 4.30 m (Ver Figura 46)

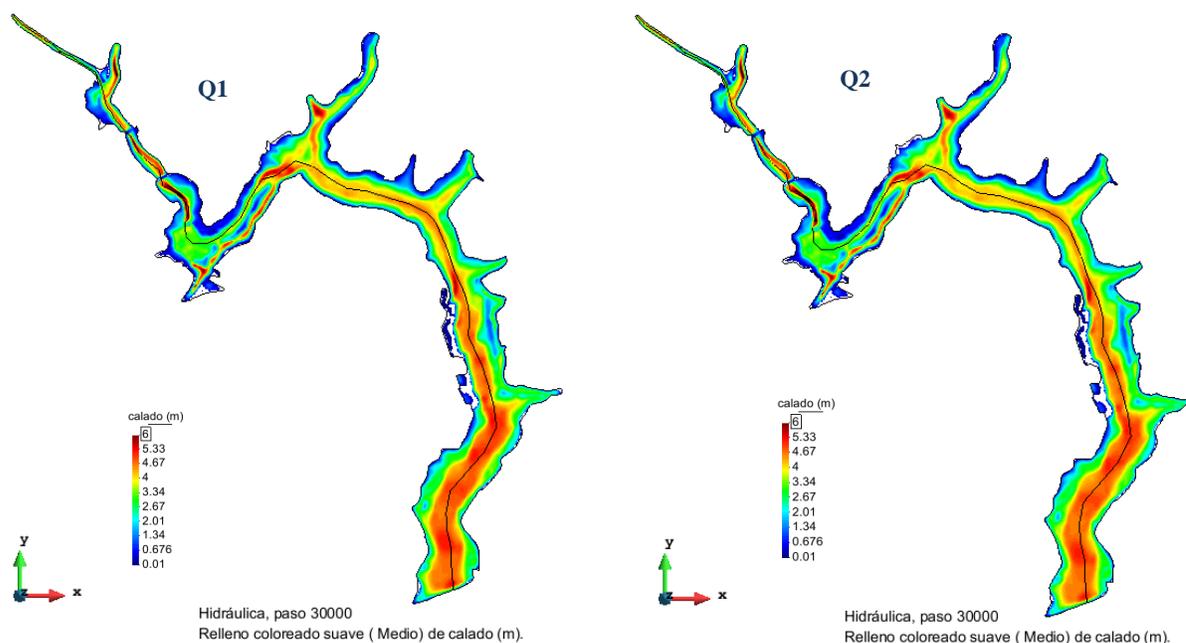
Bajo este escenario y para las condiciones reales de topografía del humedal La Florida sector 2, se evidencia como en el instante 30.000 seg, el flujo se secciona en tres (3) tramos identificados principalmente entre las abscisas 0 - 570 m, 570 m - 780 m, 780 m - 3290 m, como consecuencia de los pasos artesanales existentes en las coordenadas E: 990907, N: 1016606 y E: 991013, N: 1016452, que en el modelo se encuentran asociados a dos (2) alcantarillas por punto. Esta particularidad, influye en los resultados de calidad, como podrá observarse en los resultados que a continuación se presentan.

**Figura 46.** Perfil de profundidad corte longitudinal en el Escenario 2 humedal La Florida Sector 2 (Instante 30.000 seg.)



**Fuente.** Elaboración propia.

**Figura 47.** Distribución espacial de la profundidad en el Escenario 2 humedal La Florida Sector 2 (Instante 30.000 seg.)

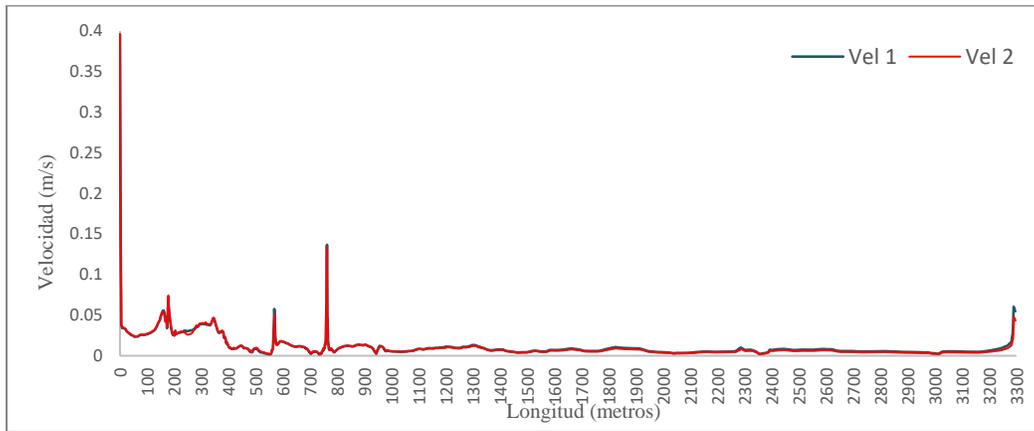


**Fuente.** Elaboración propia.

La velocidad en los escenarios con los caudales de ingreso  $Q1 = 2.5 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $Q2 = 1.87 \text{ m}^3/\text{s}$ , demuestran con respecto a la condición del humedal La Florida con aportes exclusivos de escorrentía, un aumento en la velocidad promedio entre 0.008 y 0.007 m/s respectivamente. El incremento en las velocidades se evidencia especialmente en el primer tramo de ingreso del agua desde el canal Chicú y en el último tramo de entrega de las aguas hacia el embalse La Isla, en el que además se presenta la reducción en la sección del humedal.

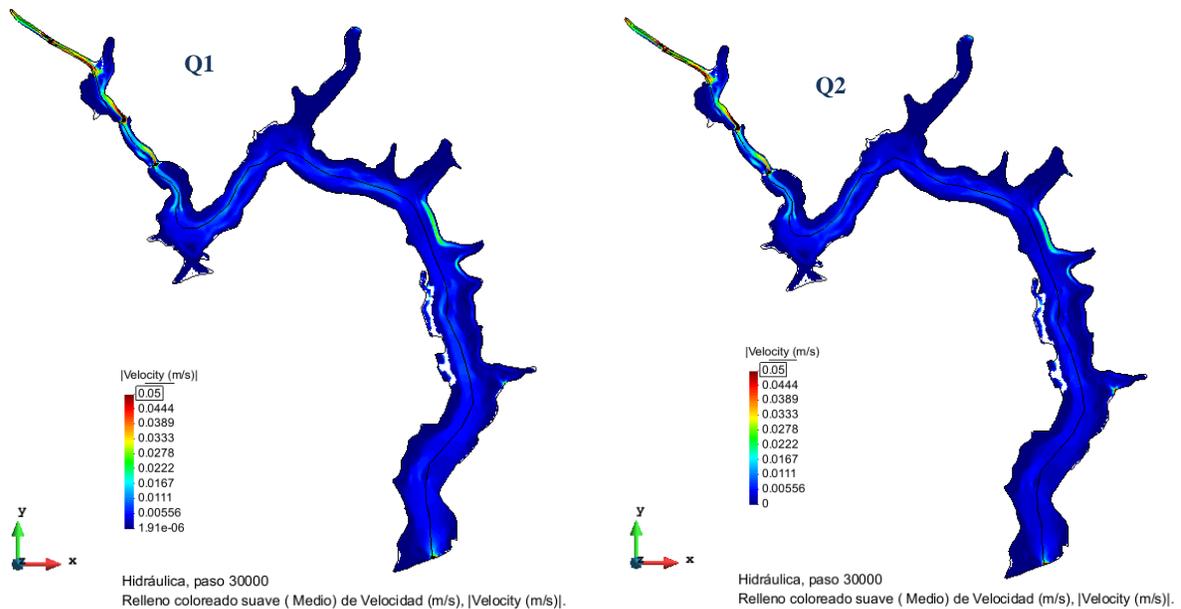
El perfil longitudinal de la velocidad efectuado en el humedal La Florida, expone el mismo fraccionamiento del flujo en los tres (3) tramos identificados principalmente entre los 0 - 570 m, 570 m - 780 m, 780 m - 3290 m, asociados a las alcantarillas instaladas para permitir el paso del caudal, en este sentido, los resultados de calidad pueden ser influenciados por el incremento de la velocidad del flujo al reducir la sección hidráulica. Por lo tanto, cada pico de velocidad en el perfil longitudinal obedece a los tramos próximos a estructuras hidráulicas, así como a la reducción ostensible de la sección superficial (canal de salida hacia el embalse La Isla) (Ver Figura 48 y Figura 49)

**Figura 48.** Perfil consolidado de velocidad en el Escenario 2 corte longitudinal en el humedal La Florida Sector 2 (Instante 30.000 seg.)



Fuente. Elaboración propia.

**Figura 49.** Distribución espacial de la velocidad en el Escenario 2 humedal La Florida Sector 2 (Instante 30.000 seg.)



Fuente. Elaboración propia.

### DBOC Total

Para la modelación se adoptó los resultados de calidad de agua de la muestra tomada en junio de 2016 por el Laboratorio Ambiental de la CAR, sobre el punto de derivación de agua hacia el humedal La Florida Sector 2 en el Canal Chicú, esto con el fin de determinar el comportamiento del humedal ante el aporte de contaminantes captados del Río Bogotá. Para los caudales  $Q1 = 2.5 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $Q2 = 1.87 \text{ m}^3/\text{s}$  se adoptó las siguientes concentraciones:  $\text{DBO}_5$  7.4 mg/L, DBOC total  $0.01402 \text{ Kg}/\text{m}^3$ ; OD 1.5

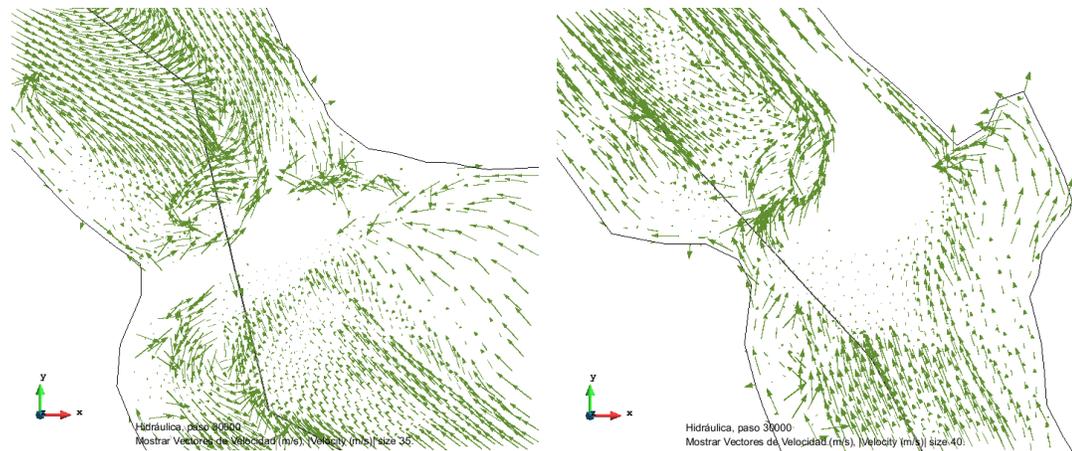
mg/L,  $0.0015 \text{ kg/m}^3$ ; Nitratos N-NO<sub>3</sub> 0.371 mg/L,  $0.000371 \text{ kg/m}^3$ ; Nitrógeno Amoniacal N-NH<sub>3</sub> 4.322 mg/L,  $0.004322 \text{ kg/m}^3$  y Temperatura 16.5°C.

Una vez ingresa el agua con los Q1 y Q2 del Río Bogotá al humedal por medio del canal Chicú, se observa durante los primeros 200 metros la concentración de DBOC total en un valor alrededor de 13 mg/L, en el siguiente tramo con una longitud aproximada de 2000 metros, la DBOC total permanece constante en un promedio de 8.76 mg/L. Esta última concentración y comportamiento no varía con respecto al primer escenario y corresponde a las áreas del humedal cubiertas en su totalidad con vegetación emergente y flotante.

En los siguientes 800 metros, sobre el tramo del humedal que no cuenta con vegetación en el espejo de agua (salida hacia el embalse La Isla), se observa una variación importante en la concentración de la DBOC total, sin embargo, no existe en este tramo aportes de caudal o contaminantes que influyan en la variación de la DBOC total, pero si la existencia en la abscisa 570 m y 780 m de dos alcantarillas por cada punto, que generan reflujos y remansos de agua, como muestran los vectores de velocidad para los Q1 y Q2 (Figura 50), por lo tanto, en el modelo numérico se generan tales resultados.

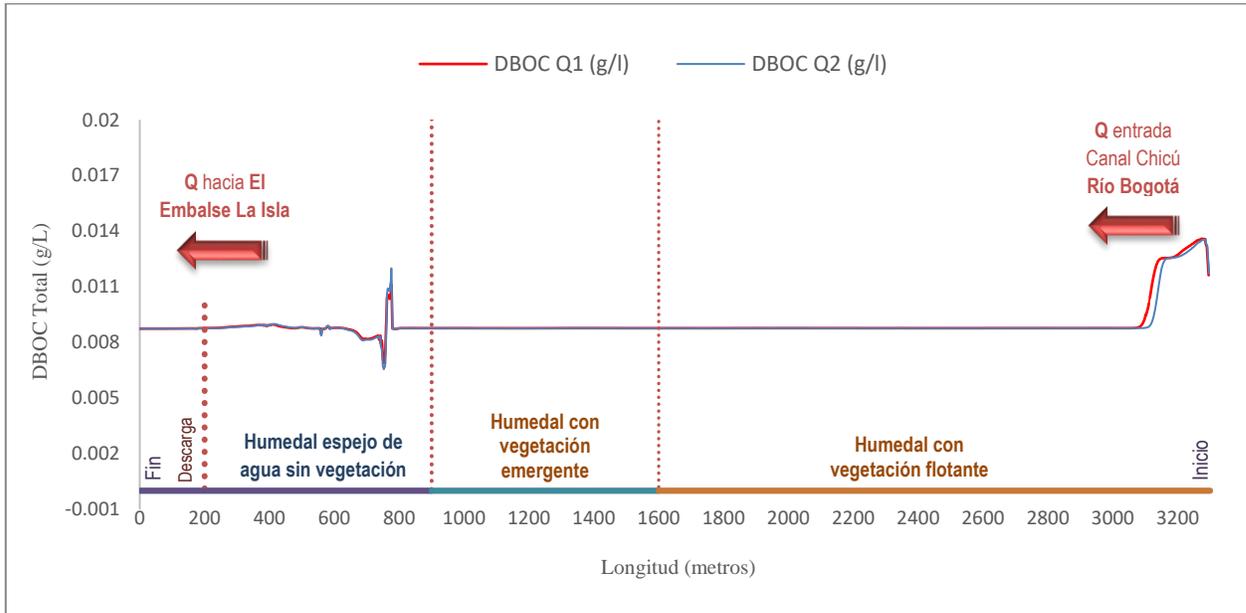
Posteriormente, a partir en los últimos 200 metros, la DBOC total para los caudales Q1 y Q2 termina con una concentración promedio de 8.74 mg/L.

**Figura 50.** Vectores de velocidad caudales Q1 y Q2 en el Escenario 2 Humedal La Florida Sector 2 (Instante 30.000 seg.)



Fuente. Elaboración propia.

**Figura 51.** Evolución de la DBOC Total en el Escenario 2 corte longitudinal del Humedal La Florida Sector 2 (Instante 30.000 seg.)



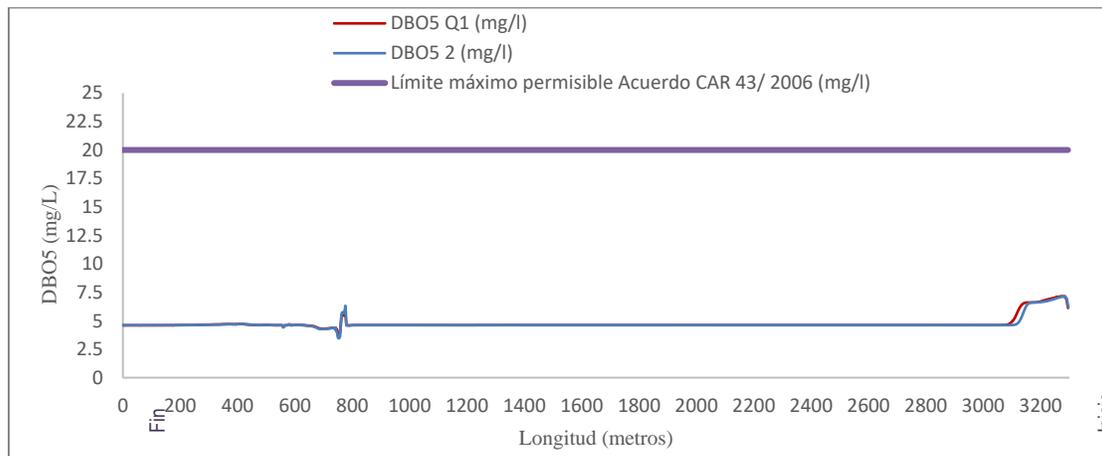
Fuente. Elaboración propia.

El perfil longitudinal de la Figura 51, bajo la condición de flujo de los caudales Q1 y Q2, demuestra para el instante 30000 segundos, que el humedal la Florida Sector 2 tiene la capacidad para el tratamiento y mejoramiento de la calidad del agua en términos de la cantidad de materia orgánica carbonosa que es aportada desde el Río Bogotá, con un porcentaje de 38% aprox de eficiencia en remoción.

$$Eficiencia = \frac{[Afluente] - [Efluente]}{[Afluente]} = \frac{[0.01402 \frac{g}{l}] - [0.00874 \frac{g}{l}]}{[0.01402 \frac{g}{l}]} * 100 = 38\%$$

Según se observa en la Figura 52, a pesar de las concentraciones de DBOC total aportadas por el caudal de ingreso del Río Bogotá, por medio de la captación de agua del canal Chicú, la concentración de la DBO<sub>5</sub> en el humedal La Florida Sector 2 (expresada en mg/L), es inferior al objetivo de calidad mínimo asignado a la calidad de agua de humedales ubicados dentro de la cuenca del río Bogotá, clasificado como Clase III con un horizonte proyectado al año 2020, según el Acuerdo CAR 43 de 2006. Es decir, que se cumple con el objetivo de calidad establecido en este parámetro para el cuerpo lagunar.

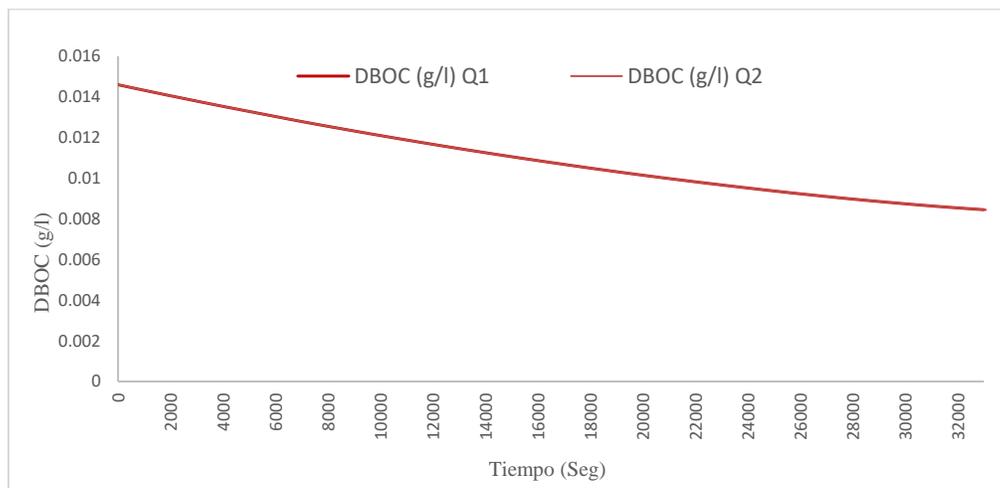
**Figura 52.** Evolución DBO<sub>5</sub> en el Escenario 2 corte longitudinal Humedal La Florida Sector 2 (Instante 30.000 seg.)



Fuente. Elaboración propia.

La comparación de la evolución temporal de la DBOC total en un punto en la entrada del humedal y otro a la salida (hacia el embalse La Isla), permite demostrar en un trayecto de alrededor de 3290 m como el humedal La Florida Sector 2 está en capacidad de degradar la materia orgánica aportada del Río Bogotá, con un porcentaje de eficiencia en remoción del 38% aproximadamente.

**Figura 53.** Evolución temporal de la DBOC total en el Escenario 2 humedal La Florida Sector 2 (CInicial 2.9 m - Instante 30.000 seg.)

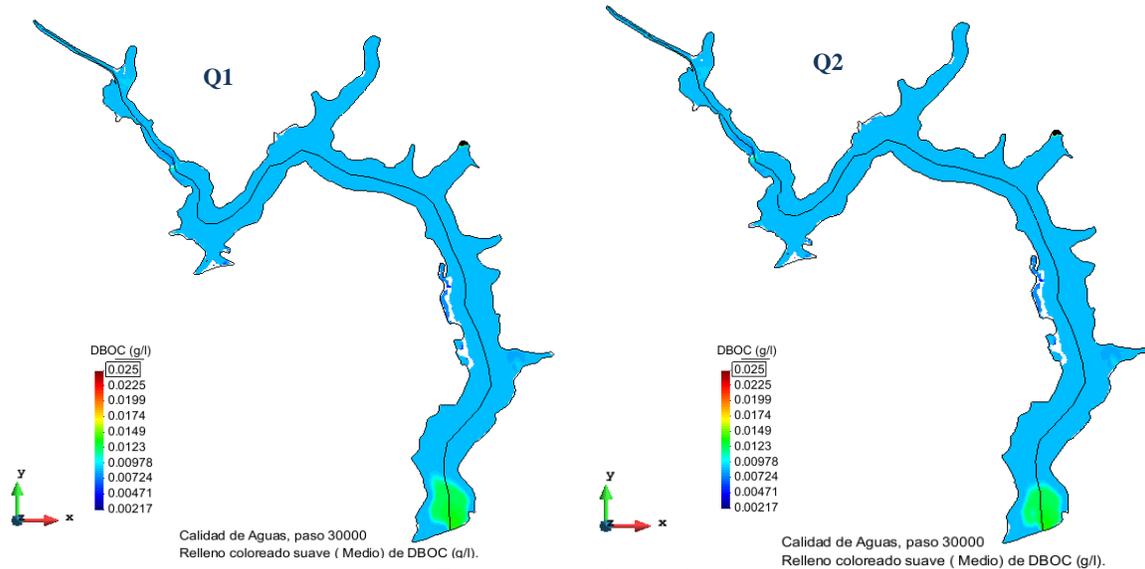


Fuente. Elaboración propia.

Es decir, dichos resultados permiten percibir el potencial del humedal La Florida Sector 2 en todo su dominio para tratar aguas con concentraciones de contaminantes que, para el Sistema Hidráulico de Manejo Ambiental y Control de Inundaciones (SHMACI), reviste de gran importancia dado a que las aguas transportadas hacia el embalse La Isla, son empleadas aguas abajo por los usuarios del recurso para riego de cultivos y abrevadero de animales. El beneficio en el mejoramiento de la calidad de

agua bajo de dicho sistema es considerable al tener presente la deficiente calidad de agua del Río Bogotá en tramos posteriores al punto de derivación del canal Chicú, debido a las múltiples descargas de aguas residuales y contribuciones de fuentes hídricas, que limitan el uso del recurso hídrico.

**Figura 54.** Evolución espacial de DBOC Total en el Escenario 2 humedal La Florida Sector 2 (Instante 30.000 seg.)



Fuente. Elaboración propia.

## Oxígeno Disuelto

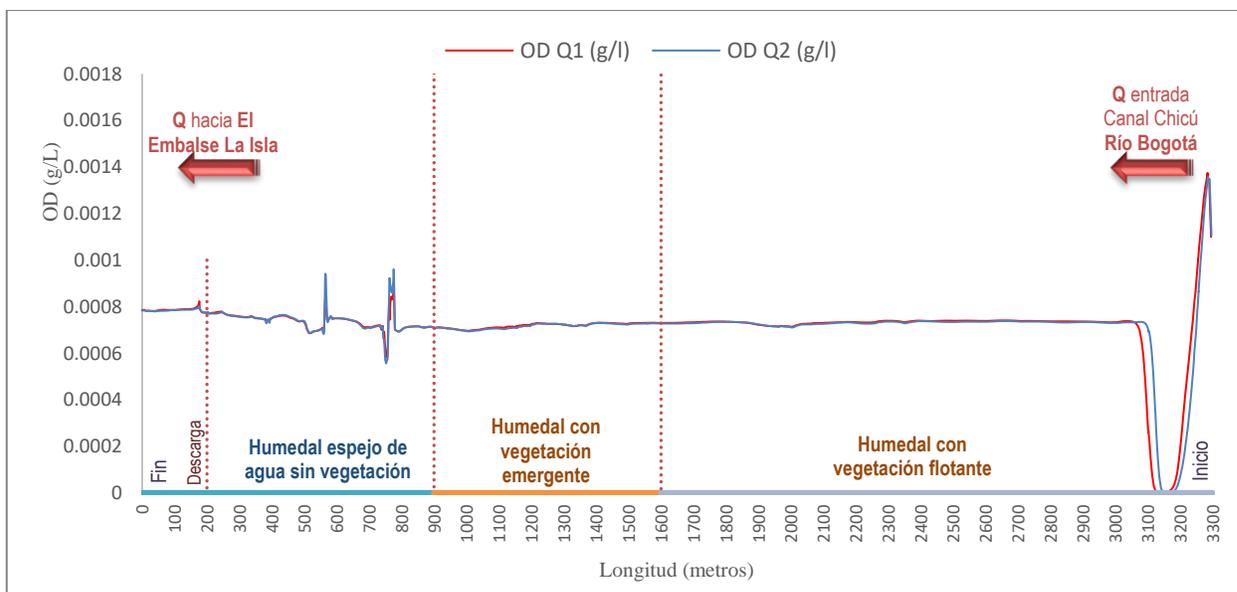
La influencia de los aportes de los caudales Q1 y Q2 hacia el humedal La Florida sector 2 bajo la condición inicial de calado 2.9 m, como se aprecia en la Figura 55, demuestra con respecto a la simulación del escenario 1 un incremento en la concentración de oxígeno disuelto. Al inicio del trayecto, el oxígeno disuelto desciende a cero mg/L y en aproximadamente 100 m se recupera hasta alcanzar una concentración promedio de 0.73 mg/L, que se mantiene constante en aproximadamente 2000 m del cuerpo lagunar, caracterizada por vegetación flotante y emergente.

En los tramos restantes (abscisa 0 a 900 m), se evidencia para los Q1 y Q2 un cambio en el oxígeno disuelto, que hacia la abscisa 570 m y 780 m se asocian con la influencia en el modelo de las alcantarillas existentes, debido a que no hay otro factor que explique cambios tan pronunciados. Bajo estos caudales, por causa de las condiciones de calidad iniciales, topografía y estructuras hidráulicas del cuerpo lagunar, el agua tiene unos reflujos en algunos tramos, que repercuten en la calidad de agua. La tendencia mínima de ascenso en la concentración de oxígeno disuelto hacia la salida del humedal en dirección al embalse La Isla, demuestra para estas condiciones que, no hay respuesta en el tratamiento del oxígeno disuelto.

Con respecto a la concentración inicial de oxígeno disuelto en el caudal de entrada del Río Bogotá, se obtiene una reducción en la concentración de OD del 52% aprox. (OD Entrada = 1.5 mg/L y OD

Salida = 0.78 mg/L), como resultado posible del consumo de la materia orgánica carbonosa, de los procesos de nitrificación, pero en mayor medida por la mezcla con el agua del humedal que tiene como condición inicial una concentración de 0.19 mg/L de OD. Debido a estos resultados, es necesario alimentar el modelo con diferentes muestreos de calidad a fin de minimizar la diferencia obtenida entre las concentraciones reales y simuladas en este parámetro.

**Figura 55.** Evolución del OD en el Escenario 2 corte longitudinal del Humedal La Florida Sector 2 (Instante 30.000 seg.)



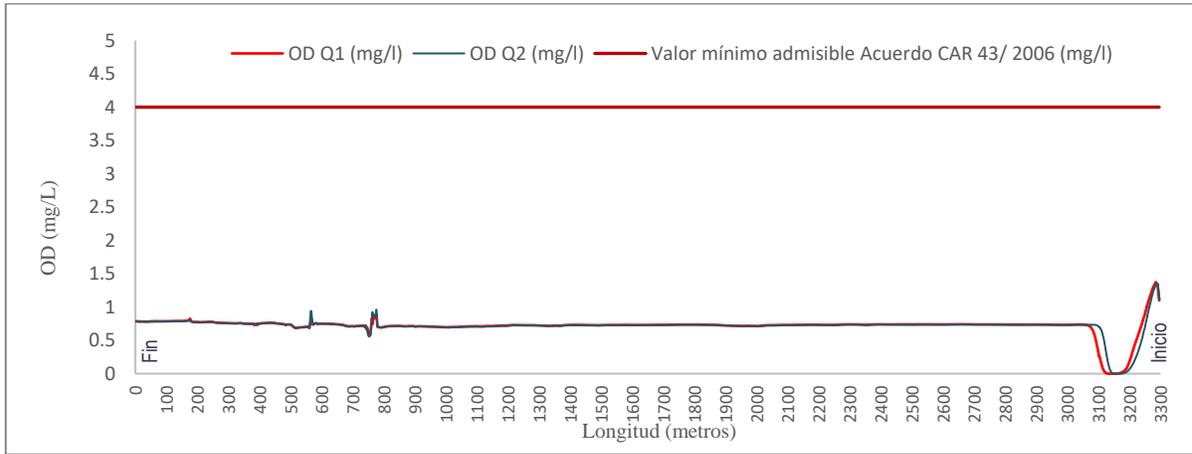
Fuente. Elaboración propia.

A pesar de la recuperación del Oxígeno Disuelto en algunos tramos del humedal La Florida sector 2, la dinámica de este cuerpo lagunar, no logra recuperar ni alcanzar el valor mínimo admisible establecido como criterio de calidad de humedales ubicados dentro de la cuenca del río Bogotá, clasificado como Clase III con un horizonte proyectado al año 2020, según el Acuerdo CAR 43 de 2006 (Ver Figura 56)

Para este escenario, es importante considerar la influencia de algunas especies vegetales que cubren el espejo de agua en el cuerpo lagunar, que se han desarrollado de forma descontrolada en el humedal La Florida sector 2, que obstaculizan los procesos de reaeración natural. Esto como consecuencia, de la alta presencia tanto de amoníaco como de nitratos, que son nutrientes esenciales para la fotosíntesis que estimulan el crecimiento excesivo de plantas en el proceso denominado eutrofización y que afectan directamente el nivel de oxígeno en el agua (Chapra, 1997).

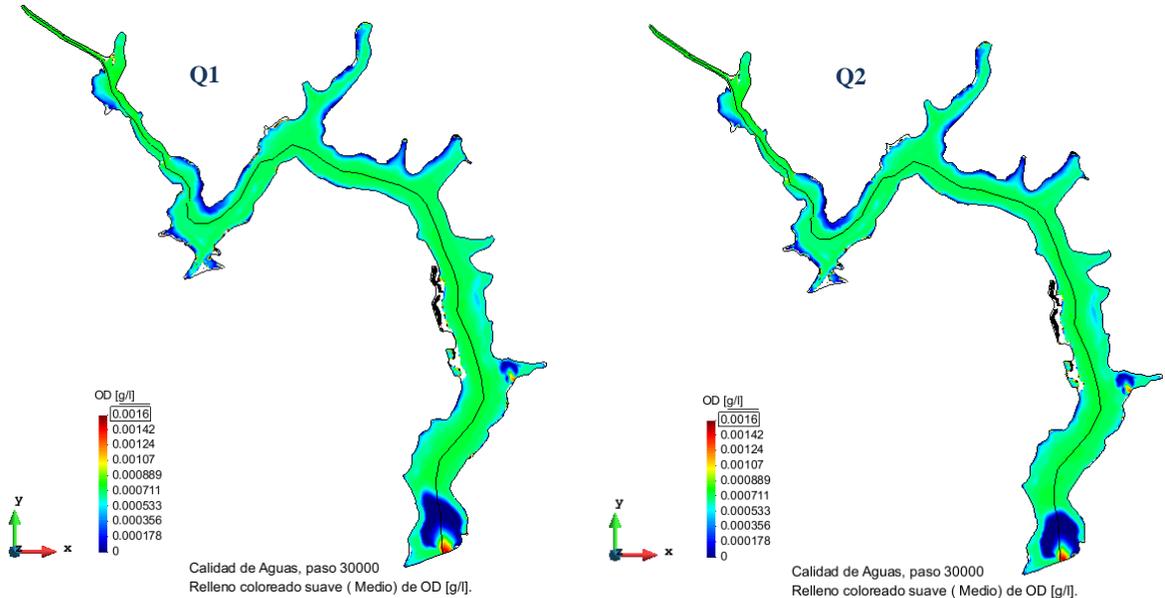
El exceso de crecimiento de plantas repercute directamente en la calidad del agua, por ejemplo, en condiciones antiestéticas, obstrucción del curso de agua, o indirectamente contribuyendo a otros problemas como en los niveles de oxígeno, toxicidad del amoníaco, etc. (Chapra, 1997).

**Figura 56.** Evolución temporal del OD en el Escenario 2 corte longitudinal del Humedal La Florida Sector 2 (Instante 30.000 seg.)



Fuente. Elaboración propia.

**Figura 57.** Evolución OD en el Escenario 2 humedal La Florida Sector 2 (Instante 30.000 seg.)



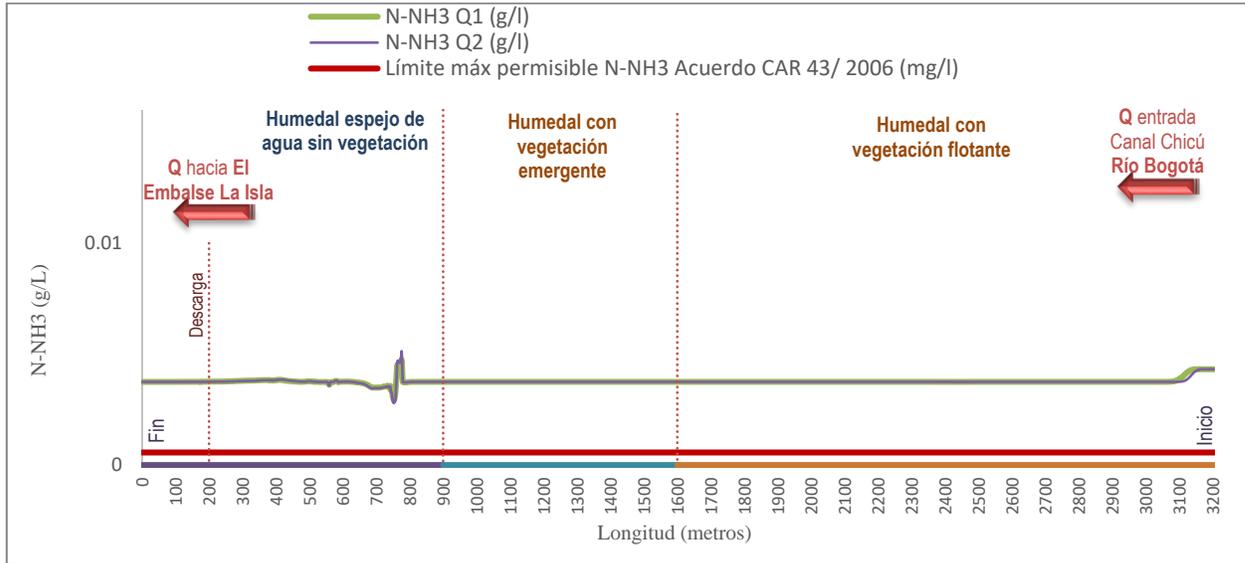
Fuente. Elaboración propia.

## Nitrógeno

Tal como se aprecia en la Figura 58 y Figura 59, la concentración del Nitrógeno Amoniacal ( $N-NH_3$ ) y nitratos ( $NO_3^-$ ), tiene un comportamiento muy similar al primer escenario en un tramo con una longitud de 2200 m aprox. caracterizado por vegetación flotante y emergente, que denota el grado de eutrofización en donde el nitrógeno actúa como un fertilizante que sobre estimula el crecimiento de plantas. En la longitud del tramo restante, tanto el Nitrógeno Amoniacal ( $N-NH_3$ ) como los Nitratos ( $NO_3^-$ ) presentan unos picos de ascenso y descenso, que como en los anteriores parámetros se asocian

a la influencia de las estructuras hidráulicas existentes, en los que el modelo calidad se afecta por los reflujos y remansos de agua.

**Figura 58.** Evolución Nitrógeno Amoniacal en el Escenario 2 corte longitudinal del Humedal La Florida Sector 2 (Instante 30.000 seg.)



Fuente. Elaboración propia.

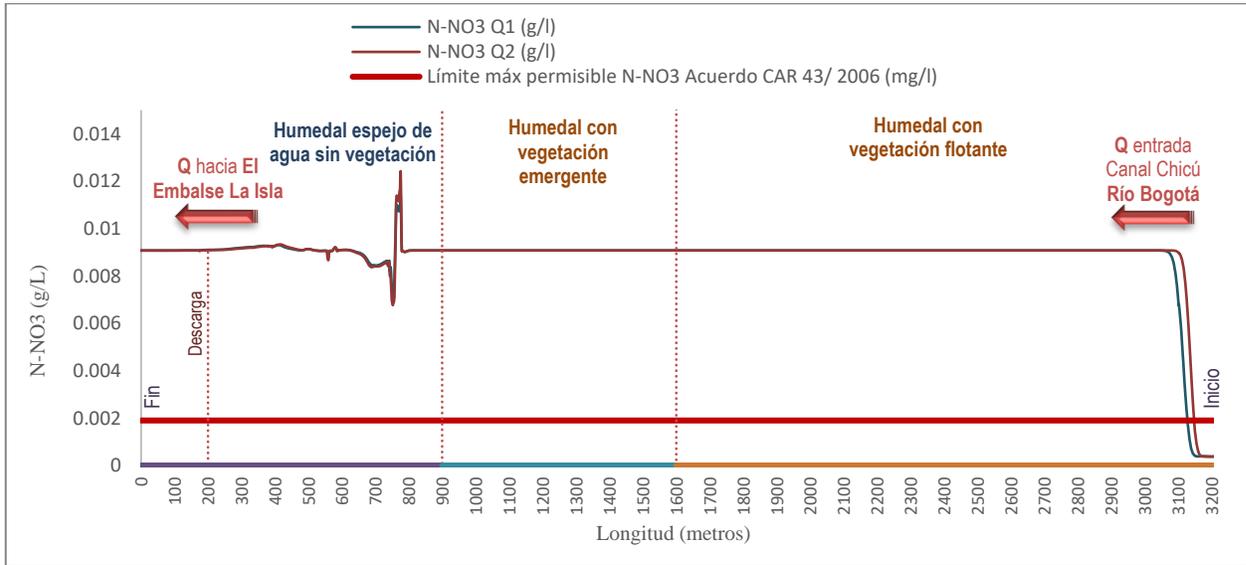
Debido a que el humedal La Florida sector 2 integra el Sistema Hidráulico de Manejo Ambiental y Control de Inundaciones (SHMACI), es inevitable el ingreso de agua desde el Río Bogotá que aporta al cuerpo lagunar una concentración importante de contaminantes; para el caso del Nitrógeno Amoniacal ( $N-NH_3$ ) la concentración inicial del Río Bogotá luego de su tránsito por el humedal es reducida en un 0.57 mg/L aproximadamente, equivalente a un porcentaje de eficiencia en remoción del 13.2%.

$$Eficiencia = \frac{[Afluente] - [Efluente]}{[Afluente]} = \frac{[0.00432 \text{ g/l}] - [0.00375 \text{ g/l}]}{[0.00432 \text{ g/l}]} * 100 = 13.2\%$$

En cuanto a los Nitratos ( $NO_3^-$ ), la concentración de entrada se incrementa en 8.70 mg/L ( $NO_3^-$  Entrada = 0.37 mg/L y  $NO_3^-$  Salida = 9.08 mg/L), como resultado de la prevalencia de la concentración inicial de nitratos en el humedal (9.07 mg/L), así como por procesos de nitrificación, en donde la mayor presencia de nitratos como nutrientes esenciales para la fotosíntesis fomenta el crecimiento excesivo de las plantas (Chapra, 1997). Entre la abscisa 900 y 3100 m se mantiene la misma concentración de nitratos en el agua, resultados que coinciden con el comportamiento de otras sustancias y que representan los procesos de degradación de materia orgánica y nitrificación en el humedal.

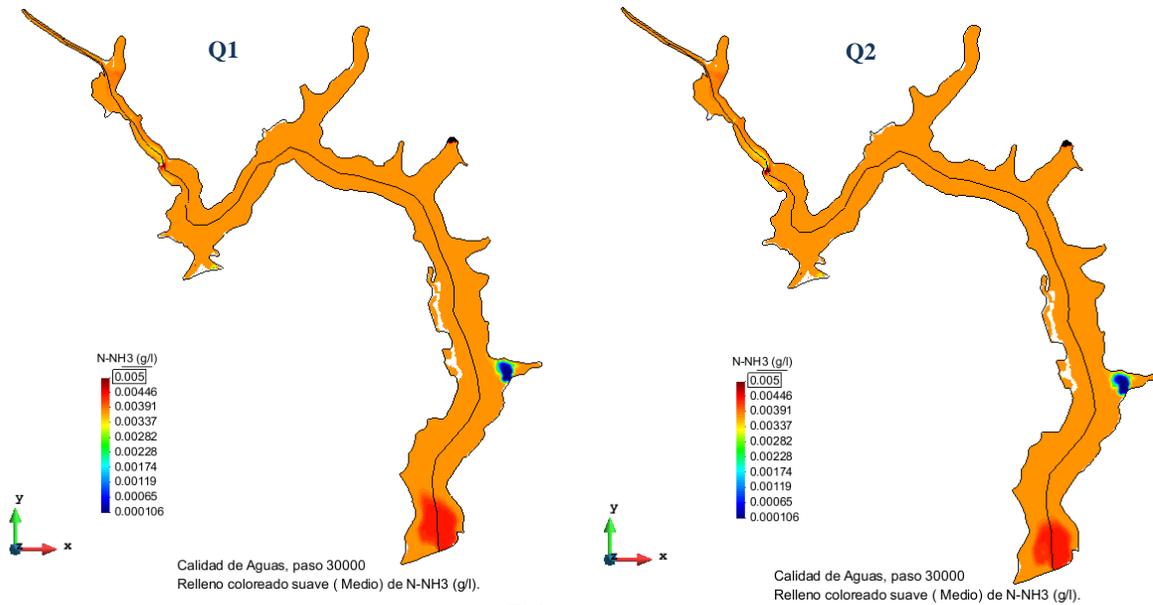
De acuerdo con lo expuesto, el cuerpo lagunar no cumple en Nitrógeno Amoniacal ( $N-NH_3$ ) y Nitratos ( $NO_3^-$ ), con el objetivo de calidad de agua de humedales ubicados dentro de la cuenca del río Bogotá, clasificado como Clase III con un horizonte proyectado al año 2020, según el Acuerdo CAR 43 de 2006.

**Figura 59.** Evolución Nitratos en el Escenario 2 corte longitudinal del Humedal La Florida Sector 2 (Instante 30.000 seg.)



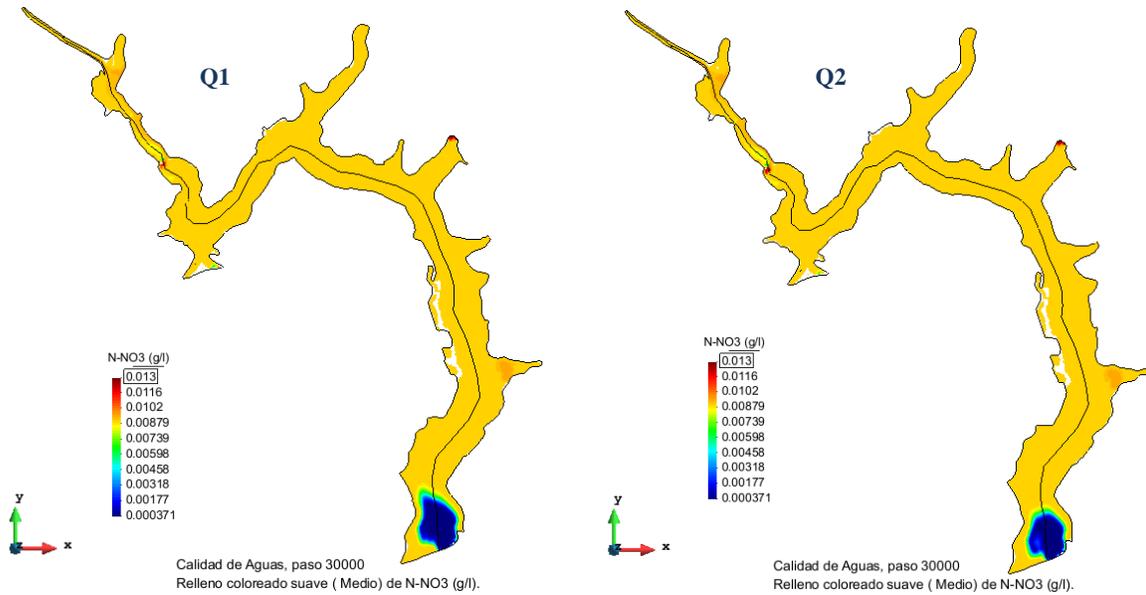
Fuente. Elaboración propia.

**Figura 60.** Evolución espacial Nitrógeno Amoniacal en el Escenario 2 Humedal La Florida Sector 2 (Instante 30.000 seg.)



Fuente. Elaboración propia.

**Figura 61.** Evolución espacial de Nitratos en el Escenario 2 Humedal La Florida Sector 2 (Instante 30.000 seg.)

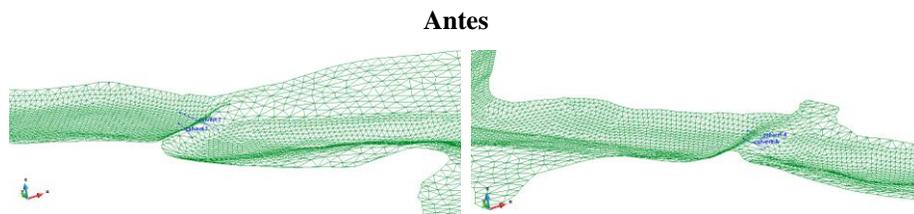


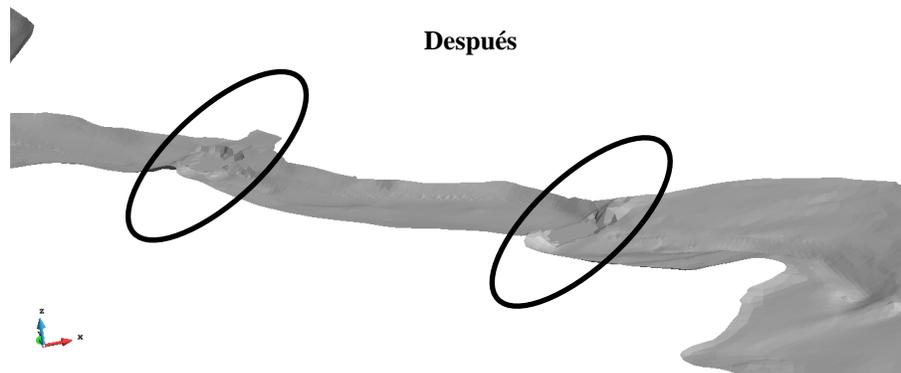
Fuente. Elaboración propia.

Adicionalmente, teniendo en cuenta el efecto identificado en los resultados de los modelos de calidad para las condiciones sin apertura de compuerta Qo y con apertura de compuertas para los caudales Q1 y Q2 con calado inicial de 2.9 m; concerniente a la existencia en las coordenadas E: 990907, N: 1016606 y E: 991013, N: 1016452 de dos pasos artesanales entre las fincas existentes, y que en el modelo se asocian a dos (2) alcantarillas por punto, se tomó la decisión de modificar el modelo digital de elevación, suprimiendo las alcantarillas instaladas, con el fin de confirmar que la perturbación al modelo de calidad obedece a dichas estructuras.

El modelo digital de elevación con el uso de IBER 2D, fue modificado manualmente con la edición de la elevación original, transformando la topografía real del humedal La Florida Sector 2 y adoptando en el cuerpo lagunar que el caudal fluye sin la obstrucción de estructuras hidráulicas, esta modificación se puede diferenciar a continuación:

**Figura 62.** Edición del modelo digital de elevación



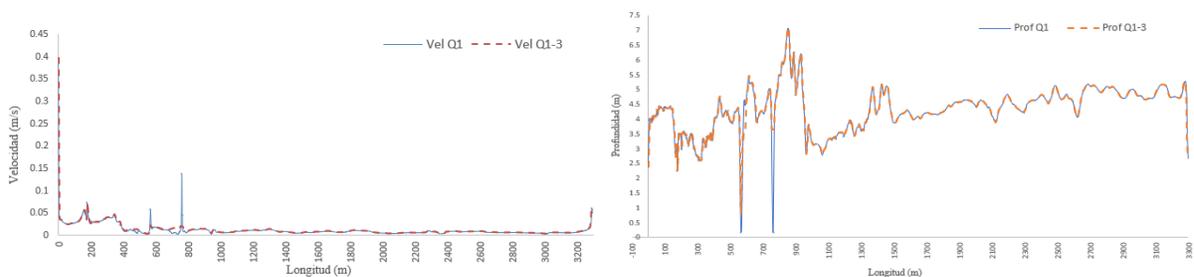


Fuente. Elaboración propia.

La comparación de los resultados en las modelaciones, permiten inferir que la alcantarilla ubicada en las coordenadas E: 990907, N: 1016606, genera un incremento igual a tres (3) veces la velocidad del Q1-3 sin la existencia de la estructura hidráulica, así mismo, con la alcantarilla ubicada en las coordenadas E: 991013, N: 1016452 el incremento en la velocidad es igual a siete (7) veces que sin la existencia de la estructura hidráulica.

Se evidencia que, ante la discontinuidad en la profundidad por causa de las alcantarillas instaladas, los resultados de calidad de agua entre las abscisas 200 a 800 m presentan concentraciones alteradas por las condiciones hidráulicas del tramo, específicamente por causa de las estructuras hidráulicas existentes.

**Figura 63.** Perfil de velocidad y profundidad en el Escenario 2 Q1, Q1-3 en el corte longitudinal en el humedal La Florida Sector 2 (Instante 30.000 seg.)

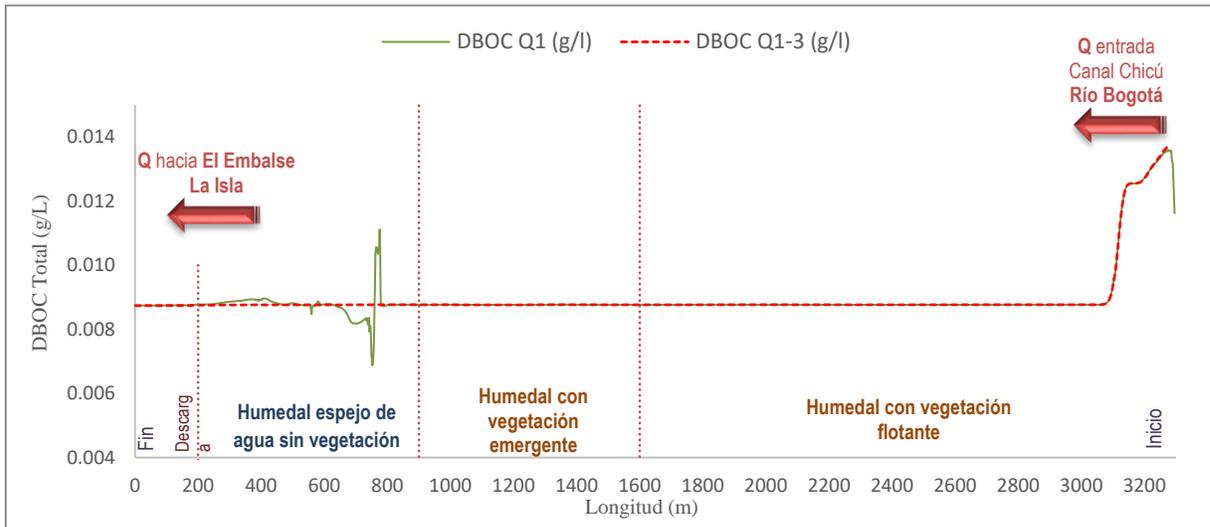


Fuente. Elaboración propia.

Las perturbaciones en las concentraciones de DBOC, OD y Nitrógeno antes mencionadas, no desmejoran la calidad del agua en la salida del humedal sector 2, es decir, en el punto de entrega del caudal hacia el embalse La Isla. Según se aprecia en la Figura 64, Figura 65 y Figura 66, las concentraciones de las sustancias entre la abscisa 0 y 100 m se estabilizan y se entregan superando las variaciones en los puntos indicados. Por lo anteriormente descrito, se encuentra que los resultados presentados a través de un corte longitudinal con el software IBER 2D, no son consistentes para cuando en las condiciones hidrodinámicas del modelo impliquen la instalación

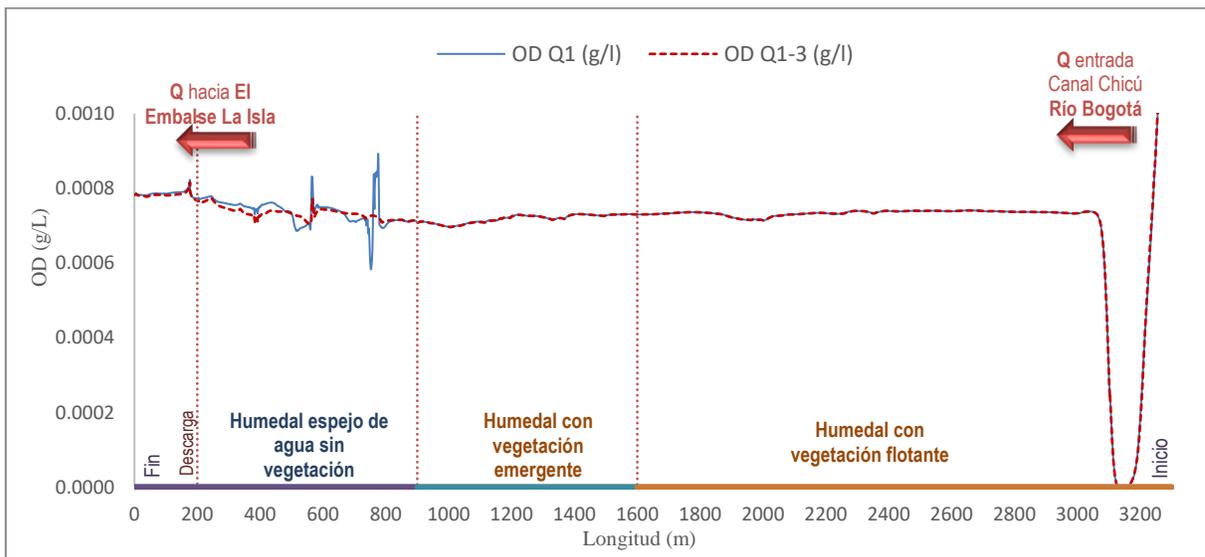
de alcantarillas o estructuras hidráulicas que propicien la formación de reflujos y remansos de agua.

**Figura 64.** Comparación de la evolución temporal de la DBOC en el Escenario 2 para Q1, Q1-3 editando el MDE (CInicial 2.9 m - Sin alcantarillas - Instante 30.000 seg.)



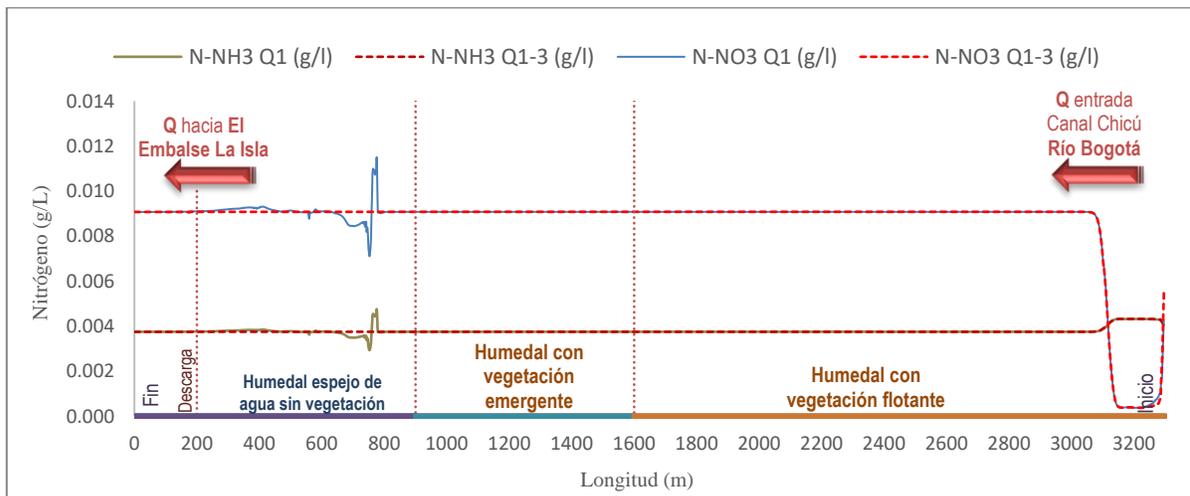
Fuente. Elaboración propia.

**Figura 65.** Comparación de la evolución temporal del OD en el Escenario 2 para Q1 y Q1-3 editando el MDE (CInicial 2.9 m - Sin alcantarillas - Instante 30.000 seg.)



Fuente. Elaboración propia.

**Figura 66.** Comparación de la evolución temporal del nitrógeno en el Escenario 2 para Q1 y Q1-3 editando el MDE (CInicial 2.9 m - Sin alcantarillas - Instante 30.000 seg.)



Fuente. Elaboración propia.

### 5.3 Escenario 3 Simulando una descarga de agua residual doméstica

Adoptando las condiciones hidrodinámicas del escenario 2 con apertura de compuertas para los caudales  $Q1 = 2.5 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $Q2 = 1.87 \text{ m}^3/\text{s}$ , fue incorporada una descarga de Agua Residual Doméstica (ARD), con características de parámetros dentro de los límites permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales definidos en el artículo 8 de la Resolución MADS No. 631 de 2015. La descarga se incluyó en las coordenadas E: 991935, N: 1016250 al interior del dominio, en la abscisa 2100 m, en donde el humedal en el instante 30000 segundos tiene una profundidad promedio de 4 m en dicho punto.

Teniendo en cuenta que la velocidad del agua influye en el proceso de autodepuración, no se adoptó como escenario de simulación el escenario 1, debido a que las velocidades son tan bajas que tienden a aguas estancadas, por tanto, hay menos oxígeno y menos autodepuración (Seoáñez, 1999).

#### DBOC Total

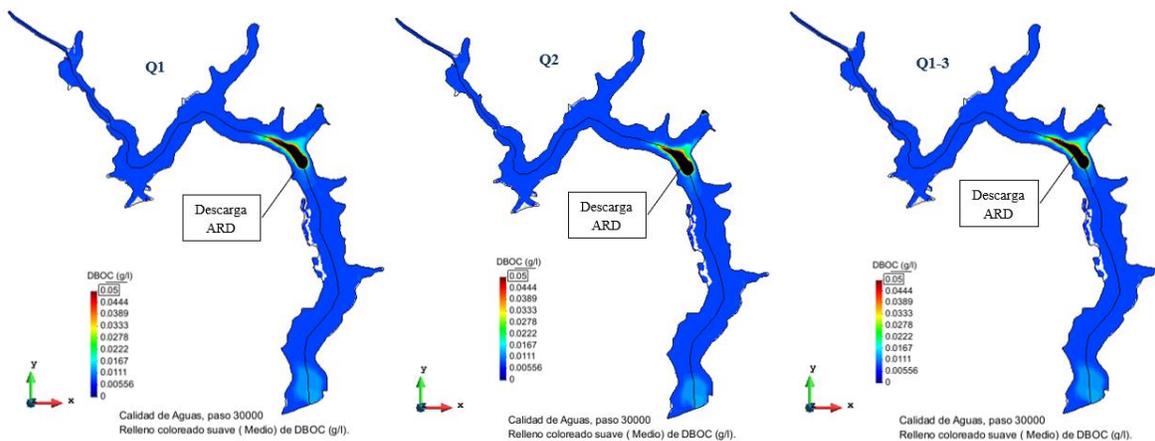
Bajo las condiciones de calidad del humedal La Florida sector 2, entre las que se resalta la influencia por el aporte de los contaminantes procedentes del Río Bogotá ante la apertura de la compuerta en el canal Chicú, el vertimiento de agua residual doméstica entre las abscisas 2100 m y 1850 m impacta negativamente el cuerpo de agua con el incremento de la materia orgánica en concentraciones de  $\text{DBO}_5$  hasta  $45.5 \text{ mg/L}$ ; en este tramo, el proceso de degradación de materia orgánica consume el oxígeno disuelto disponible y excede el objetivo de calidad mínimo asignado para la  $\text{DBO}_5$  en humedales ubicados dentro de la cuenca del río Bogotá, clasificado como Clase III con un horizonte proyectado al año 2020, según el Acuerdo CAR 43 de 2006.

De igual manera, se observa en un trayecto 350 m aprox. entre el punto de descarga y la abscisa 1850 m, que el vertimiento fue asimilado en el cuerpo lagunar, la materia orgánica es degradada hasta

alcanzar una concentración de 4.7 mg/L en DBO<sub>5</sub>, valor que se mantiene hasta la salida del humedal que, en comparación con el escenario de modelación 2, es decir, sin la incorporación de una descarga de ARD no evidencia el desmejoramiento de las condiciones iniciales del cuerpo lagunar en términos de la cantidad de materia orgánica ni frente al cumplimiento del objetivo de calidad dispuesto en el Acuerdo CAR 43 de 2006.

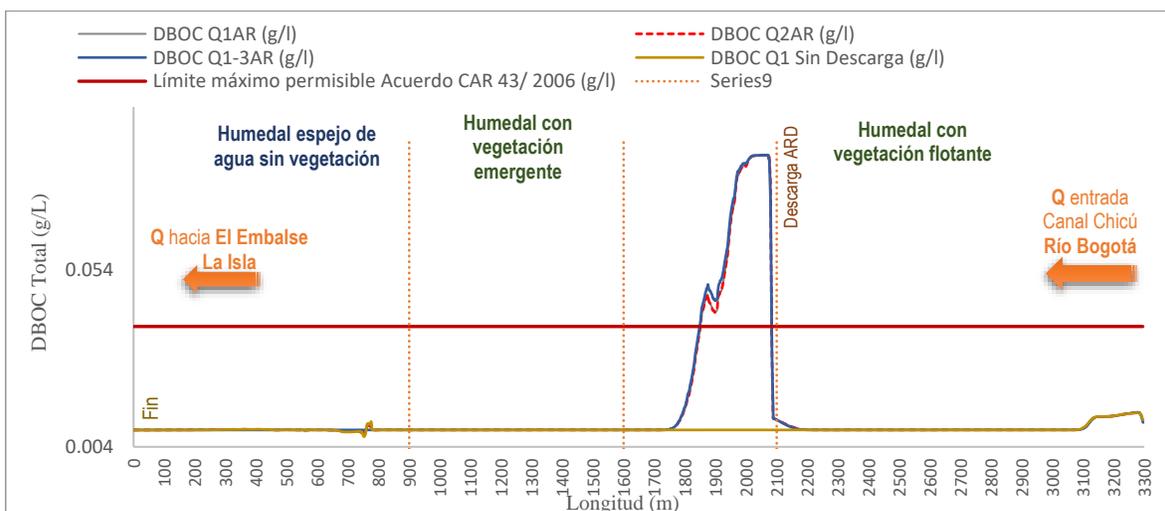
Con respecto a la evolución espacial de la DBOC por causa del vertimiento aportado en el escenario 2, para los caudales Q1 = 2.5 m<sup>3</sup>/s, Q2 = 1.87 m<sup>3</sup>/s (con alcantarillas) y Q1-3= 2.5 m<sup>3</sup>/s sin alcantarillas, como se muestra en la siguiente figura, no se observa una variación o influencia representativa.

**Figura 67.** Evolución espacial de DBOC Total en el Escenario 3 humedal La Florida Sector 2 (Instante 30.000 seg.)



Fuente. Elaboración propia.

**Figura 68.** Evolución de la DBOC Total Escenario 3 con una descarga de ARD en el corte longitudinal del Humedal La Florida Sector 2 (Instante 30.000 seg.)



Fuente. Elaboración propia.

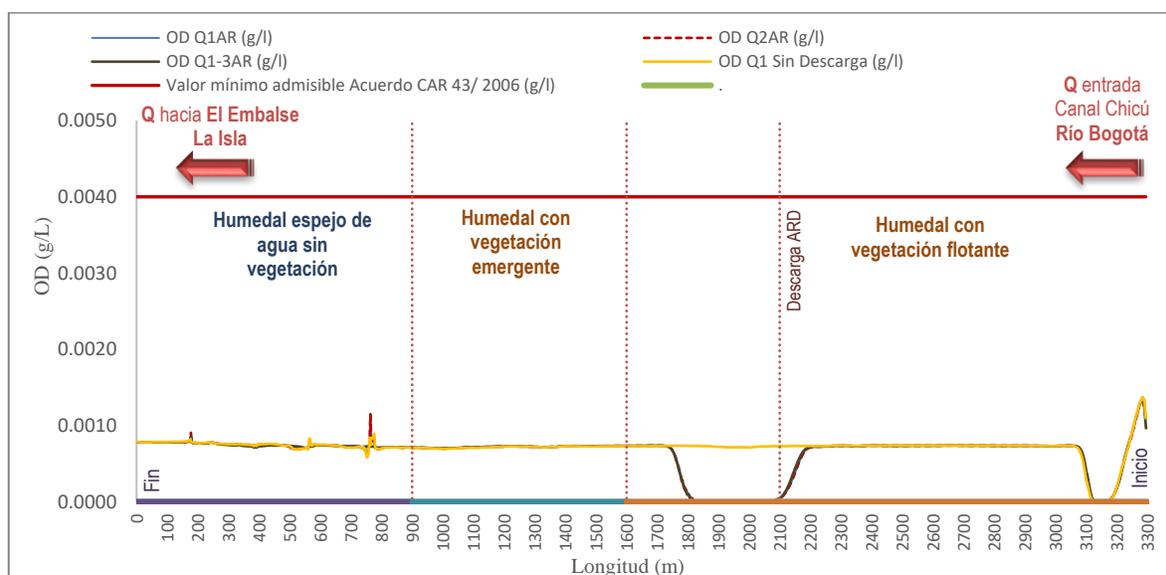
## Oxígeno disuelto

A medida que en la Figura 68 se incrementa la  $DBO_5$ , se observa en la Figura 69 un marcado descenso en el oxígeno disuelto desde la abscisa 2100 m hasta llegar a niveles de oxígeno disuelto iguales a cero mg/L, dicha condición anóxica se conserva en aproximadamente 250 m incluida la abscisa 1800 m ante procesos de degradación de materia orgánica, procesos de nitrificación y como producto de la mezcla con el agua del humedal que tiene como condición inicial una concentración baja de OD de 0.19 mg/L. Este descenso se relaciona directamente con la descarga de agua residual doméstica y demuestra el efecto de la descarga de agua residual.

Aguas abajo de la descarga, en el humedal se recupera progresivamente la concentración de oxígeno disuelto como consecuencia principalmente de la dilución en el caudal y extensión del cuerpo lagunar, alcanzando una concentración de  $7.3 \times 10^{-7}$  mg/L, correspondiente a la concentración promedio de oxígeno disuelto del escenario 2, es decir, que se asemejan a las condiciones previas a la descarga de agua residual.

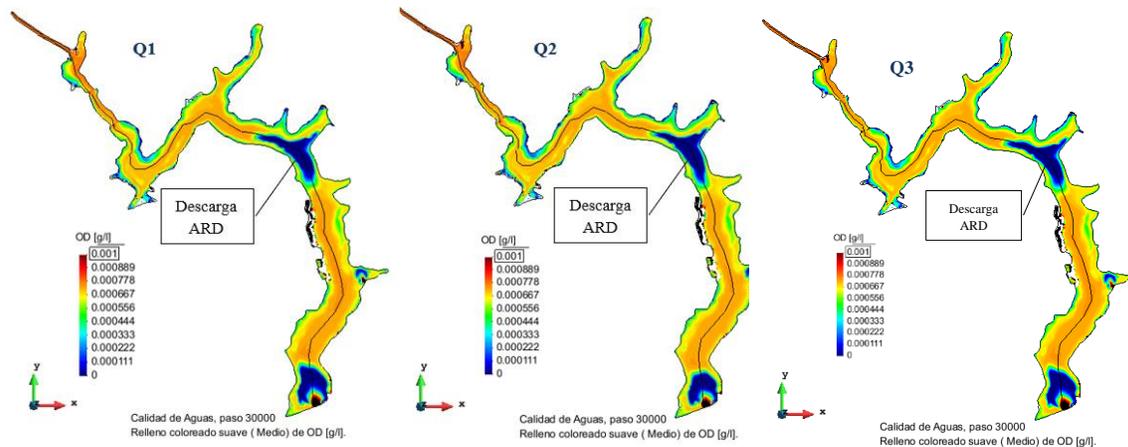
Los niveles de oxígeno disuelto en el humedal La Florida Sector 2, luego de la descarga de agua residual y dilución en el cuerpo lagunar, continúa siendo crítica y no muestra recuperación por causa de procesos de reaeración, variación de la topografía, cambios de dirección y velocidad del agua, incumpliendo en todo el tránsito del humedal (3290 m) el criterio de calidad de humedales ubicados dentro de la cuenca del río Bogotá, clasificado como Clase III con un horizonte proyectado al año 2020, según el Acuerdo CAR 43 de 2006.

**Figura 69.** Evolución del OD escenario 3 con una descarga de ARD en el corte longitudinal del Humedal La Florida Sector 2 (Instante 30.000 seg.)



Fuente. Elaboración propia.

**Figura 70.** Evolución espacial del OD en el Escenario 3 humedal La Florida Sector 2 (Instante 30.000 seg.)



Fuente. Elaboración propia.

## Nitrógeno

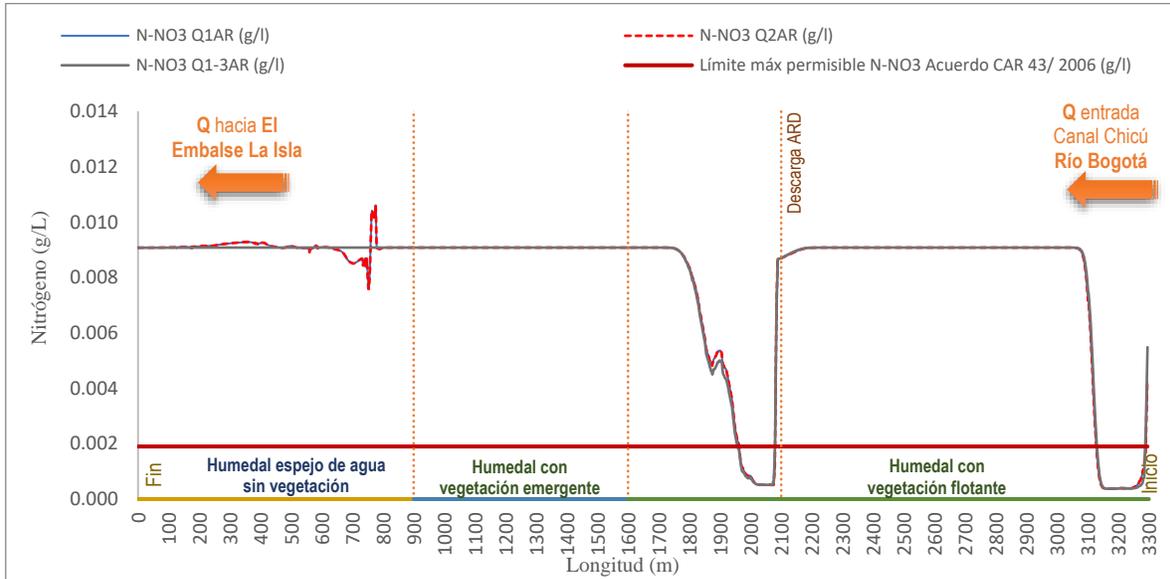
En el caso de los nitratos, la concentración aportada en el vertimiento por el efluente de ARD tratado de 0.513 mg/L, es inferior al nivel de nitratos del humedal La Florida Sector 2 que se mantiene en un promedio de 9.07 mg/L, en este sentido, se observa luego de la descarga puntual el descenso de los nitratos hasta llegar a una concentración de 0.517 mg/L. Posteriormente, en un tramo de 300 m aproximadamente entre las abscisas 1800 m y 2100 m, los nitratos ascienden y alcanzan nuevamente el nivel inicial, sin que este vuelva a recuperarse a lo largo del dominio, por oxidación bacteriana de materia orgánica y nitrificación.

Teniendo en cuenta la dependencia que existe entre la tasa de eliminación de nitratos con la disminución de la temperatura (Leverenz, Haunschild, Hopes, Tchobanoglous, & Darby, 2010), entre las abscisas 1800 m y 2100 m, los resultados son consistentes con la condición inicial de temperatura del agua en el humedal, es decir, que ante la falta de información que relacione la variación de la temperatura en el dominio, tampoco se encuentra variación en la actividad bacteriana en el proceso de nitrificación.

La producción de nitratos aguas abajo del punto de descarga de agua residual doméstica, concuerda con el agotamiento del oxígeno disuelto (condiciones anóxicas), que desde la abscisa 1800 m mantiene una concentración de 9.07 mg/L aproximadamente, demostrando niveles de eutrofización en el cuerpo lagunar y el incumplimiento al objetivo de calidad de agua de humedales ubicados dentro de la cuenca del río Bogotá, clasificado como Clase III con un horizonte proyectado al año 2020, según el Acuerdo CAR 43 de 2006. (Ver 0)

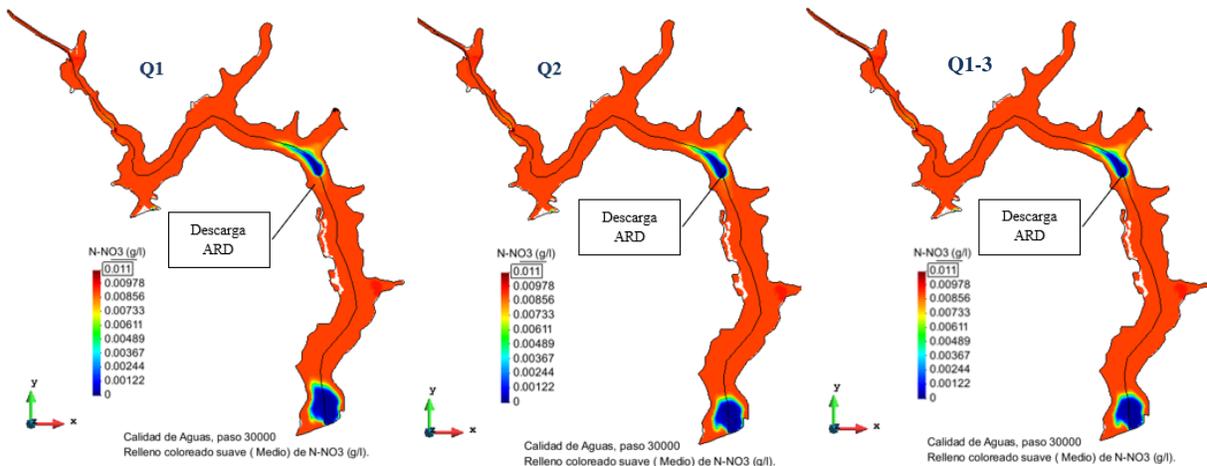
Con respecto a la evolución espacial de los Nitratos por el vertimiento aportado en el escenario 2, para los caudales  $Q1 = 2.5 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q2 = 1.87 \text{ m}^3/\text{s}$  (con alcantarillas) y  $Q1 = 2.5 \text{ m}^3/\text{s}$  sin alcantarillas, como se muestra en la Figura 72, no se observa una variación o influencia representativa.

**Figura 71.** Evolución Nitratos en el Escenario 3 corte longitudinal del Humedal La Florida Sector 2 (Instante 30.000 seg.)



Fuente. Elaboración propia.

**Figura 72.** Evolución espacial Nitratos en el Escenario 3 humedal La Florida Sector 2 (Instante 30.000 seg.)

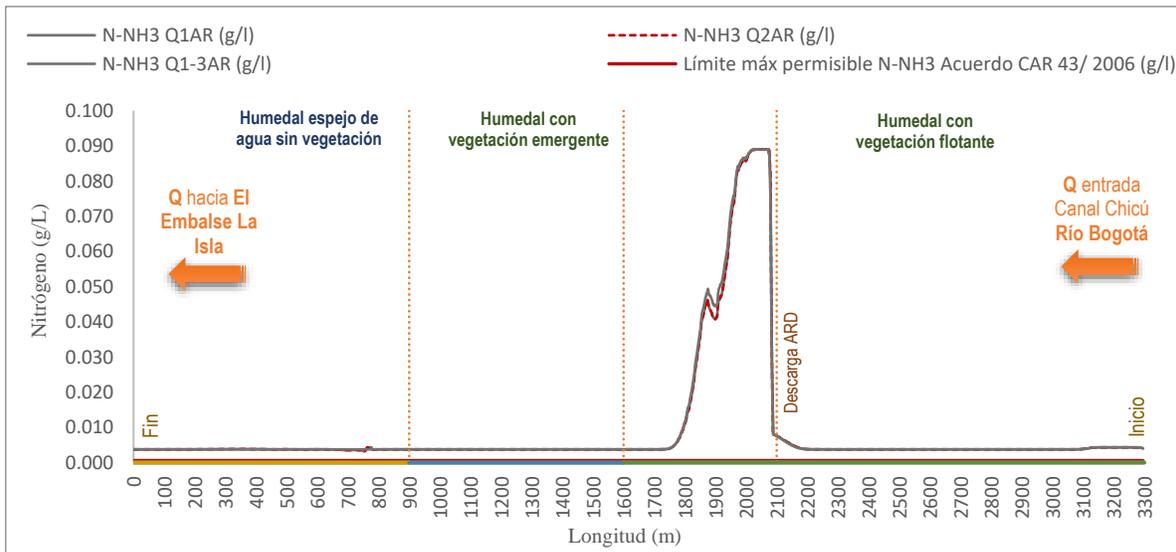


Fuente. Elaboración propia.

Las condiciones anóxicas entre las abscisas 1800 m y 2100 m, manifiestan la alta presencia de nitrógeno amoniacal que alcanza el cuerpo lagunar luego de la descarga de agua residual doméstica simulada con concentraciones de 88.9 mg/L, el cual se produce por la desaminación de compuestos que contienen nitrógeno, por la hidrólisis de la urea y también por la reducción de los nitratos en condiciones anaerobias (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010). De igual manera, en el

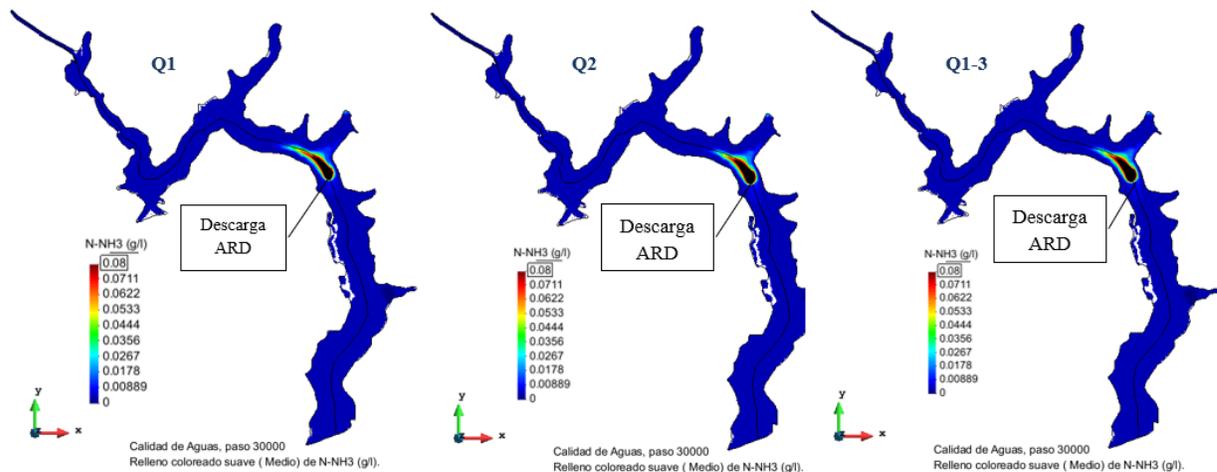
tramo inicial entre las abscisas 3290 m y 3270 m aproximadamente, el nivel del nitrógeno amoniacal es superior a la concentración de los Nitratos, característica que representa la reciente polución a la que es sometido el cuerpo lagunar por el ingreso de agua procedente del Río Bogotá ante la apertura de la compuerta en el canal Chicú. Aguas abajo de las descargas, especialmente entre las abscisas 1800 y 0 m (salida hacia el embalse La Isla), la cantidad de nitratos es mayor al nitrógeno amoniacal, signo que evidencia que el nitrógeno gradualmente se está oxidando para formar nitratos.

**Figura 73.** Evolución espacial Nitrógeno Amoniacal en el Escenario 3 Humedal La Florida Sector 2 (Instante 30.000 seg.)



Fuente. Elaboración propia.

**Figura 74.** Evolución espacial Nitrógeno Amoniacal en el Escenario 3 humedal La Florida Sector 2 (Instante 30.000 seg.)



Fuente. Elaboración propia.

## 6. Conclusiones y recomendaciones

La discretización de la malla en el humedal La Florida Sector 2, de forma no estructurada con elementos de 3 y 4 lados, permitió acoplarse adecuadamente a la geometría e irregularidad de este cuerpo Lagunar. Así mismo, el uso de una malla mixta en el modelo con elementos de 2 y 5 metros de longitud permitió aproximarse a las condiciones topográficas reales del humedal, representadas de igual manera en el modelo digital de elevación.

El refinamiento de la malla en el dominio de estudio repercute en una mayor precisión en los resultados debido a que el esquema numérico es menos difusivo, sin embargo, el costo computacional se eleva, identificando este componente como una limitación para el uso de IBER 2D en el modelamiento hidráulico y de calidad en cuerpos hídricos con geometrías complejas, como es el caso de humedales que como se expone en el presente trabajo requirió un tiempo de simulación por cada escenario de mínimo 72 horas.

Para el paso de tiempo analizado (30000 seg) y a través de la visualización de los vectores de dirección de la velocidad entorno a las estructuras hidráulicas instaladas (alcantarillas), se demuestra la formación de reflujos y remansos de agua, que tal como se evidencia en los resultados afectan de forma directa el modelo de calidad. En cambio, la asignación de los coeficientes de rugosidad en las 70 superficies del dominio de estudio, conforme a las diferentes coberturas existentes en el humedal, no demostró una influencia significativa en la evolución de la concentración de los contaminantes.

A la característica del modelo hidrodinámico de IBER, relativo a admitir zonas con presencia de remansos o zonas de reflujos en algunos sitios, que implicaría aumentos en las láminas de agua (Sierra, 2015), se suma la influencia de estas zonas en los resultados del modelo de calidad, que reflejan un comportamiento similar a una descarga de agua residual debido a que elevan los niveles de contaminación de todas las sustancias analizadas (DBOC, N-NH<sub>3</sub>, N-NO<sub>3</sub>), así mismo, ocasiona un ascenso y descenso abrupto en el Oxígeno Disuelto en algunos tramos. En consecuencia, estas características del modelo IBER 2D, se identifican como restricciones para cuando el análisis de resultados implica realizar cortes longitudinales, debido a que los datos no demuestran consistencia en algunas secciones tanto en las condiciones hidráulicas como de calidad (escenario 1 principalmente).

Teniendo en cuenta que las sustancias modeladas por IBER 2D, se resuelven mediante ecuaciones de transporte por convección-difusión, los cambios en las componentes de velocidad del flujo, así como la discontinuidad en el calado, influyen directamente en la evolución de la concentración de los contaminantes, aspectos evidenciados cuando en el modelo hidrodinámico se introducen estructuras hidráulicas, tal como ocurrió en el presente trabajo con las alcantarillas instaladas en el sector occidental del humedal La Florida sector 2. Para estos casos, las variaciones en las concentraciones de los contaminantes obedecen directamente a la influencia de las estructuras hidráulicas que han modificado las condiciones hidráulicas del flujo y, por tanto, es necesario tener especial cuidado para diferenciar estos resultados con efectivas descargas de aguas residuales (escenarios 2 y 3).

Realizando un balance entre las entradas y salidas (input-output) de las sustancias evaluadas bajo las condiciones hidrodinámicas del escenario 2 en el humedal La Florida sector 2 (Q1 = 2.5 m<sup>3</sup>/s, Q2 = 1.87 m<sup>3</sup>/s, con Calado 2.9m + Alcantarillas), es decir, para cuando se consideran los caudales de ingreso del Río Bogotá por la compuerta del canal Chicú, se obtienen resultados positivos por la eficiencia en remoción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno Carbonosa (DBOC total) y Nitrógeno Amoniacal (N-NH<sub>3</sub>), con valores de 38% y 13% aprox. respectivamente.

**Cuadro 45.** Eficiencias en remoción sustancias simuladas en el escenario 2

Sustancia	Q1 Escenario 2		Eficiencia en remoción (%)	Q2 Escenario 2		Eficiencia en remoción (%)
	Afluyente (mg/L)	Efluyente (mg/L)		Afluyente (mg/L)	Efluyente (mg/L)	
DBOC total	14.02	8.742	38%	14.02	8.743	38%
N-NH <sub>3</sub>	4.32	3.750	13%	4.32	3.750	13%

Fuente. Elaboración propia.

El mejor ajuste alcanzado del modelo con respecto a los valores reales medidos en campo en el punto 4 del Humedal La Florida Sector 2 (salida hacia el embalse La Isla), lo constituye la concentración de la DBOC total (6% de diferencia entre los valores reales y simulados). En contraste, el modelo no obtuvo un buen ajuste de las concentraciones de OD, N-NH<sub>3</sub> y N-NO<sub>3</sub>, habida cuenta que, según los resultados de las pruebas de ensayo y error realizadas, se evidencia que, con todos los coeficientes cinéticos empleados las diferencias entre las concentraciones reales y simuladas fueron superiores al 55%. Por lo tanto, los resultados de las simulaciones para determinar el comportamiento de las concentraciones de OD, N-NH<sub>3</sub> y N-NO<sub>3</sub>, no son confiables y presentan un grado de incertidumbre importante.

En este sentido, una vez verificados los datos de entrada y las constantes alimentadas en el módulo de calidad de IBER, se encuentra que la falta ajuste en las concentraciones reales y simuladas de OD, N-NH<sub>3</sub> y N-NO<sub>3</sub>, obedece a una deficiencia en los datos de calidad empleados, principalmente en razón a que los muestreos de calidad fueron tomados en condiciones de aguas quietas o estancadas, no se realizó el seguimiento a la masa de agua y algunos resultados de las muestras como la relación de nitrógeno amoniacal y nitratos en los puntos 1 y 2, no son consistentes, con la relación de estas sustancias para las muestras 3 y 4.

De acuerdo con, la simulación del escenario 3 en el humedal La Florida sector 2, correspondiente a una descarga de Agua Residual Doméstica (ARD) con características de calidad dentro de los límites permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales definidos en el artículo 8 de la Resolución MADS No. 631 de 2015; se puede establecer que el efluente tratado fue asimilado por el humedal en un tramo aproximado de 350 m, punto a partir del cual el cuerpo de agua retorna a las condiciones previas a la descarga, manteniendo hasta el punto de salida concentraciones

constantes (abscisas 1850 m a 0 m), sin que se desmejore en la salida, en ninguna medida la calidad de agua del cuerpo lagunar.

La literatura demuestra la capacidad de remoción de contaminantes en humedales naturales, en el caso del humedal La Florida sector 2, de conformidad con los resultados obtenidos, este servicio ambiental es prestado principalmente para la depuración de algunos contaminantes aportados con el agua que ingresa desde el Río Bogotá por la compuerta ubicada en el canal Chicú, como es el caso de la Demanda Bioquímica de Oxígeno Carbonosa. Sin embargo, las condiciones iniciales de calidad, como por ejemplo los bajos niveles de oxígeno disuelto y la restricción a la que se encuentra sometido este cuerpo lagunar por la operación del Sistema Hidráulico de Manejo Ambiental y Control de Inundaciones (SHMACI), puede limitar esta función.

Los bajos niveles de Oxígeno Disuelto (OD) en las simulaciones realizadas en los escenarios 1 a 3, reflejan la necesidad del saneamiento del agua aportada desde el Río Bogotá a la altura del canal Chicú, como principal afluente del humedal La Florida sector 2, sin embargo, teniendo en cuenta que para las condiciones actuales no es posible dejar de operar el Sistema Hidráulico de Manejo Ambiental y Control de Inundaciones (SHMACI), se podría plantear la implementación de estructuras que favorezcan la reaireación, así como, la inyección de oxígeno puro o aire a través de aireadores superficiales o por medio de difusores de inyección.

De acuerdo con los resultados obtenidos, es importante indicar que es posible admitir vertimientos en el humedal La Florida sector 2 para las condiciones planteadas en el escenario 2, es decir, con la apertura de la compuerta en el canal Chicú (ingreso de agua del Río Bogotá) y operación simultánea de la estación de bombeo hacia el embalse La Isla, circunstancias que garantizan caudales de entrada y salida permanentes. Como aspecto a resaltar, se encuentra que este humedal durante la mayor parte del año permanece con un movimiento del agua casi nulo, comportándose como aguas estancadas, situación que incide en una menor presencia de oxígeno y menor autodepuración, por lo tanto, el escenario 1 que representa este comportamiento no se considera apto para el manejo de aguas residuales.

Ahora bien, siempre y cuando se traten de efluentes tratados, especialmente de aguas residuales domésticas (ARD), para optimizar el control y evitar impactos con otro tipo de sustancias y descargas al ecosistema, se considera viable admitir en el humedal La Florida sector 2, descargas de efluentes con tratamientos secundarios y terciarios debido a que pueden contribuir y mejorar la calidad de agua de este cuerpo lagunar, todo en el marco del cumplimiento de los objetivos de calidad mínimos asignado a humedales ubicados dentro de la cuenca del río Bogotá con Clase III, según el Acuerdo CAR 43 de 2006 y de los Planes de Manejo Ambiental de los mismos. Por lo anteriormente descrito, el uso de humedales en el manejo de aguas residuales puede contemplarse como una opción para el humedal en comento y abre la puerta, para que se adelanten otros estudios en los humedales existentes, que cuenten con flujos de agua de entrada y salida continuos.

El humedal La Florida sector 2 presenta altos niveles de fósforo y nitrógeno total, que aceleran el proceso de eutrofización en el mismo (Baracaldo, 2017), por lo tanto, con el fin de que el servicio ambiental de depuración de agua tenga resultados óptimos, es necesario en este humedal implementar técnicas o métodos para la restauración, teniendo presente que según se demuestra en los resultados del escenario 1, la autopurificación natural y la dilución con aguas no contaminadas (agua escorrentía), es mínima.

IBER 2D es una herramienta útil para la modelación hidráulica y evaluar la evolución espacio-temporal de algunas sustancias contaminantes en humedales naturales que no se encuentren estratificados, contiene una plataforma amigable para los usuarios y una ventaja importante frente a otros modelos por tratarse de un software libre, sin embargo, como limitantes para su uso se encuentran: la demanda computacional de las modelaciones, la no inclusión de algunas sustancias y variables en el actual módulo de calidad, como es el caso del fósforo; así como, la admisión de zonas con presencia de remansos o zonas de reflujos, este último aspecto debido a que incide directamente en los resultados de los modelos hidráulicos y de calidad.

Entre las funciones relacionadas con la función depuradora de humedales, se encuentra la retención de sedimentos y sustancias tóxicas que se adhieren al sedimento suspendido, por lo tanto, con el fin de establecer dicho grado de asimilación en el humedal La Florida, durante la operación del Sistema Hidráulico de Manejo Ambiental y Control de Inundaciones (SHMACI), es necesario monitorear a la entrada y salida del humedal parámetros como: sólidos totales, en suspensión, disueltos, así como, metales y metaloides.

El presente trabajo evaluó la capacidad del modelo IBER 2D para la modelación hidráulica y de calidad de humedales naturales, evidenciando fortalezas y limitaciones de dicho software para las condiciones analizadas. Sin embargo, por causa de la deficiente información de calidad existente en este tipo de cuerpos de agua, se recomienda establecer puntos de control y monitoreo en el humedal La Florida Sector 2, en cada uno de los afluentes y efluentes en coordinación con la operación del Sistema Hidráulico de Manejo Ambiental y Control de Inundaciones (SHMACI), a fin de contar con información válida para calibrar el modelo y ajustarlo al comportamiento de este cuerpo lagunar.

## Bibliografía

Acueducto de Bogotá, & Conservación Internacional - Colombia (Eds.). (2003). Los Humedales de Bogotá y La Sabana. Bogotá, D.C: Acueducto de Bogotá.

Alcaldía Mayor de Bogotá. (2005). Política de Humedales del Distrito Capital. Bogotá: Alcaldía Mayor de Bogotá D.C.

Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. Acuerdo 226 de 2011. Mediante el cual se declara El Sector Campo Verde, comprendido por Campo Verde, Potrerito y La Isla como Parque Ecológico Distrital de Humedal (2011).

Alley, W. (1984). On the Treatment of Evapotranspiration, Soil Moisture Accounting, and Aquifer Recharge in Monthly Water Balance Models. *Water Resources Research*, 20(8), 1137-1149.

Arcement, G., & Schneider, V. (1989). Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains. Denver: United States Government. Recuperado a partir de <http://dpw.lacounty.gov/lacfd/wdr/files/WG/041615/Guide%20for%20Selecting%20n-Value.pdf>

Baracaldo, A. (2017). Estudio de la calidad trófica de la ciénaga La Florida (Tesis de Maestría). Escuela Colombiana de Ingeniería, Bogotá.

Beltrán Vargas, J. E. (2012, octubre 8). Repositorio institucional UN (phd). Universidad Nacional de Colombia. Recuperado a partir de <http://www.bdigital.unal.edu.co/8092/>

Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., ... Coll, A. (2014). Iber: Herramienta de Simulación Numérica del Flujo en Ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 30(1), 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004>

Bowie, G., Mills, W., Porcella, D., Campbell, C., & Chamberlin, C. (1985). Rates, Constants, and Kinetics Formulations in Surface Water Quality Modeling (Second Edition). U.S. Environmental Protection Agency.

Bravo, M. C. (2012). Disponibilidad de Pago por Bienes y Servicios Ecosistémicos de Los Humedales Córdoba y La Conejera en Bogotá (Tesis de Especialización). Escuela Colombiana de Ingeniería, Bogotá.

Camargo, C. (2016, enero 25). Modelación Hidrológica Distribuida Basada en Esquemas de Volúmenes Finitos (Ph.D. Thesis). Universitat Politècnica de Catalunya. Recuperado a partir de <http://www.tdx.cat/handle/10803/398144>

CAR. (2006a). Acuerdo 46 del 2006. Por el cual se Declara Reserva Hídrica el Humedal La Florida, se Establece su Franja de Protección y se Adoptan otras Determinaciones. CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA.

CAR, E. L. (2006b). Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del Río Bogotá (POMCA Río Bogotá). Bogotá: Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR - Consorcio Planeación Ecológica Ltda – Ecoforest Ltda. Contrato N° 721 del 2005.

CAR, & EPAM S.A. E.S.P. (2016). Realizar los diseños detallados para la reconfiguración hidrogeomorfológica de los humedales La Florida, Gualí, Tres Esquinas y Lagunas del Funzhé, Laguna De La Herrera, Tierra Blanca y Neuta; determinar las capacidades de asimilación de nutrientes y contaminantes, y proponer las acciones a realizar para la rehabilitación y recuperación de sus hábitats. Bogotá: CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA Contrato No. 1390 de 2014.

CAR, & Universidad Militar Nueva Granada. (2008). Elaborar el plan de manejo ambiental del Distrito de Manejo Integrado Cerro Juaica, reserva Hidrica Humedal La Florida, Reserva Hidrica Humedal El Juncal y actualización del plan de manejo ambiental de la reserva forestal protectora el robledal. Bogotá: CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA Convenio No. 1069 de 2008 con la Universidad Militar Nueva Granada.

Cárdenas, J. A. (2005). Calidad de aguas para estudiantes de ciencias ambientales. Recuperado 20 de septiembre de 2017, a partir de <https://www.amazon.com/Calidad-aguas-estudiantes-ciencias-ambientales/dp/9588247306>

Castaño, C. (2002). Colombia Alto Andina y la Significancia Ambiental del Bioma Páramo en el Contexto de los Andes Tropicales: una Aproximación a los Efectos de un Tensor Adicional por el Cambio Climático Global (Global Climatic Tensor). En C. Castaño (Ed.), Páramos y Ecosistemas Alto Andinos de Colombia en Condición Hotspot & Global Climatic Tensor (pp. 27-51). Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

Castillo, Carrillo, & Alvarez. (2015). Complementary Methods for Determining the Sedimentation and Flushing in a Reservoir. Recuperado 11 de febrero de 2017, a partir de <http://asce.escholarship.metaproy.org/doi/pdf/10.1061/%28ASCE%29HY.1943-7900.0001050>

Cea, Bermúdez, Puertas, Conde, Bladé, Corestein, & Escolano. (2016). IberWQ – Herramienta Numérica para la Simulación 2D de la Calidad de Aguas en Ríos y Estuarios. Módulo de Calidad de Aguas. Recuperado 11 de febrero de 2017, a partir de [https://www.udc.es/citeec/images/proyectos/hidraulica/proyectos\\_hidraulica11.pdf](https://www.udc.es/citeec/images/proyectos/hidraulica/proyectos_hidraulica11.pdf)

Chapra, S. (1997). Surface Water Quality Modeling. New York: McGraw-Hill Companies, Inc.

Chow, V. T. (1959). Open Channel Hydraulics. New York: McGraw-Hill.

Consortio Cuencas, & CAR. (2006). Modelación de la Calidad de las Corrientes Hídricas Cuencas de Segundo Orden de la Jurisdicción CAR. CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA Contrato No. 279 de 2016.

Convención Ramsar sobre Humedales. (1971). The Convention on Wetlands text, as originally adopted in 1971. Recuperado 15 de abril de 2013, a partir de [http://www.ramsar.org/cda/es/ramsar-documents-texts-convention-on-20708/main/ramsar/1-31-38%5E20708\\_4000\\_2\\_\\_](http://www.ramsar.org/cda/es/ramsar-documents-texts-convention-on-20708/main/ramsar/1-31-38%5E20708_4000_2__)

Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (Ed.). (1989). Ampliación Distrito de Riego La Ramada: Canal Chicú. Bogotá: CAR.

Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Bogotá, Ubaté y Suárez (Ed.). (1989). Proyecto de ampliación del distrito de riego y drenaje de La Ramada: Canal Chicú. Bogotá, D.C: CAR.

Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., ... van den Belt, M. (1997). The Value of the World's Ecosystem Services and Natural Capital. *Nature*, 387(6630), 253-260. <https://doi.org/10.1038/387253a0>

Davis, L. (1994). *A Handbook of Constructed Wetlands: A Guide to Creating Wetlands for Agricultural Wastewater, Domestic Wastewater, Coal Mine Drainage, Stormwater in the Mid-Atlantic Region (Vol. 1)*. Washington: U.S. Government Printing Office.

Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, F., & Andrade, M. (2010). *Depuración de Aguas Residuales por medio de Humedales Artificiales*. Bolivia: Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua (Centro AGUA). Recuperado a partir de <https://www.aguasresiduales.info/revista/libros/depuracion-de-aguas-residuales-por-medio-de-humedales-artificiales>

Diaz M, B. E. (2004). *Modelación de la Calidad del Agua en el Interceptor Río Bogotá en los Tramos Fucha - Tunjuelo - Canoas - Observatorio Ambiental de Bogotá (Tesis de Maestría)*. Universidad de los Andes, Bogotá. Recuperado a partir de <http://oab2.ambientebogota.gov.co/es/documentacion-e-investigaciones/resultado-busqueda/modelacion-de-la-calidad-del-agua-en-el-interceptor-rio-bogota-en-los-tramos-fucha-tunjuelo-canoas>

Dugan, P. J. (1992). *Conservación de humedales: un análisis de temas de actualidad y acciones necesarias*. Recuperado 19 de abril de 2017, a partir de <https://portals.iucn.org/library/node/8961>

Fair, G. M., & Geyer, J. C. (2001). *Purificación de Aguas y Tratamiento y Remoción de Aguas Residuales. (Vol. II)*. Mexico: Limusa. Recuperado a partir de <https://www.scribd.com/document/238705081/Fair-Geyer-Okun-Cap1-5-8>

Fisher, K., & Dawson, H. (2003). Roughness Review (Vol. W5A-057). London: Environment Agency DEFRA. Recuperado a partir de [http://www.river-conveyance.net/ces/documents/RoughnessReviewFinal\\_July07.pdf](http://www.river-conveyance.net/ces/documents/RoughnessReviewFinal_July07.pdf)

Galema, A. (2009). Vegetation Resistance Evaluation of Vegetation Resistance Descriptors for Flood Management. Berlin: University of Twente. Recuperado a partir de [http://essay.utwente.nl/59345/1/scriptie\\_A\\_Galema.pdf](http://essay.utwente.nl/59345/1/scriptie_A_Galema.pdf)

Groot, R., Wilson, M., & Boumans, R. (2002, junio). A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. Recuperado 4 de mayo de 2016, a partir de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921800902000897>  
Heras, R. (1981). Métodos de Cálculo del Balance Hídrico Guia Internacional de Investigación y Métodos. España: Instituto de Hidrología de España y UNESCO.

Ji, Z.-G. (2008). Hydrodynamics and Water Quality: Modeling Rivers, Lakes, and Estuaries (Edición: 1). Hoboken, N.J: Wiley-Blackwell.

Kadlec, R. (1990). Overland Flow in Wetlands: Vegetation Resistance. *Journal of Hydraulic Engineering*, 116(5), 691-706. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1990\)116:5\(691\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1990)116:5(691))  
Kadlec, R., Knight, R., Vymazal, J., Brix, H., Cooper, P., & Haberl, R. (2000). *Constructed Wetlands for Pollution Control. Processes, Performance, Design and Operation*. London: IWA Publishing.

Kadlec, R., & Wallace, S. (2009). *Treatment Wetlands* (2.<sup>a</sup> ed.). Boca Raton: CRC Press.  
Karamouz, M., Nazif, S., & Falahi, M. (2013). *Hydrology and Hydroclimatology, Principles and Applications*. Boca Raton: CRC Press.

Kazmierczak, R. (2001). Economic Linkages Between Coastal Wetlands and Water Quality: a Review of Value Estimates Reported In The Published Literature (Staff Paper No. 31685). Louisiana State University, Department of Agricultural Economics and Agribusiness. Recuperado a partir de <http://econpapers.repec.org/paper/agslsustp/31685.htm>

Lahora, A. (2003). Depuración de aguas residuales mediante humedales artificiales: la EDAR de Los Gallardos (ALMERÍA). Recuperado 21 de abril de 2017, a partir de [https://www.researchgate.net/publication/28152115\\_Depuracion\\_de\\_aguas\\_residuales\\_mediante\\_humedales\\_artificiales\\_la\\_EDAR\\_de\\_Los\\_Gallardos\\_ALMERIA](https://www.researchgate.net/publication/28152115_Depuracion_de_aguas_residuales_mediante_humedales_artificiales_la_EDAR_de_Los_Gallardos_ALMERIA)

Leverenz, H. L., Haunschild, K., Hopes, G., Tchobanoglous, G., & Darby, J. L. (2010). Anoxic Treatment Wetlands for Denitrification, 36. Recuperado a partir de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925857410000923>

Medeiros, S. C., Hagen, S. C., & Weishampel, J. F. (2012). Comparison of floodplain surface roughness parameters derived from land cover data and field measurements. *Journal of Hydrology*, 452, 139-149. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.05.043>

Min, J.-H., & Wise, W. R. (2009). Simulating Short-Circuiting Flow In a Constructed Wetland: The Implications of Bathymetry and Vegetation Effects. *Hydrological Processes*, 23(6), 830-841. <https://doi.org/10.1002/hyp.7219>

Min, J.-H., & Wise, W. R. (2010). Depth-Averaged, Spatially Distributed Flow Dynamic and Solute Transport Modelling of a Large-Scaled, Subtropical Constructed Wetland. *Hydrological Processes*, 24(19), 2724-2737. <https://doi.org/10.1002/hyp.7686>

Ministerio del Medio Ambiente. (2002). *Política Nacional para Humedales interiores de Colombia. Estrategias para su conservación y Usos Sostenible*. Bogotá: El Ministerio.

Munguía, E., Blanco, A., & Alavez, J. (2016). Análisis Hidrodinámico de Rejas de Canales mediante Simulaciones Numéricas Bidimensionales, 12, 73-92.

Paudel, R., Grace, K. A., Galloway, S., Zamorano, M., & Jawitz, J. W. (2013). Effects of hydraulic resistance by vegetation on stage dynamics of a stormwater treatment wetland. *Journal of Hydrology*, 484, 74-85. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.01.031>

Perez, M., Sanchez, S., & Rojo, C. (2000). Función Depuradora de los Humedales II: Una Revisión Bibliográfica Sobre El Papel del Sedimento. *Estudio de los Humedales Mediterráneos (SEHUMED)*, 1, 123-130.

Phillips, J., & Tadayon, S. (2007). Selection of Manning's Roughness Coefficient for Natural and Constructed Vegetated and Non-Vegetated Channels, and Vegetation Maintenance Plan Guidelines for Vegetated Channels in Central Arizona. Virginia: U.S. Geological Survey. Recuperado a partir de <https://www.bookdepository.com/Selection-Mannings-Roughness-Coefficient-for-Natural-Constructed-Vegetated-Non-Vegetated-Channels-Vegetation-Maintenance-Plan-Guidelines-for-Vegetated-Channels-Central-Arizona-David-Urbano/9781244062184>

SDA. (2016). Balance de Resultados 2016. Plan Distrital de Desarrollo. Bogotá D.C: Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. Recuperado a partir de <http://www.ambientebogota.gov.co/web/sda/informes-de-gestion>

Secretaría de la Convención Ramsar, 2013. (2013). *Manual de la Convención de Ramsar: Guía a la Convención sobre los Humedales (Ramsar, Irán, 1971)*. Secretaría de la Convención de Ramsar.

Seoáñez, M. (1999). *Aguas Residuales: Tratamiento por Humedales Artificiales: Fundamentos Científicos: Tecnologías: Diseño*. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa.

Shelef, O., Gross, A., & Rachmilevitch, S. (2013). Role of Plants in a Constructed Wetland: Current and New Perspectives. *Water*, 5(2), 405-419. <https://doi.org/10.3390/w5020405>

Sierra, F. (2015). Comparación entre Metodologías de Modelación Hidrológica HEC HMS,

Hidráulica en 1D HEC-RAS y 2D Modelo IBER, de Planicies de Inundación y Zonas Urbanas para el Caso de Villapinzon, Cundinamarca. Recuperado a partir de <https://repositorio.escuelaing.edu.co/handle/001/193>

Silva, G. (1984). Hidrología Básica. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

Thomas, H. (1981). Improved Methods for National Water Assessment, Water Resources Contract: WR15249270 (No. Water Resources Contract: WR15249270) (p. 57). Cambridge: Harvard University. Recuperado a partir de <http://pubs.er.usgs.gov/publication/70046351>

UNAL, & EAAB. (2008). Modelación Dinámica de la Calidad del Agua del Río Bogotá. EAAB, UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA Contrato Interadministrativo 9-07-26100-1059 de 2008. Recuperado a partir de <file:///C:/Users/Daniel/Desktop/campanas-de-monitoreo-calidad-del-agua-rio-bogota.pdf>

UN-HABITAT. (2008). Constructed Wetlands Manual. Nairobi: UN-HABITAT - Water, Sanitation and Infrastructure Branch.

U.S. EPA. (1985). Freshwater Wetland For Wasterwater Management Handbook. Atlanta: U.S. EPA. Recuperado a partir de <https://nepis.epa.gov/Exe/tiff2png.cgi/200063RA.PNG?>

U.S. EPA. (1988). Design Manual Constructed Wetlands and Aquatic Plant Systems for Municipal Wastewater Treatment. U.S. EPA. Recuperado a partir de <https://www.scribd.com/document/50354608/Design-Manual-Constructed-Wetlands-and-Aquatic-Plant-Systems-for-Municipal-Wastewater-Treatment-US-EPA-1988>

Verhoeven, J. T. A., Beltman, B., Bobbink, R., & Whigham, D. F. (Eds.). (2006). Wetlands and Natural Resource Management (2006 edition). Berlin: Springer.

Vymazal, J. (2011). Plants used in Constructed Wetlands with Horizontal Subsurface Flow: A Review. *Hydrobiologia*, 674(1), 133-156. <https://doi.org/10.1007/s10750-011-0738-9>

Xu, C., Singh, V., & Yongqin, D. (2008). Evaporation and Evapotranspiration. En V. Singh (Ed.), *Hydrology and Hydraulics* (pp. 229-276). Highlands Ranch: Water Resources Publications, LLC.

Zirschky, J., & Deemer, D. (1986). Basic design rationale for artificial wetlands. Georgia: Office of Municipal Pollution Control, U.S. Environmental Protection Agency.

## Anexos

### Anexo 1. Inventario de aportes de caudal Humedal La Florida Sector 2

Nombre	Este (m)	Norte (m)	Observación	Fotografía
1. Terrapuerto	992014,934	1015362,99	En los predios de Terrapuerto, al costado sur por la carretera al oriente que comunica con el Municipio de Funza	
2. Terrapuerto	992151,855	1015561,76	Tubo de aproximadamente 24 pulgadas, ubicado en la parte trasera de los predios de Terrapuerto, anteriormente Finca Las Amelias, predio que se dedicaba al cultivo de flores. Actualmente, Se ubica un parque industrial.	
3. Terrapuerto	992266,24	1015728,34	Tubo de aproximadamente 40 pulgadas, localizado entre los predios de Terrapuerto y el nuevo proyecto de bodegas que está iniciando su construcción ubicado en la Finca Rosalinda.	
4. Terrapuerto	992140,746	1015901,18	Tubo de aproximadamente 40 pulgadas, descarga de aguas lluvias	

Nombre	Este (m)	Norte (m)	Observación	Fotografía
5. Intexzona	991837,512	1016534,8	Tubo de aproximadamente 30 pulgadas, localizado por el costado norte del humedal, de aguas lluvias. Se encuentra ubicado en los predios de Intexzona y Rosalinda	
6. Intexzona	991609,466	1016516,39	Tubo de aproximadamente 20 pulgadas correspondiente a una alcantarilla de aguas lluvias. Se encuentra ubicado por el costado norte del humedal	
7. Intexzona	991692,694	1016725,26	Tubería de aproximadamente 40 pulgadas de aguas lluvias. Está ubicado por el costado norte del humedal	
8. Intexzona	991668,062	1016924,93	Tubería de aproximadamente 20 pulgadas de aguas lluvias. Aforo con un resultado igual a 0.8 L.p.s. Se encuentra ubicado por el costado norte del humedal.	
9. Intexzona	991655,728	1016854,28	Tubería de aproximadamente 20 pulgadas de aguas lluvias. Aforo con un resultado igual a 0.005 L.p.s. Se encuentra ubicado por el costado norte del humedal.	

Nombre	Este (m)	Norte (m)	Observación	Fotografía
13. Flores Yata SA	991920	1016130	Tubería PVC 12" Generadores Flores Yata SA escorrentía vías e invernaderos	
6. Intexona	991729	1016848	Tubería 40' escorrentía vías internas	
3. Intexona	991448	1016623	Tubería 40' escorrentía vías internas	
1. Parque Industrial Sol (Terranum)	991066,323	1016182,53	Se localiza en los predios de Terranum, en límites con el humedal. La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales se encuentra conectada a la red de servicio de alcantarillado de Aguas de La Sabana.	
2. Intexzona (lluvias)	992034,739	1016528,64	Tubería de aproximadamente 50 pulgadas, un vertimiento y ofrece abastecimiento al humedal. En el momento de la visita se encontró seco. Está ubicado por el costado norte del humedal	

Nombre	Este (m)	Norte (m)	Observación	Fotografía
3. Intexzona	990729,483	1016852,63	Durante los recorridos para muestreos de calidad de agua se evidenció este vertimiento localizado en los predios de Intexzona, al parecer proveniente de una de sus bodegas, la cual se dedica a la elaboración de helados (Rico). En visita se informó que dicha empresa se encuentra en liquidación, no estaba en funcionamiento.	
4. Intexzona	990740,037	1016825,22	Este vertimiento se localiza en los predios de Intexzona. Es una alcantarilla de agua lluvia	
Afluente	992063,073	1015187,36	Box culvert y compuerta 1,70 * 1,70. Sistema hidráulico de manejo ambiental y control de inundaciones, SHMACI La Ramada Operación y control de los niveles de la ciénaga	—
Efluente	990524,69	1016989,05	Salida hacia la Estación elevadora de Tornillo SHMACI La Ramada alimentación del embalse La Isla	
Zona de Operaciones Logísticas Funza (ZOL Funza) – Terraum Lluvias	991148	1016069	Tubería de 52" de diámetro aproximadamente - Compuerta 1. Sistema de drenaje de Aguas lluvias de la Zona de Operaciones Logísticas Funza (ZOL Funza)	

Nombre	Este (m)	Norte (m)	Observación	Fotografía
Zona de Operaciones Logísticas Funza (ZOL Funza) – Terraum Lluvias	991210	1016082	Tubería de 52" de diámetro aproximadamente - Compuerta 2. Sistema de drenaje de Aguas Lluvias de la Zona de Operaciones Logísticas Funza (ZOL Funza).	

## Anexo 2. Muestreos de Calidad de Agua



### RESULTADOS DE ANALISIS

N° R 17372

FOR 04 (05), Versión N° 122019-07-08



Empresa: EPAM S.A. E.S.P.  
 NIT: 860.067.745-7  
 Dirección: Avenida 19 No. 125-65 Of 110  
 Solicitado por: AMBIUS S.A.S  
 Teléfono: 5439500  
 Celular: -  
 e-mail: ambius@ambius.com.co; j.bermudez@ambius.com.co; j.montana@ambius.com.co  
 Orden de Servicio: 10472

Fecha Recepción: 2016-08-02  
 Fecha de Emisión de resultados: 2016-08-25  
 Fecha de muestreo: 2016-08-04  
 Muestreo a cargo de: El Cliente  
 Plan de muestreo: No Reporta  
 Procedimiento de muestreo: No Reporta  
 Número total de muestras: 4  
 Lugar de muestreo: Humedal La Florida. Cota - Funza - Cundinamarca.  
 Tipo de muestreo: Simple

Tipo de Muestra: ARI ( ) ARD ( ) ARnD ( ) AN ( X )  
 AP ( ) AM ( ) S ( ) AX ( )

#### REPORTE DE RESULTADOS

Fecha de Análisis (AAAA-MM-DD)	Item	Parámetro	Método	Técnicas Analíticas	Límite de Cuantificación del método	Unidad	F1	F2	F3	F4	VALORES DE NORMA QUE APLICA (OPCIONAL)	VALORES DE NORMA QUE APLICA (OPCIONAL)
							MN 29171	MN 29172	MN 29173	MN 29174		
2016-08-11	1	Clorofila a*	SM 10200 H	Colorimétrico	0,200	mg/m3 Clorofila a	<0,200	<0,200	0,307	0,838	-	-
2016-08-02	2	Coliformes Fecales Termotolerantes*	SM6223 B Modificado	Sustrato enzimático multiceida	1,00	NMP/100 mL	74,0	10,0	200	4430	-	-
2016-08-02	3	Coliformes Totales*	SM6223 B	Sustrato enzimático multiceida	1,00	NMP/ 100 mL	292	171	22820	11990	-	-
2016-08-08/2016-08-13	4	DBO5 (Demanda Bioquímica de Oxígeno)*	SM 5210 B, ASTM D 888-09 METODO C	Incubación 5 días - Luminiscencia	5,00	mg O2/L	<5,00	<5,00	5,46	7,68	-	-
2016-08-09	5	DQO (Demanda Química de Oxígeno)*	SM 5220 D	Reflujo cerrado y Colorimetría	5,00	mg O2/L	14,6	47,9	78,6	24,4	-	-
2016-08-09	6	Ortofosfatos (equivalente a fósforo soluble, fosfato soluble, ortofosfato soluble, fósforo reactivo soluble)*	SM4500-P E	Colorimetría	0,210	mg PO4/L	<0,210	<0,210	<0,210	1,08	-	-
2016-08-05	7	Nitritos* (Aguas superficiales y potables)	SM 4500 NO3 B	Espectrofotometría Ultravioleta	0,500	mg NO3/L	14,9	7,37	6,07	9,07	-	-
2016-08-16	8	Nitrógeno amoniacal (Amonio)*	SM 4500-NH3 B, Asian Journal of Applied Sciences 2009, 2 (4):363-371	Colorimetría	0,050	mg/L NH3-N	0,162	0,150	0,178	3,76	-	-
2016-08-25	9	Sulfatos*	SM 4500 SO4 E	Turbidimetría	5,00	mg SO4=L	16,9	14,7	11,4	21,0	-	-

ARI: Agua Residual Industrial, ARD: Agua Residual Doméstica, ARnD: Agua Residual no Doméstica, AN: Agua Superficial o Subterránea, AP: Agua Potable, S: Suelo, AM: Agua Marina, AX: Otros

\*ChemiLab tiene estos parámetros acreditados mediante resolución 2016 de 2014 y 1226 de 2016 del IDEAM.

\*\* Análisis realizados por laboratorio subcontratado acreditado

(F) PICOAP

Parámetro no acreditado

Empresa: EPAM S.A. E.S.P  
 Nit: 860.067.745-7  
 Dirección: Avenida 19 No. 125-65 Of 110  
 Solicitado por: AMBIUS S.A.S  
 Teléfono: 6439500  
 Celular: -  
 e-mail: ambius@ambius.com.co; j.bermudez@ambius.com.co; j.montana@ambius.com.co  
 Orden de Servicio: 10472

Fecha Recepción: 2016-09-02  
 Fecha de Emisión de resultados: 2016-09-25  
 Fecha de muestreo: 2016-09-04  
 Muestreo a cargo de: El Cliente  
 Plan de muestreo: No Reporta  
 Procedimiento de muestreo: No Reporta  
 Número total de muestras: 3  
 Lugar de muestreo: Humedal La Florida, Cota - Funza - Cundinamarca.  
 Tipo de muestreo: Simple

ARI ( )      ARD ( )      ARND ( )      AN (X)  
 AP ( )      AM ( )      S ( )      AX ( )

REPORTE DE RESULTADOS												
Fecha de Análisis (AAAA-MM-DD)	Item	Parámetro	Método	Técnica Analítica	Límite de Cuantificación del método	Unidad	F6	F8	F7	VALORES DE NORMA QUE APLICA (OPCIONAL)	VALORES DE NORMA QUE APLICA (OPCIONAL)	VALORES DE NORMA QUE APLICA (OPCIONAL)
							MN 23175	MN 23178	MN 23177			
2016-09-11	1	Clorofila a*	SM 10200 H	Colorimétrico	0,200	mg/m3 Clorofila a	0,532	0,237	0,791	-	-	-
2016-09-02	2	Coliformes Fecales Termotolerantes*	SMS223 B Modificado	Sustrato enzimático multiceida	1,00	NMP/100 mL	18,3	11990	<1,00	-	-	-
2016-09-02	3	Coliformes Totales*	SMS223 B	Sustrato enzimático multiceida	1,00	NMP/ 100 mL	141360	>241960	<1,00	-	-	-
2016-09-09/2016-08-13	4	DBO5 (Demanda Bioquímica de Oxígeno) *	SM 5210 B, ASTM D 889-09 METODO C	Incubación 5 días - Luminiscencia	5,00	mg O2/L	<5,00	77,0	7,23	-	-	-
2016-09-09	5	DOO (Demanda Química de Oxígeno)*	SM 5220 D	Reflujo cerrado y Colorimetría	5,00	mg O2/L	48,6	186	17,2	-	-	-
2016-09-09	6	Ortofosfatos (equivalente a fósforo soluble, fosfato soluble, ortofosfato soluble, fósforo reactivo soluble)*	SM4500-P E	Colorimetría	0,210	mg PO4/L	<0,210	3,21	<0,210	-	-	-
2016-09-05	7	Nitratos* (Aguas superficiales y potables)	SM 4500 NO3 B	Espectrofotometría Ultravioleta	0,500	mg NO3/L	9,53	12,9	3,11	-	-	-
2016-09-16	8	Nitrógeno amoniacal (Amonio)*	SM 4600-NH3 B, Asian Journal of Applied Sciences 2009, 2 (4):363-371	Colorimetría	0,050	mg/L NH3-N	0,106	21,5	5,84	-	-	-
2016-09-25	9	Sulfatos*	SM 4500 SO4 E	Turbidimetría	5,00	mg SO4=L	23,0	19,0	20,4	-	-	-

ARI: Agua Residual Industrial, ARD: Agua Residual Doméstica, ARND: Agua Residual no Doméstica, AN: Agua Superficial o Subterránea, AP: Agua Potable, S: Suelo, AM: Agua Marina, AX: Otros

\*ChemiLab tiene estos parámetros acreditados mediante resolución 2016 de 2014 y 1226 de 2016 del IDEAM.

\*\* Análisis realizados por laboratorio subcontratado acreditado

(P) PIOCAP

Parámetro no acreditado



**Anexo 3.** Registros de precipitación y temperatura de las estaciones Aeropuerto El Dorado y La Ramada

**La Ramada**  
**TEMPERATURA MEDIA MENSUAL (°C )**

ESTACIÓN : 2120516 RAMADA LA

Latitud	0443 N X=N=1011430	Departamento	CUNDINAMARCA	Corriente	R. BOGOTÁ	Categoría	CP
Longitud	7411 W Y=E=989110	Municipio	FUNZA	Cuenca	R. BOGOTÁ	Fecha Instalación	12/01/1937
Elevación	2545 m.s.n.m	Oficina Provincial	10 SABANA OCCIDENTE			Fecha Suspensión	

CODIGO	AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2120516	1972	12,1	11,6	12,7	13,2	14,1	13,7	13	12,7	13,1	12,8	13,5	12,9
2120516	1973	13,1	13,2	14,2	14,1	13,7	12,7	12,3	12,4	12,2	12,7	13,2	12,8
2120516	1974	12	13,3	13,4	13,6	13,1	13,3	13	13,1	12,8	12,9	13,9	12,4
2120516	1975	12,2	13,3	13,5	13,8	13,7	13,4	12,9	13	13,6	13,3	14	13,4
2120516	1976	12,9	13,9	15	14,9	15,1	14,4	14	13,3	13,8	14,6	14	13,7
2120516	1977	13,7	14,1	15,5	15,9	15,6	15,1	15	14,8	14,5	13,6	13,5	13,1
2120516	1978	12,5	13,4	13,5	14,3	14,1	13,4	12,8	13	13,1	13,7	13,8	13,3
2120516	1979	13,9	13,8	14,8	15,4	15,1	14,9	14,3	14,4	14,5	15,3	15,8	14,8
2120516	1980	14,9	15,5	15,5	14,6	14,7	14,5	14	13,2	14,3	14,4	14,5	14,5
2120516	1981	13,8	15,7	16,8	17,6	17,6	17,3	16,5	16,5	16,7	17,3	18,1	17,2
2120516	1982	17,2	18,3	18,7	18,9	18,8	18,1	17,5	17,4	18,3	18,6	18,7	18,6
2120516	1983	18,6	18,9	19,3	19,5	19,7	18,3	18,3	18,3	18,5	18,8	18,8	18,4
2120516	1984	14,1	14,8	15,2	15,2	14,9	14,1	13,8	14,3	14,4	14,7	15	14,6
2120516	1985	14,7	10,9	12,5	12,6	12,2	11,8	11,4	11,7	11,1	11,6	11,3	10,9
2120516	1986	11,3	11	12,3	13,4	13,1	12,4	12,3	13,2	12,9	13,5	13,1	11,6
2120516	1987	11,8	10,5	11	10,9	11,6	11,5	11,3	11	11,3	11,7	11,2	12,9
2120516	1991	13,9	14,4	14,1	14,2	14,6	14,8	12	11,4	13,9	13,1	14	15,8
2120516	1992	15,1	15,05	14,95	15,25	14,85	14,85	13,3	12,85	14	13,75	14,55	14,75
2120516	1993	14,7	15,7	15,8	16,3	15,1	14,9	14,6	14,3	14,1	14,4	15,1	13,7
2120516	1994	13,9	14,4	14,8	14,7	15,2	14,4	14,7	15	15,4	15,6	16	16,3
2120516	1995	16,2	15,1	14	14,9	14,6	14,7	14,7	15,1	15,7	15,5	16,3	16,1
2120516	1996	14,8	14,1	14,4	14,6	14,5	13,9	13,6	13,5	14,2	14,4	15,1	14,9

**La Ramada**  
**TEMPERATURA MEDIA MENSUAL (°C )**

ESTACIÓN : 2120516 RAMADA LA

Latitud	0443 N X=N=1011430	Departamento	CUNDINAMARCA	Corriente	R. BOGOTÁ	Categoría	CP
Longitud	7411 W Y=E=989110	Municipio	FUNZA	Cuenca	R. BOGOTÁ	Fecha Instalación	12/01/1937
Elevación	2545 m.s.n.m	Oficina Provincial	10 SABANA OCCIDENTE			Fecha Suspensión	

CODIGO	AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2120516	1997	15,3	16,1	16,4	16	16,3	16,1	15,5	15,8	15,7	16,9	17	17,1
2120516	1998	17,5	14,7	16,2	16,4	15,9	14,6	14,5	14,8	12,7	12,2	13,3	14,1
2120516	1999	15,6	14,4	14,3	14,3	14,1	13,6	13,4	13,4	13,5	14,1	15,3	15,2
2120516	2000	13,7	13,9	14,3	14,3	15,1	14,9	13,4	13,6	13,7	14,4	14,5	14,4
2120516	2001	14,3	14,8	14,9	14,9	15,5	14,7	13,8	14,05	14,35	15	14,7	14,45
2120516	2003	14,2	14,65	14,85	14,85	15,7	14,6	14	14,275	14,675	15,3	14,8	14,1
2120516	2004	14,1	14,5	14,8	14,8	15,9	14,5	14,2	14,5	15	15,6	14,9	14,5
2120516	2005	14,9	15,4	15	15,6	15,7	15	15,1	15	15	15,2	14,5	14,9
2120516	2006	14,8	13,2	12,9	15	15,1	15	14,2	14,7	14,6	14,3	13,7	14,4
2120516	2007	14,9	13,5	14	14,7	14,55	14,35	15,2	15	14,9	14,6	14,9	14,4
2120516	2008	20,6	14,7	13,8	13,9	14	13,7	13,3	13,3	13,4	13,5	14	13,6
2120516	2009	13,8	13,7	13,6	14,2	14,2	14	13,9	14,7	14,3	14,3	14,8	13,5
2120516	2010	13,7	15,2	15	14,5	14,4	14,2	13,2	13,2	13	13,7	13,7	13,6
2120516	2011	12,7	12,7	12,7	13,1	13	14,2	13,7	13,9	13,9	13,1	13,6	14
2120516	2012	13,3	13,5	13,9	13,6	13,7	13,9	13,3	13,6	13,9	14	14,1	13,7
2120516	2013	14,2	14,1	14,65	14,45	14,35	14,35	14	14,6	14,75	14,9	14,9	14,9
2120516	2014	15,3	15,9	15,4	15,3	15	14,8	14,7	15,6	15,6	15,3	14,6	13,9
2120516	2015	14,5	15,6	16,4	15,8	16,5	15,3	14,6	14,4	14,3	14,5	14,4	14,9
	<b>MEDIA</b>	14,4	14,3	14,6	14,8	14,9	14,5	14,0	14,1	14,2	14,4	14,6	14,4
	<b>MIN</b>	11,3	10,5	11	10,9	11,6	11,5	11,3	11	11,1	11,6	11,2	10,9
	<b>MAX</b>	20,6	18,9	19,3	19,5	19,7	18,3	18,3	18,3	18,5	18,8	18,8	18,6

**PRECIPITACION, TOTALES MENSUALES (mm )**

ESTACIÓN : 2120516 RAMADA LA

Latitud	0443 N X=N=1011430	Departamento	CUNDINAMARCA	Corriente	R. BOGOTÁ	Categoría	CP
Longitud	7411 W Y=E=989110	Municipio	FUNZA	Cuenca	R. BOGOTÁ	Fecha Instalación	12/01/1937
Elevación	2545 m.s.n.m	Oficina Provincial	10 SABANA OCCIDENTE			Fecha Suspensión	

CODIGO	AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2120516	1972	45,5	40,1	51,3	115,3	110,2	59	55,8	33,4	27,2	78,7	107,5	34,3
2120516	1973	2	2	51,2	59,4	75,1	63	39,8	56,3	115,9	102,9	71,1	83
2120516	1974	53,9	59,7	30,3	97,7	59,5	38,8	14,8	51,7	94,6	74	150,2	15,5
2120516	1975	1,1	36,4	130,2	40,9	118,2	66,5	45,6	61,8	79,3	137,1	59,8	71,6
2120516	1976	22,1	52,8		63,3	61,9	45,2	8,5	19,3	47,1	101,8	70,8	51,2
2120516	1977	3,4	27,5	72	52,9	28,4	20,3	37,3	40,3	110,1	150,5	65,2	25,1
2120516	1978	6,6	11,1	52,5	153	109,6	66,6	29,1	16,3	50,6	89,2	29,6	29,8
2120516	1979	20,2	42,1	51,8	94,8	86,7	64,6	17,6	87,3	62,6	125,3	128,2	23,8
2120516	1980	6,8	31,8	23,4	48,8	41,9	78,3	6,4	46,9	43	47,8	32,8	81,7
2120516	1981	3,7	15,8	13,7	171,8	152,6	60,9	30,7	27,9	39	79,1	96,4	40,3
2120516	1982	62,6	44,3	70,8	216,9	89,2	20,1	12,1	20,7	19,7	102,5	54,8	40,5
2120516	1983	6,4	19,9	82	173,5	87,9	39,5	47,2	35,8	27,5	68	62,1	87,9
2120516	1984	77,7	46,8	44,6	122,1	122,8	105,6	32,2	65,8	86,7	71,9	93,2	17,4
2120516	1985	3,5	6,2	22,2	39,3	107,7	21,2	45,9	105,9	125,9	67,6	103	21,1
2120516	1986	4,2	82,8	43,8	75,7	65,4	100,8	32,1	51,1	86,7	175,8	104,1	4,3
2120516	1987	33,6	13,2	26,6	85,5	94,5	24,7	81,5	35,3	69,3	121,6	94,3	34,2
2120516	1988	15,8	45,8	19,3	103,3	131,6	50,6	46,5	63,6	109,8	78,2	137,9	103,7
2120516	1989	37,7	38,7	103,1	32,4	52	46,7	34,7	35	61,8	78	29,2	73,2
2120516	1990	35,4	44,9	61,2	137,4	79,3	18,8	32,8	33,6	54,7	181	61,7	72
2120516	1991	12,6	6,9	150,4	61,5	71,7	28,3	41,7	28,8	43,1	34,8	79,2	58,5
2120516	1992	38,8	19,6	19,6	39,2	26,6	11,5	37,5	39,5	44,6	32,9	116,9	29,4
2120516	1993	46,15	97,4	62,2	84,1	122,3	22,3	60	31,7	42,7	52,8	175,7	9,8
2120516	1994	53,5	175,2	104,8	86,1	63,7	50,3	17,6	29,3	38,7	74,9	151,3	8,2
2120516	1995	4	13,5	98,4	113,6	111,1	76,2	78,3	74,2	48,9	145,8	78,7	78,4

**PRECIPITACION, TOTALES MENSUALES (mm )**

ESTACIÓN : 2120516 RAMADA LA

Latitud	0443 N X=N=1011430	Departamento	CUNDINAMARCA	Corriente	R. BOGOTÁ	Categoría	CP
Longitud	7411 W Y=E=989110	Municipio	FUNZA	Cuenca	R. BOGOTÁ	Fecha Instalación	12/01/1937
Elevación	2545 m.s.n.m	Oficina Provincial	10 SABANA OCCIDENTE			Fecha Suspensión	

CODIGO	AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2120516	1996	30,2	67,8	74,1	67,2	109	66,1	54,9	64,6	26,9	119,4	35,2	24,5
2120516	1997	72,3	22,8	56,9	64,4	43,7	92,1	20,5	8,3	42,7	47,9	54,8	1,2
2120516	1998	3	49,5	30,8	111	131,6	59,4	85,2	57,9	86,5	117,6	66,6	84
2120516	1999	24,4	118,4	64,4	61	72,5	89,9	29,2	53,7	116,8	152,5	81,4	56,3
2120516	2000	23,4	97,1	79,9	36	104,4	76,5	48,4	48,6	130,9	47,4	31,5	43,1
2120516	2001	40,4	20,5	2,6	56,1	67,5	63,7	37,15	39,6	87,05	55,05	61,3	32,55
2120516	2003	1,5	35,2	78	76,2	30,6	50,9	25,9	30,6	43,2	62,7	91,1	22
2120516	2004	24,9	65,4	61,4	174,2	94,4	48,7	48,9	30,4	59,1	140,5	98,9	12,7
2120516	2005	22,9	14,8	30,2	85,1	150,4	17,7	20,5	60,9	61	99,3	68,5	53,4
2120516	2006	19	10	99,8	84,6	156,6	73	13,9	26,6	24,1	131,8	53,8	52,2
2120516	2007	4,2	11,5	52,8	154,3	126,7	67	60,7	3,2	21,7	148,8	87,5	142,8
2120516	2008	32	59	114,4	106,5	171,4	88,2	59,3	74,9	51,5	97,8	107,4	49,7
2120516	2009	37	56,9	148,8	74,4	13	74,1	51,3	23,6	24,9	139,4	53,8	45,3
2120516	2010	3,1	48,8	14,5	187,9	153,3	94,3	126	47,4	42,2	104,8	205,4	138,2
2120516	2011	55,1	94,2	120,5	206,7	127,8	64,2	40,6	37,9	81,6	188,6	252,5	100,2
2120516	2012	57,7	39,3	113,4	217,2	56,2	42,7	52,2	33,1	15,8	99,5	62	28,1
2120516	2013	4,7	148,5	29,2	100,8	105,9	30,7	32,6	82,9	30,7	54,1	141,1	169,8
2120516	2014	74,7	86,7	72,5	81,5	94,2	39	25,5	33	102,8	98,6	65,7	64,2
2120516	2015	20	13,2	110,4	99,1	39,2	23,4	35,6	23,3	27,8	30,5	73,9	2
	<b>MEDIA</b>	26,7	47,3	65,2	100,3	91,1	54,5	40,8	43,5	60,6	97,9	89,4	51,6
	<b>MIN</b>	1,1	2	2,6	32,4	13	11,5	6,4	3,2	15,8	30,5	29,2	1,2
	<b>MAX</b>	77,7	175,2	150,4	217,2	171,4	105,6	126	105,9	130,9	188,6	252,5	169,8

**AEROPUERTO EL DORADO**  
**TEMPERATURA MEDIA MENSUAL (°C )**

FECHA DE PROCESO : 2017/06/15

ESTACION : 21205790 APTO EL DORADO

LATITUD 0442 N TIPO EST SP DEPTO BOGOTA D.C. FECHA-INSTALACION 1972-FEB  
 LONGITUD 7409 W ENTIDAD 01 IDEAM MUNICIPIO BOGOTA FECHA-  
 SUSPENSION  
 ELEVACION 2547 m.s.n.m REGIONAL 11 BOGOTA CORRIENTE BOGOTA

Estacion	AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
21205790	1972	12,6	12,3	13,2	13	13,9	13,4	13,3	12,9	13,2	13	13,4	13
21205790	1973	13,3	13	14,2	13,6	13,6	13,2	12,8	12,9	12,6	12,8	13,1	12,4
21205790	1974	12,1	12,8	12,9	13,5	13	13	12,5	13	12,4	12,5	13,2	12
21205790	1975	12,3	12,8	13	13,3	13,2	13,1	12,4	12,5	12,6	12,4	12,9	12,3
21205790	1976	12,2	12,4	13,2	13	13,4	12,8	12,7	12,4	13,1	13,3	13	12,9
21205790	1977	12,7	13,1	14,2	13,9	13,6	13,3	13,3	12,9	13,4	13,6	13,2	13,3
21205790	1978	12,5	13,6	13,6	13,8	13,9	13,3	12,7	12,7	13,1	13,2	13,2	13,2
21205790	1979	12,9	13	13,7	14,3	13,9	13,4	13,3	13,2	13,1	13,7	14	13,3
21205790	1980	13,5	13,3	14,3	14,2	14,2	13,9	13,7	12,8	13,8	13,7	13,1	12,9
21205790	1981	12,5	14	13,8	14,1	14,1	14	13,2	13,2	13	13,2	13,7	13,4
21205790	1982	12,7	13,9	13,9	13,9	13,7	13,8	13,4	13,2	13,7	13,3	13,4	13,8
21205790	1983	14,1	14,7	14,6	14,4	14,8	13,8	13,9	13,6	13,7	13,3	13,6	12,8
21205790	1984	12,5	12,8	13,4	13,3	13,8	13,1	12,7	13,2	12,7	13,1	13	12,9
21205790	1985	12,5	12,3	13,8	13,6	13,6	13,2	12,7	12,8	12,9	13,1	12,7	12,5
21205790	1986	13,2	12,7	13,2	13,9	13,9	13,3	12,9	13,3	13,3	13,4	13,5	13
21205790	1987	13,2	14,1	13,8	14,3	14,3	14,4	14,1	13,8	13,6	13,9	13,8	13,4
21205790	1988	13,3	14	13,8	14,1	14	13,3	13,3	13,1	13,2	13,2	13,3	12,7
21205790	1989	13	13	12,6	13,8	13,6	13,8	13	13,2	13,1	13,7	13,8	12,6
21205790	1990	13,5	13,4	14,1	14	14,2	14,3	13,6	13,8	13,6	13,4	13,8	13,5
21205790	1991	13,6	14,6	14	14,4	14,6	14,7	13,9	13,6	14,1	13,4	13,6	14,1
21205790	1992	13,8	14,2	14,9	15,1	14,7	15,1	13,7	14,4	13,7	14	13,8	13,9
21205790	1993	14,2	14,2	14,5	14,5	14,5	14,6	14,1	14,1	13,8	13,7	13,8	13,9
21205790	1994	13,6	14,1	14,1	14,5	14,7	14,2	13,4	13,3	13,7	13,2	13,2	13,3

**AEROPUERTO EL DORADO**  
**TEMPERATURA MEDIA MENSUAL (°C )**

FECHA DE PROCESO : 2017/06/15

ESTACION : 21205790 APTO EL DORADO

LATITUD	0442 N	TIPO EST	SP	DEPTO	BOGOTA D.C.			FECHA-INSTALACION 1972-FEB						
LONGITUD	7409 W	ENTIDAD	01 IDEAM	MUNICIPIO	BOGOTA			FECHA-						
SUSPENSION														
ELEVACION	2547 m.s.n.m	REGIONAL	11 BOGOTA	CORRIENTE BOGOTA										
21205790	1995	12,9	13,1	13,8	14	13,8	14	13,3	12,8	13,7	13,4	13,1	12,5	
21205790	1996	11,5	12,8	13,2	13,3	13	13,4	12,9	13	13,5	13,2	13,5	12,9	
21205790	1997	13,1	14	13,6	13,6	14,4	14,3	13,9	13,9	13,9	14,5	13,8	14,1	
21205790	1998	14,6	15	15,2	15,6	14,8	14,5	13,8	13,8	13,9	14,2	14,4	13,9	
21205790	1999	13,6	13,7	13,6	13,9	14	13,5	13,8	13,4	13,2	13,3	13,6	13,4	
21205790	2000	12,9	13,2	13,5	13,7	13,8	14,2	13,3	13,5	13	13,5	13,2	13	
21205790	2001	12,5	13,5	14	14,2	14,2	13,8	13,6	13,9	13,2	14,2	13,9	14,7	
21205790	2002	13,8	14,3	14,2	14,4	14,9	14,3	14,3	14,2	14,1	14,2	14	14,5	
21205790	2003	14	14,6	14,3	14,5	14,7	13,5	13,6	13,7	13,3	13,5	13,3	13,5	
21205790	2004	13	13,5	14,1	13,5	14	13,7	13,1	13,6	13	13,3	13,6	13,4	
21205790	2005	13,4	14,1	13,9	14,4	14,2	14	13,9	13,6	13,6	13,1	13,3	13,1	
21205790	2006	13,5	13,8	13,3	13,5	13,7	13,8	13,8	13,9	13,8	13,7	13,5	13,5	
21205790	2007	14,2	13,1	13,7	13,9	13,8	13,5	13,8	13,2	13,5	13,1	13,3	12,8	
21205790	2008	13	13	13	13,3	13,3	13,5	13,2	13,1	13,3	13	13,5	13	
21205790	2009	13,2	13,4	13,1	14,1	14,2	14,3	14,1	14,4	14,6	14	14,5	14,1	
21205790	2010	14	15,2	15,2	14,9	15,1	14,4	13,7	13,9	13,6	13,9	13,8	13,6	
21205790	2011	13,6	13,9	13,8	14,5	14,8	14,6	14	14,4	14	13,8	13,9	14,5	
21205790	2012	14,1	13,6	14	13,8	14,3	14,4	14	13,8	13,7	14,1	14,2	13,9	
21205790	2013	14,3	14,1	14,7	14,8	14,5	14,7	13,9	14,2	14,3	14,1	14	14,2	
21205790	2014	14,2	14,2	14,4	14,8	14,7	14,5	14,4	14	14,1	14,1	14,2	14,1	
21205790	2015	14,2	14,5	14,9	15	15,1	14,5	14,5	14,8	14,7	14,8	15	14,9	
	<b>MEDIA</b>	13,3	13,6	13,9	14,1	14,1	13,9	13,5	13,5	13,5	13,5	13,6	13,4	
	<b>MIN</b>	11,5	12,3	12,6	13	13	12,8	12,4	12,4	12,4	12,4	12,7	12	
	<b>MAX</b>	14,6	15,2	15,2	15,6	15,1	15,1	14,5	14,8	14,7	14,8	15	14,9	

**PRECIPITACION, TOTALES MENSUALES (mm )**

FECHA DE PROCESO : 2017/06/15

ESTACION : 21205790 APTO EL DORADO

LATITUD 0442 N                      TIPO EST SP                      DEPTO BOGOTA D.C.                      FECHA-INSTALACION 1972-FEB  
 LONGITUD 7409 W                      ENTIDAD 01 IDEAM                      MUNICIPIO BOGOTA                      FECHA-  
 SUSPENSION  
 ELEVACION 2547 m.s.n.m                      REGIONAL 11 BOGOTA                      CORRIENTE BOGOTA

Estacion	AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
21205790	1972	72,1	21,9	57,2	159,4	118,1	58,1	36,7	39,6	17,4	71,6	101,1	28,5
21205790	1973	2,9	3,8	50,1	39,3	75	59,5	55,1	57,4	130,3	115,4	105,8	117,3
21205790	1974	79,6	100	28,5	83,8	61,3	65,5	15,8	46,8	91,8	100,3	150,6	24
21205790	1975	5,5	32,2	130	57,9	105,3	56,4	60,3	52,2	55,1	160,8	70,7	77,9
21205790	1976	31,2	59,9	118,3	122,1	104,4	58,9	17,4	34,7	47,3	140	81,6	49,5
21205790	1977	9,1	20,4	72,2	86,4	34,1	15,9	52	52,9	115,7	120,4	82,3	26,9
21205790	1978	5,6	25	55,7	121,4	73,5	71,2	52,9	12,9	66,4	102,9	47,4	30,2
21205790	1979	27,5	44,8	55	137,3	84,5	77,5	64,8	113,5	86,3	133,4	141,7	25,4
21205790	1980	28,2	63,4	28,9	46	39,5	76,9	10,6	40,3	49,3	62,1	50,7	102,2
21205790	1981	2,5	27,3	13,7	174,6	202,1	78,1	23,7	34,4	51,1	113,4	111,8	25,5
21205790	1982	78,5	43,3	86,2	218,1	81,1	15,9	12,8	21,4	14,2	112,7	63,6	44,6
21205790	1983	6	18,4	124,4	207,3	120,4	50,3	45,7	34,9	29,3	77	43	132,6
21205790	1984	99,6	55,2	65,7	140,1	118	90,5	35,5	73,4	74,9	50,4	86,3	40,2
21205790	1985	2,8	5,1	28,3	31,4	118,4	25,3	44,6	95,9	157,9	79,8	73,8	34,7
21205790	1986		112,2	61,2	96,5	74	95,6	36,2	38,3	56,9	217,5	122,3	4
21205790	1987	42,8	32,2	25,7	95	113,2	13,8	91,2	25	69,5	148,7	64,2	29,2
21205790	1988	13,8	50,5	12,2	143,9	58,7	68,5	46,9	73,2	119,1	117,9	151	78,8
21205790	1989	11,7	41	153,6	32,9	53,8	48,2	39,1	34,9	84,8	82,1	30,7	66,2
21205790	1990	48,3	48,9	45,6	155,7	102,5	21,9	35,9	35,8	75,7	195,5	85	97,4
21205790	1991	25,5	18,3	126,3	82,6	110	27,1	43,4	31	54,2	47,1	103,9	64,1
21205790	1992	14	22,1	26,2	35	28,4	8,8	33,3	24,5	49,7	25,4	108,3	59
21205790	1993	34,7	13,8	78,6	114,2	106,3	19,7	60,6	29,2	63,8	67,5	146,9	25,5
21205790	1994	30,6	65,6	107,1	89,4	94,2	55	24,4	34,5	32,6	93,9	189,1	9,3

PRECIPITACION, TOTALES MENSUALES (mm )

FECHA DE PROCESO : 2017/06/15

ESTACION : 21205790 APTO EL DORADO

LATITUD	0442 N	TIPO EST	SP	DEPTO	BOGOTA D.C.	FECHA-INSTALACION	1972-FEB						
LONGITUD	7409 W	ENTIDAD	01 IDEAM	MUNICIPIO	BOGOTA	FECHA-							
SUSPENSION													
ELEVACION	2547 m.s.n.m	REGIONAL	11 BOGOTA	CORRIENTE	BOGOTA								
21205790	1995	3,4	20,7	68,1	142,3	126,2	81,1	55,1	86,7	56,6	112	97,3	78,4
21205790	1996	6,5	53,3	60	57,5	102,5	30,6	47,7	43,6	28,7	90,6	12,6	34,7
21205790	1997	67,3	16,1	58	46,4	59,7	66	18,8	14	25,1	63	38,1	2,7
21205790	1998	1,9	41,8	27,8	96,2	147,5	52,7	84,1	51,6	115,2	96,3	94,7	122,7
21205790	1999	43,4	93,8	62,7	71,2	68,6	116,9	29,8	51,3	140,3	199,3	101,9	47,9
21205790	2000	28,3	123,4	73,9	57,5	110,9	61,6	70,1	55,9	130,6	90,7	41,5	41,1
21205790	2001	49,3	19,3	81,9	19,4	87	47,2	40,5	17,7	66,4	43,1	54,2	53,8
21205790	2003	26,8	16,8	111,5	134,8	116,3	74,8	39,7	22,5	45,5	55,7	44	64,1
21205790	2004	3	24,1	75,4	128	46,4	61,5	31,1	67,6	42,6	54,9	134,8	78,8
21205790	2005	22	98,7	40,8	197,7	101,4	51,1	51,2	19,7	59	170	118,6	31,9
21205790	2006	11,1	33,2	33,7	93,6	161,3	36,6	21,4	66	97,8	131,3	47,8	111,2
21205790	2007	58,1	31,7	214,9	153,7	194,9	115,4	16,5	22,7	25,1	195,6	91,1	30,2
21205790	2008	7,6	10,9	62	150,6	125,4	54,2	56,1	58,9	18	200,6	117,4	82,9
21205790	2009	30,5	84,6	93,8	112,9	225,6	119,5	61,5	94,7	48,8	140,7	134,2	60
21205790	2010	51,4	91,4	142,8	55,2	15,7	64,1	53,2	28,4	21,5	129,1	95,1	58,4
21205790	2011	6,3	36,6	23,2	187,3	160,3	107,8	136,7	51,8	76,4	133	196,6	134,6
21205790	2012	52,1	88	118,1	242,8	161,3	113,5	67,2	60,2	121,7	165,6	239,8	122,3
21205790	2013	63,1	67,5	140,9	235,9	89,3	39	48,5	50,2	24,3	131	56,2	34,7
21205790	2014	21,9	129	61,4	132,7	112,4	26,9	38	68,8	45,5	64,9	182,9	96,9
21205790	2015	75,6	77,7	83,4	83,4	132,9	41,4	21,8	29,1	66,9	108,5	66,6	86,8
	MEDIA	31,0	48,5	74,1	113,2	102,8	58,6	44,8	46,5	66,3	111,9	97,1	59,7
	MIN	1,9	3,8	12,2	19,4	15,7	8,8	10,6	12,9	14,2	25,4	12,6	2,7
	MAX	99,6	129	214,9	242,8	225,6	119,5	136,7	113,5	157,9	217,5	239,8	134,6

**APLICACIÓN DEL MODELO THOMAS POR LA FORMA INVERSA**  
[ SIN CONOCER a, b, c, d,  $S_w(0)$  y  $S_g(0)$  ]

**1. VARIABLES CONOCIDAS DE ENTRADA AL MODELO**

VARIABLE DE ENTRADA	VALOR	UNIDAD
Área de la cuenca	A	4.76 km <sup>2</sup>
Precipitación en el mes (i)	P (i)	Tabla 1.1 mm
Evapotranspiración potencial en el mes (i)	PE (i)	Tabla 1.1 mm
Caudal total en el mes (i)	Q (i)	Tabla 1.1 mm

Tabla 1.1. Registros mensuales de precipitación, caudales en la fuente principal y evapotranspiración potencial (Thornthwaite)

MES	P (i) (mm)	PE (i) (mm) (THORNTHWAITE)	Q (i) (m <sup>3</sup> /s)	Q (i) (mm)
ENERO	28.8	56.6	0.0000	0.0
FEBRERO	47.9	51.7	0.0000	0.0
MARZO	69.7	58.9	0.0100	5.5
ABRIL	106.8	58.4	0.0880	48.6
MAYO	97.0	60.7	0.0660	36.4
JUNIO	56.5	57.2	0.0000	0.0
JULIO	42.8	56.1	0.0000	0.0
AGOSTO	45.0	56.6	0.0000	0.0
SEPTIEMBRE	63.4	55.6	0.0050	2.8
OCTUBRE	104.9	57.8	0.0850	46.9
NOVIEMBRE	93.3	56.7	0.0660	36.4
DICIEMBRE	55.6	57.2	0.0000	0.0

**2. DETERMINACIÓN DE LOS PARAMETROS DEL MODELO Y DE LAS CONDICIONES INICIALES DE ALMACENAMIENTO**

En la siguiente tabla asigne valores a los parámetros y condiciones iniciales a estimar. En el caso de los parámetros "a", "b", "c" y "d", los valores digitados deben encontrarse dentro de los respectivos rangos numéricos señalados.

**IMPORTANTE:** Digitar valores en la casillas sombreadas hasta que el error de estimación entre los caudales observados (columna ❶) y los caudales simulados (columna ❷), sea inferior al % de error establecido o hasta encontrar la solución más válida posible. Emplear la herramienta <SOLVER> para optimizar los valores asignados.

VARIABLE / PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD	RANGO NUMÉRICO	
Almacenamiento de agua en el suelo (zona no saturada) (condición inicial de almacenamiento)	$S_w(0)$	0.00	mm	-
Almacenamiento de agua subterránea (zona saturada) (condición inicial de almacenamiento)	$S_g(0)$	0	mm	-
Parámetros del modelo	a	0.999	-	0.8 - 0.999
	b	50	mm	14 - 50
	c	0.400597187	-	0.001 - 0.46
	d	0.007	-	0.007 - 1.0

MES	Q (i) (mm)	Q (i) (mm)
ENERO	0.0	0.0
FEBRERO	0.0	4.5
MARZO	5.5	22.6
ABRIL	48.6	43.6
MAYO	36.4	38.0
JUNIO	0.0	13.4
JULIO	0.0	5.9
AGOSTO	0.0	7.4
SEPTIEMBRE	2.8	18.4
OCTUBRE	46.9	43.6
NOVIEMBRE	36.4	36.4
DICIEMBRE	0.0	14.1

OPCIONES ASIGNADAS A LA HERRAMIENTA <SOLVER>	
PRECISION:	1.00E-70
TOLERANCIA:	1.00E-70%
CONVERGENCIA:	1.00E-70
ENFOQUE DE ESTIMACIÓN:	CÁLCULO CUADRÁTICO
DERIVADAS EMPLEADAS:	DERIVADAS CENTRALES
ALGORITMO EMPLEADO:	NEWTON

### 3. APLICACIÓN DEL MODELO PARA EL MES (1) EMPLEANDO LOS PARAMETROS Y CONDICIONES INICIALES CALCULADAS

El agua disponible en la cuenca durante el mes de ENERO "W (1)", se calcula de la siguiente forma:

$$(1.1) \quad W(i) = P(i) + S_w(i-1)$$

$$W(1) = 28.8 \quad \text{mm}$$

El consumo de agua en la cuenca durante el mes de ENERO "Y (1)", es igual a:

$$(1.2) \quad Y(i) = \frac{W(i)+b}{2*a} - \left[ \left( \frac{W(i)+b}{2*a} \right)^2 - \frac{W(i)*b}{a} \right]^{0.5}$$

$$Y(1) = 28.8 \quad \text{mm}$$

Al final del mes de ENERO, el contenido de agua en la zona no saturada del suelo "S<sub>w</sub> (1)", es:

$$(1.3) \quad S_w(i) = Y(i) * e^{-\frac{PE(i)}{b}}$$

$$S_w(1) = 9.3 \quad \text{mm}$$

La evapotranspiración en el mes de ENERO "ET (1)", es la siguiente:

$$(1.4) \quad ET(i) = Y(i) - S_w(i)$$

$$ET(1) = 19.5 \quad \text{mm}$$

El escurrimiento superficial y la recarga de agua subterránea durante el mes de ENERO "R<sub>o</sub> (1)", "R<sub>g</sub> (1)", son respectivamente:

$$(1.5) \quad R_o(i) = (1-c) * [W(i) - Y(i)]$$

$$R_o(1) = 0.0 \quad \text{mm}$$

$$(1.6) \quad R_g(i) = c * [W(i) - Y(i)]$$

$$R_g(1) = 0.0 \quad \text{mm}$$

El almacenamiento de agua en la zona saturada durante el mes de ENERO "S<sub>g</sub> (1)", se estima de la siguiente forma:

$$(1.7) \quad S_g(i) = \frac{R_g(i) + S_g(i-1)}{d+1}$$

$$S_g(1) = 0.0 \text{ mm}$$

El caudal de agua subterránea en el mes de ENERO "Q<sub>g</sub>(1)", es:

$$(1.8) \quad Q_g(i) = d * S_g(i)$$

$$Q_g(1) = 0.0 \text{ mm}$$

Finalmente, el caudal total en la fuente para el mes de ENERO "Q(1)", es igual a:

$$(1.9) \quad Q(i) = R_o(i) + Q_g(i)$$

$$Q(1) = 0.0 \text{ mm}$$

$$Q(1) = 0.000 \text{ m}$$

→ Caudal total expresado en unidades de profundidad mensual de agua uniformemente extendida sobre el área superficial de la cuenca.

El caudal total expresado en términos de flujo volumétrico promedio de agua, es igual a:

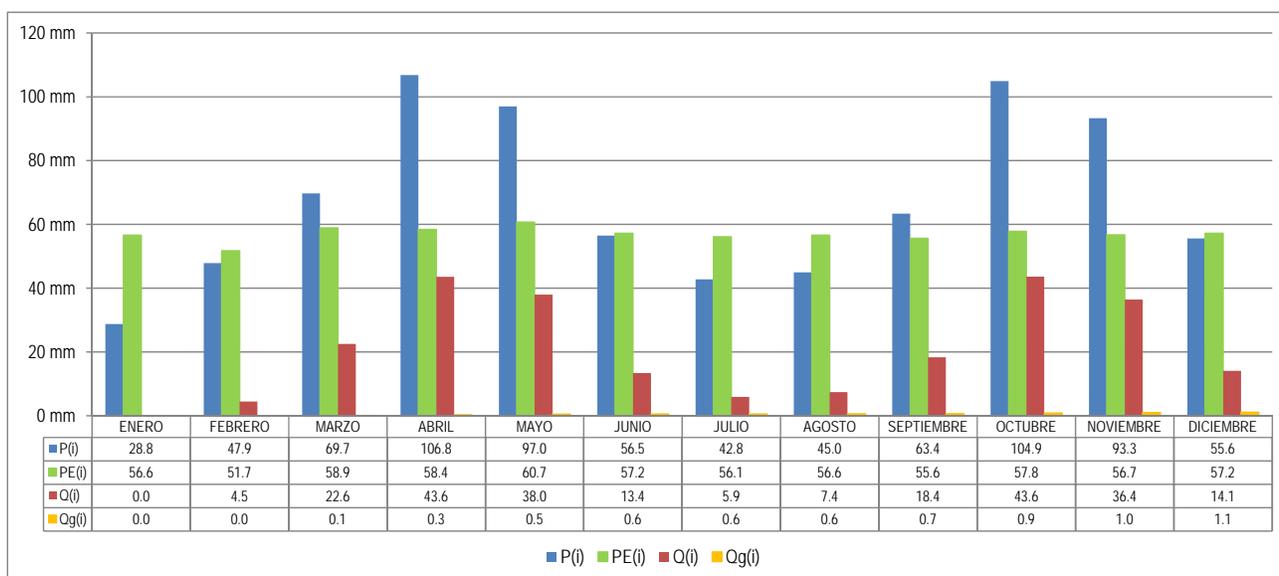
$$Q(1) = 0.00 \text{ m}^3/\text{s}$$

#### 4. APLICACIÓN DEL MODELO PARA LOS MESES SUBSIGUIENTES

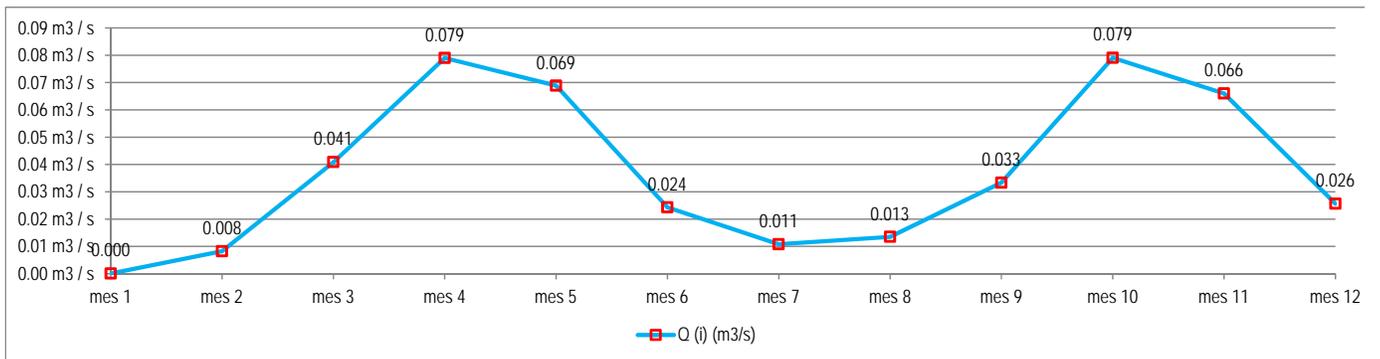
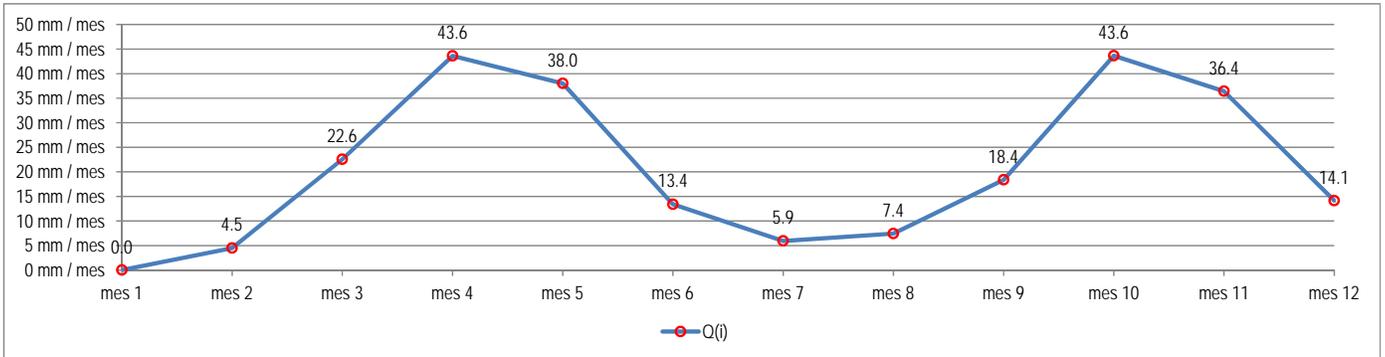
Empleando las anteriores ecuaciones para los datos de P y PE de los meses subsiguientes, el caudal total en dichos periodos de tiempo es:

MES	W(i)	Y(i)	S <sub>w</sub> (i)	ET(i)	R <sub>o</sub> (i)	R <sub>g</sub> (i)	S <sub>g</sub> (i)	Q <sub>g</sub> (i)	Q(i)	Q(i) (m <sup>3</sup> /s)
ENERO	28.8	28.8	9.3	19.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000
FEBRERO	57.2	49.7	17.7	32.0	4.5	3.0	3.0	0.0	4.5	0.008
MARZO	87.4	49.9	15.4	34.6	22.4	15.0	17.9	0.1	22.6	0.041
ABRIL	122.2	50.0	15.5	34.4	43.3	28.9	46.5	0.3	43.6	0.079
MAYO	112.5	50.0	14.8	35.1	37.5	25.1	71.0	0.5	38.0	0.069
JUNIO	71.3	49.9	15.9	34.0	12.9	8.6	79.1	0.6	13.4	0.024
JULIO	58.7	49.7	16.2	33.5	5.4	3.6	82.1	0.6	5.9	0.011
AGOSTO	61.2	49.8	16.0	33.7	6.8	4.6	86.1	0.6	7.4	0.013
SEPTIEMBRE	79.4	49.9	16.4	33.5	17.7	11.8	97.2	0.7	18.4	0.033
OCTUBRE	121.3	50.0	15.7	34.2	42.8	28.6	124.9	0.9	43.6	0.079
NOVIEMBRE	109.0	50.0	16.1	33.9	35.4	23.7	147.6	1.0	36.4	0.066
DICIEMBRE	71.7	49.9	15.9	34.0	13.1	8.7	155.2	1.1	14.1	0.026

#### 5. DISTRIBUCIÓN MENSUAL DE LA PRECIPITACIÓN, CAUDAL TOTAL Y CAUDAL DE AGUA SUBTERRÁNEA EN LA CUENCA



## 6. COMPARACIÓN GRÁFICA DEL CAUDAL OBSERVADO vs EL CAUDAL SIMULADO



APLICACIÓN DEL MODELO THOMAS POR LA FORMA INVERSA  
[ SIN CONOCER a, b, c, d, S<sub>w</sub> (0) y S<sub>g</sub> (0) ]

CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL MENSUAL "(PE (i)) EMPLEANDO EL MÉTODO DE THORNTHWAITE

$$PE = 16 * \left( \frac{10 * t}{I} \right)^a$$

$$I = \sum_{j=1}^{12} (i) = \sum_{j=1}^{12} \left( \frac{t}{5} \right)^{1.514}$$

$$a = (0.000000675 * I^3) - (0.0000771 * I^2) + (0.01792 * I) + 0.49239$$

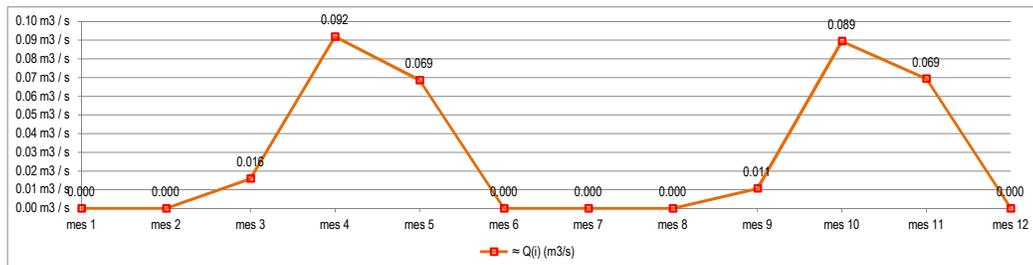
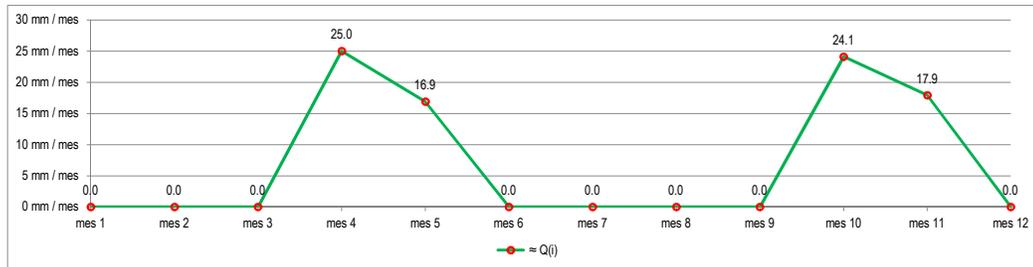
MES	t (i) (°C)	i <sub>j</sub>	I	a	PE (i) (mm) (SIN CORREGIR)	K (FACTOR DE CORRECCION)	PE (i) (mm) (CORREGIDA)
ENERO	13.3	4.39722	50.75897	1.29162	55.5	1.04	57.7
FEBRERO	13.1	4.30742			54.5	0.94	51.3
MARZO	13.3	4.39722			55.5	1.04	57.7
ABRIL	13.6	4.54827			57.1	1.01	57.7
MAYO	13.2	4.36722			55.2	1.04	57.4
JUNIO	12.5	4.02238			51.4	1.01	52.0
JULIO	12.3	3.91601			50.3	1.04	52.3
AGOSTO	12.1	3.82970			49.3	1.04	51.3
SEPTIEMBRE	12.1	3.80108			49.0	1.01	49.5
OCTUBRE	13.1	4.31737			54.6	1.04	56.8
NOVIEMBRE	13.5	4.50782			56.7	1.01	57.3
DICIEMBRE	13.2	4.34725			55.0	1.04	57.2

**Anexo 5. Hoja cálculo aplicación del método modelo T (Thornthwaite & Mather, 1955)**

Calculates Water Budget based on method of Thornthwaite & Mather  
Worksheet created by James Dyer, Ohio University

User will need to replace values for **Available Water Capacity (cell B12)** and **monthly Precipitation (C11-N11)** and **Potential Evapotranspiration (C12-N12)**  
All other values computed automatically.  
All units in mm  
Calculations begin for month where Storage (ST) is full  
Assumes decreasing availability of soil moisture (Mather 1974, curve C, WATBUG default)

	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	ANUAL	
<b>P(i)</b>	23.1	38.3	55.7	85.4	77.6	45.2	34.3	36.0	50.8	83.9	74.6	44.5	649	
<b>PE (i)</b>	56.6	51.7	58.9	58.4	60.7	57.2	56.1	56.6	55.6	57.8	56.7	57.2	684	
<b>P-PE</b>	-33.5	-13.4	-3.2	27.0	16.9	-12.0	-21.8	-20.6	-4.8	26.1	17.9	-12.7		
sum P-PE for dec		0	0	27	44	0	0	0	0	26	44	0		
sum P-PE	-34	0	0	27	44	0	0	0	0	26	44	0		
ST=full?	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	TRUE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	TRUE	FALSE		
ST-day1	0	0	0	1	3	3	0	0	0	1	3	3		
ST-day2	0	0	0	2	3	2	0	0	0	2	3	2		
ST-day3	0	0	0	3	3	2	0	0	0	3	3	2		
ST-day4	0	0	0	3	3	2	0	0	0	3	3	2		
ST-day5	0	0	0	3	3	1	0	0	0	3	3	1		
ST-day6	0	0	0	3	3	1	0	0	0	3	3	1		
ST-day7	0	0	0	3	3	1	0	0	0	3	3	1		
ST-day8	0	0	0	3	3	1	0	0	0	3	3	1		
ST-day9	0	0	0	3	3	1	0	0	0	3	3	1		
ST-day10	0	0	0	3	3	1	0	0	0	3	3	1		
ST-day11	0	0	0	3	3	1	0	0	0	3	3	1		
ST-day12	0	0	0	3	3	1	0	0	0	3	3	1		
ST-day13	0	0	0	3	3	0	0	0	0	3	3	0		
ST-day14	0	0	0	3	3	0	0	0	0	3	3	0		
ST-day15	0	0	0	3	3	0	0	0	0	3	3	0		
ST-day16	0	0	0	3	3	0	0	0	0	3	3	0		
ST-day17	0	0	0	3	3	0	0	0	0	3	3	0		
ST-day18	0	0	0	3	3	0	0	0	0	3	3	0		
ST-day19	0	0	0	3	3	0	0	0	0	3	3	0		
ST-day20	0	0	0	3	3	0	0	0	0	3	3	0		
ST-day21	0	0	0	3	3	0	0	0	0	3	3	0		
ST-day22	0	0	0	3	3	0	0	0	0	3	3	0		
ST-day23	0	0	0	3	3	0	0	0	0	3	3	0		
ST-day24	0	0	0	3	3	0	0	0	0	3	3	0		
ST-day25	0	0	0	3	3	0	0	0	0	3	3	0		
ST-day26	0	0	0	3	3	0	0	0	0	3	3	0		
ST-day27	0	0	0	3	3	0	0	0	0	3	3	0		
ST-day28	0	0	0	3	3	0	0	0	0	3	3	0		
ST-day29	0	0	0	3	3	0	0	0	0	3	3	0		
ST-day30	0	0	0	3	3	0	0	0	0	3	3	0		
ST-day31	0	0	0	3	3	0	0	0	0	3	3	0		
<b>(soil water storage) S(i)T</b>	0	0	0	3	3	0	0	0	0	3	3	0		
<b>delta ST</b>	0	0	0	3	0	-3	0	0	0	3	0	-3		
<b>AE</b>	23	38	56	58	61	48	34	36	51	58	57	47	567	
<b>(Deficit) D</b>	33	13	3	0	0	9	22	21	5	0	0	10	116	
ST 1st full	FALSE	FALSE	FALSE	TRUE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	TRUE	FALSE	FALSE		
Pre-S	0	0	0	27	17	0	0	0	0	26	18	0	88	
<b>(Surplus) S</b>	0	0	0	25	17	0	0	0	0	24	18	0	84	
<b>(Surplus) S (m³/s)</b>	0.000	0.000	0.016	0.092	0.069	0.000	0.000	0.000	0.011	0.089	0.069	0.000	0	
<b>Watershed area</b>														
= Q(i)	(L/s)	0.00	0.00	15.86	91.89	68.61	0.00	0.00	0.00	10.58	89.41	69.35	0.00	345.71
= Q(i) (m³/s)														
<b>BALANCED?</b>														
<b>FALSE</b>														
<b>P=AE+S:</b>	FALSE													
<b>PE=AE+D:</b>	TRUE													



Anexo 6. Resultados de las pruebas de calidad de agua en el humedal La Florida Sector 2

