

**EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA Y USOS DEL SUELO EN
LA CIÉNAGA GRANDE DE SANTA MARTA, JURISDICCIÓN DE LA
CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL MAGDALENA**

RICARDO ANDRÉS FLÓREZ MATUTE

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
PAMPLONA
2020**

**EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA Y USOS DEL SUELO EN
LA CIÉNAGA GRANDE DE SANTA MARTA, JURISDICCIÓN DE LA
CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL MAGDALENA**

**RICARDO ANDRÉS FLÓREZ MATUTE
1094281074**

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARA
OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO AMBIENTAL**

DIRECTORES

**MARÍA ESTHER RIVERA
PhD. EN HIDROLOGÍA**

**JESÚS RAMÓN DELGADO RODRÍGUEZ
MSc. EN GEOTECNIA**

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
PAMPLONA
2020**

Nota de Aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Pamplona, 23 de junio de 2020

*Evaluación de la Calidad del Agua y Usos del Suelo en la Ciénaga Grande de Santa Marta,
jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del Magdalena.*

Dedicatoria

A todos aquellos que día a día luchan por sus sueños y metas y que trabajan de la mano del Todo Poderoso para lograrlo.

A mi familia, mi más preciado tesoro: mi madre, Casta, el amor de mi vida, mi ejemplo e inspiración; mi padre, Ausberto, fuente de paciencia y tranquilidad, mi apoyo desde siempre; mi hermana, Angie, más conocida como “La Pochi”, mi luz y mi motor, mi fuerza y mi felicidad. Ustedes, que son, sin duda, mis mejores sonrisas y carcajadas.

A la PhD. María Esther Rivera, quien fue mi apoyo y mi guía durante todo este proceso y desde mucho antes, quien me aceptó en su equipo de trabajo y fue puliendo mi carácter tanto en lo personal como laboral. Ella, que fue mi luz en la oscuridad y mi calma en la tormenta, merece el reconocimiento de este logro.

A mi comunidad, Ricaurte, que me recibió siempre con cariño y confió en que llegaría tan lejos como me lo propusiera.

A mi segunda familia, Centinelas de Fe, que hizo de mi un mejor hombre en todo el sentido de la palabra y me enseñó el verdadero y amplio significado del amor. Ustedes, que me sacaron de mi zona de confort y me invitaron a decir “SI” al servicio de El Señor, les debo tanto y los amo infinitamente. #YoSoyCentinela.

A quienes considero mis directores espirituales desde el inicio, Sammy, Mafe, Jose y Natha, este logro también es suyo.

A mis amigos y familia, aquellos desde la infancia, el colegio y la universidad, Meli, Veru, Jan Franco, Julio, Ana M, Zele, Yule, Silvia, Wen, Luz (Ñaña), Daya, Walter (Pana), Susana (Comadre), Xele, Diana, Astrid (Caro), Eddy, entre otros, que me han ayudado a construir lo que soy, les debo este logro.

A Ricaurte Verde, el pequeño proyecto que se convirtió en mi orgullo.

A la Institución Educativa Departamental de Ricaurte, he aquí su hijo. Este logro es vuestro también.

Agradecimientos

A Dios, a quien le debo todo lo que soy, todo lo que quiero y todo lo que sueño, todo lo que tengo y todo lo que anhelo.

A mis padres, por siempre estar ahí de manera incondicional. A ustedes les debo todo.

A mi supervisora en la corporación, Eliana Álvarez, quien me enseñó muchas cosas y siempre estuvo presta a cualquier inquietud.

A la Corporación Autónoma Regional del Magdalena (CORPAMAG), por recibirme de la mejor manera y permitirme desarrollar el aprendizaje de la vida laboral.

Al Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (INVEMAR), por permitirme usar los datos de sus informes para la realización de este proyecto.

A mis directores, María Esther Rivera y Jesús Ramón Delgado Rodríguez, personas que admiro mucho y que son fuente de inspiración. Ustedes, que me han ayudado a crecer en todos los ámbitos y que confiaron en mi desde el primer momento, a ustedes no me queda más que decirles que gracias y desearles siempre miles de bendiciones de parte de Dios.

A Kathi María Gutiérrez Rinaldi, por apoyarme y ayudarme en la labor de mis pasantías y sacarme al mundo real, a ti te debo este trabajo.

A mis “hijas”, Meli, Xele y Angie, quienes estuvieron conmigo en cada paso de esta nueva etapa y alegraron por todo cuanto marchara bien, ustedes, que me relajaban y me apoyaron, ustedes, que me hicieron sentir muy afortunado de tener tanto amor y que se llenaron siempre de orgullo, a ustedes les digo ¡Gracias!

A mi quarteto maravilla, mis tres chicas, Daya, Luz y Wen, quienes siempre fueron mi apoyo y la mano guía por este sendero. A ustedes, que me demostraron el verdadero valor de la amistad, solo les puedo decir ¡Gracias y mil gracias!

CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN	4
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	6
2. JUSTIFICACIÓN	9
3. OBJETIVOS	11
3.1. OBJETIVO GENERAL.....	11
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	11
4. ALCANCES Y LIMITACIONES	12
4.1. ALCANCES	12
4.2. LIMITACIONES	12
5. MARCO REFERENCIAL.....	14
5.1. ANTECEDENTES	14
5.2. MARCO CONTEXTUAL	20
5.3. MARCO TEÓRICO.....	24
5.3.1. LA CALIDAD DEL AGUA Y SU RELACIÓN CON LA HIDROMETEOROLOGÍA	25
5.3.2. ÍNDICES DE CONTAMINACIÓN (ICO).....	27
5.3.3. ÍNDICE HOLANDÉS DE CALIDAD DEL AGUA (IHCA)	30
5.3.4. UNIVERSAL WATER QUALITY INDEX – UWQI (IDEAM).....	33
5.3.5. COBERTURA VEGETAL RIBEREÑA Y USOS DEL SUELO	34
5.4. MARCO CONCEPTUAL	36
5.5. MARCO LEGAL.....	38
6. METODOLOGÍA	40
6.1. CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LA ZONA DE ESTUDIO	42
6.2. DETERMINACIÓN DE LA COBERTURA VEGETAL RIBEREÑA Y USOS DEL SUELO EN LA ZONA DE ESTUDIO	43
6.3. CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA Y MICROBIOLÓGICA DE LA CALIDAD DEL AGUA DE LA ZONA DE ESTUDIO	44
6.4. DETERMINACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	47
7. RESULTADOS Y DISCUSION	49
7.1. CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LA ZONA DE ESTUDIO	49
7.2. DETERMINACIÓN DE LA COBERTURA VEGETAL RIBEREÑA Y USOS DEL SUELO EN LA ZONA DE ESTUDIO	49
7.3. CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA Y MICROBIOLÓGICA DE LA CALIDAD DEL AGUA DE LA ZONA DE ESTUDIO	56
7.4. DETERMINACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	72
8. CONCLUSIONES	83
9. RECOMENDACIONES.....	86
LISTA DE REFERENCIAS	87
ANEXOS	97

Lista de Ecuaciones

Ecuación 1. Cálculo del ICoPH.....	29
Ecuación 2. Cálculo del ICOSUS	30
Ecuación 3. Cálculo del UWQI	33
Ecuación 4. Modelo matemático obtenido para el cálculo del ICO	78

Lista de Figuras

Figura 1. Ubicación de la zona de estudio.	21
Figura 2. Observación del complejo lagunar conformado por la CGSM.	22
Figura 3. Ubicación de las nueve estaciones de monitoreo de la calidad del agua de la CGSM. .	45
Figura 4. Clasificación de la Cobertura Vegetal de la CGSM.	51
Figura 5. Mapa de Conflicto del Uso del Suelo de la CGSM.	52
Figura 6. Mapa de Geomorfología de la CGSM.	53
Figura 7. Mapa de Geología de la CGSM.	54

Lista de Gráficas

Gráfica 1. Progresión temporal del Índice de Contaminación por pH (ICOpH) de la CGSM.	57
Gráfica 2. Progresión temporal del Índice de Contaminación por Sólidos Suspendidos (ICOSUS) de la CGSM.....	59
Gráfica 3. Progresión temporal de los valores de Salinidad de la CGSM.	62
Gráfica 4. Progresión temporal de las concentraciones de Clorofila a y la Temperatura del agua de la CGSM.....	66
Gráfica 5. Progresión temporal de las concentraciones de Oxígeno Disuelto en el agua de la CGSM.	70
Gráfica 6. Progresión temporal de las concentraciones de Coliformes Totales en el agua de la CGSM.	71
Gráfica 7. Progresión temporal de la Precipitación sobre el área de la CGSM.	72
Gráfica 8. Progresión temporal de la Temperatura sobre el área de la CGSM.....	72
Gráfica 9. Progresión temporal de la Radiación Solar de Onda Larga y de Onda Corta sobre el área de la CGSM.	73
Gráfica 10. Progresión temporal de la Velocidad del Viento sobre el área de la CGSM.	73
Gráfica 11. Relación entre la Precipitación de la zona y los parámetros de Sólidos Suspendidos Totales, Oxígeno Disuelto y Clorofila a.	74
Gráfica 12. Relación entre la Precipitación de la zona y los parámetros de pH, Salinidad y Coliformes Totales.....	76
Gráfica 13. Diagrama de dispersión matricial de las variables en estudio.	76
Gráfica 14. Dispersión de los Residuales de Precipitación.....	79
Gráfica 15. Diagrama de dispersión parcial para la variable independiente de Precipitación.....	80
Gráfica 16. Curva de Regresión ajustada para la variable de Precipitación..	81
Gráfica 16. Probabilidad normal.....	81

Lista de tablas

Tabla 1. Significancia de los índices de contaminación (ICO).....	29
Tabla 2. Asignación de puntajes según el Sistema Holandés de Valoración de la Calidad del Agua para cuerpos receptores.	32
Tabla 3. Asignación de clases de calidad del agua según el Sistema Holandés de codificación por colores, basado en valores de PSO, DBO y $\text{NH}^+\text{-N}$	32
Tabla 4. Valores del ICA a partir del UWQI-IDEAM.....	34
Tabla 5. Normativa colombiana aplicable en la investigación.	39
Tabla 6. Resultados de los parámetros físico de la zona de estudio.	49
Tabla 7. Índice de Contaminación del agua por pH (ICOpH) de la CGSM	58
Tabla 8. Índice de Contaminación del agua de la CGSM por Sólidos Suspendidos (ICOSUS) ..	61
Tabla 9. Clasificación del agua de la CGSM de acuerdo con el grado de salinidad	64
Tabla 10. Clasificación del estado trófico de de la CGSM según la concentración de Clorofila.	68
Tabla 11. Coeficientes de correlación de Pearson para las variables en la construcción del modelo.....	78
Tabla 12. Medidas de bondad de ajuste del modelo.	82

Lista de Diagramas

Diagrama 1. Proceso metodológico..... 41

Lista de Anexos

Anexo 1. Análisis de patrones de los parámetros de calidad del agua de la estación Boca del caño Grande.....	97
Anexo 2. Análisis de patrones de los parámetros de calidad del agua de la estación Frente a Río Aracataca.....	97
Anexo 3. Análisis de patrones de los parámetros de calidad del agua de la estación Frente a Río Sevilla.	98
Anexo 4. Análisis de patrones de los parámetros de calidad del agua de la estación Frente a Río Fundación.....	98
Anexo 5. Coeficientes de correlación entre las variables hidrometeorológicas de la zona de estudio.....	99
Anexo 6. Valores del Índice de Contaminación del agua por pH (ICOpH) de la CGSM	99
Anexo 7. Valores del Índice de Contaminación del agua por Sólidos Suspendidos (ICOSUS) de la CGSM	100
Anexo 8. Dispersión de los Residuales de pH.	100
Anexo 9. Dispersión de los Residuales de Sólidos Suspendidos Totales.	100
Anexo 10. Dispersión de los Residuales de Temperatura del agua.	101
Anexo 11. Dispersión de los Residuales de Salinidad.	101
Anexo 12. Dispersión de los Residuales de Oxígeno Disuelto.....	101
Anexo 13. Dispersión de los Residuales de Clorofila a.....	102
Anexo 14. Dispersión de los Residuales de Coliformes Totales.	102
Anexo 15. Diagrama de dispersión parcial para la variable independiente de pH.	102
Anexo 16. Diagrama de dispersión parcial para la variable independiente de Sólidos Suspendidos Totales.....	103
Anexo 17. Diagrama de dispersión parcial para la variable independiente de Temperatura del agua.....	103
Anexo 18. Diagrama de dispersión parcial para la variable independiente de Salinidad.	104
Anexo 19. Diagrama de dispersión parcial para la variable independiente de Oxígeno Disuelto.	104
Anexo 20. Diagrama de dispersión parcial para la variable independiente de Clorofila a.....	104
Anexo 21. Diagrama de dispersión parcial para la variable independiente de Coliformes Totales.	105
Anexo 22. Curva de Regresión ajustada para la variable de pH.....	105
Anexo 23. Curva de Regresión ajustada para la variable de Sólidos Suspendidos Totales.	105
Anexo 24. Curva de Regresión ajustada para la variable de Temperatura del agua.	106
Anexo 25. Curva de Regresión ajustada para la variable de Salinidad.	106
Anexo 26. Curva de Regresión ajustada para la variable de Oxígeno Disuelto.	106
Anexo 27. Curva de Regresión ajustada para la variable de Clorofila a.	107
Anexo 28. Curva de Regresión ajustada para la variable de Coliformes Totales.	107

Resumen

La Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM), jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del Magdalena (CORPAMAG), ha presentado varios cambios a lo largo de los años, evidenciando notablemente la variación de la calidad del agua durante los diferentes periodos transcurridos. La CGSM tiene conexiones entre sí con el río Magdalena y el mar Caribe, a partir de lo cual se infiere una biodiversidad variante en cuanto a flora y fauna.

En la presente investigación se determina la calidad del agua de la misma mediante un análisis de cobertura vegetal y caracterización fisicoquímica del agua. Para ello, se analiza la cobertura vegetal ribereña, tipos de suelo, parámetros fisicoquímicos, microbiológicos y la información hidrometeorológica, obtenidos de la información suministrada por el INVEMAR. Con el uso de imágenes satelitales gratuitas y ArcGIS versión estudiantil, se obtuvieron los mapas del cambio de cobertura vegetal ribereña, los usos del suelo y las clasificaciones geomorfológicas y geológicas de la zona de estudio. El análisis de la información hidrometeorológica, parámetros físicos-químicos y microbiológicos se lleva a cabo en Excel, Infostat y SPSS, se determinaron los Índices de Contaminación (ICO) por pH (ICOpH) y Solidos Suspendidos (ICOSUS) de la CGSM, la clasificación del agua por Salinidad según Knox (2001), el estado trófico por Clorofila a (OCDE, 1982), análisis de la Temperatura del agua,

Evaluación de la Calidad del Agua y Usos del Suelo en la Ciénaga Grande de Santa Marta, jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del Magdalena.

concentraciones de Oxígeno Disuelto y Coliformes Totales, de acuerdo a los valores registrados por el Decreto 1076 de 2015.

Con el análisis estadístico se determinó la relación existente entre las variables hidrometeorológicas y los ICO, procediendo a la obtención de un modelo matemático y la aplicación de cinco medidas de bondad de ajuste, entre ellas, la Eficiencia de Nash-Sutcliffe. Se identificó que la cobertura vegetal predominante en el área inmediatamente conjunta a la CGSM es el manglar, sin embargo, en cuestión de extensión superficial, los potreros y pastizales constituyen la cobertura y uso del suelo que predomina. Por su parte, las clasificaciones geológicas y geomorfológicas indican que el área de estudio corresponde a llanuras de inundación con alto contenido de materia orgánica. El ICOpH y el ICOSUS indican que el agua, en la gran mayoría de muestreos, no presenta ninguna contaminación. Además, de que el oxígeno disuelto, en la mayoría de estaciones y muestreos, es óptimo para la preservación de la flora y fauna. Sin embargo, los análisis de salinidad y concentraciones de clorofila a indican que el agua de la CGSM es salobre-marina y con alto grado de eutrofización (mesotrófico-eutrófico). Es de apuntar, que las condiciones más críticas se presentaron en los periodos en que el aporte de agua dulce fue mínimo (menos lluvias y por lo tanto menores caudales de los ríos y caños). Se obtuvo un modelo matemático lineal múltiple del ICO en función de la Precipitación, los Sólidos Suspendidos Totales, la Clorofila a, los Coliformes Totales, el pH, la Salinidad, la Temperatura del agua y el Oxígeno Disuelto, para el cual, la Eficiencia de Nash-Sutcliffe arrojó un ajuste de 1.

A partir de lo anterior, se concluye que el agua de la CGSM es de buena calidad, manteniendo las condiciones necesarias para la preservación y conservación de la flora y fauna y

Ricardo Andrés Flórez Matute

la realización de las diferentes actividades antrópicas. Además, el modelo obtenido es óptimo y funcional para las condiciones de la CGSM.

Palabras clave: Calidad del Agua, ICO, ICOpH, ICOSUS, usos del suelo.

INTRODUCCIÓN

De acuerdo con Robledo, Vanegas & García (2014), la protección de los recursos hídricos resulta ser positiva para los diferentes ecosistemas y la salud del ser humano, por lo que se considera como parte de una serie de medidas conservacionistas que conducen al desarrollo sostenible de una determinada región o país, además de que la recuperación y conservación de las características físico- químicas y biológicas de los cuerpos hídricos es de carácter fundamental para el mismo.

La presente investigación se lleva a cabo, como su nombre lo indica, en la Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM), al Noreste del departamento del Magdalena. La CGSM es uno de los cuerpos hídricos que hacen parte de la jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del Magdalena (CORPAMAG), la cual es la máxima autoridad ambiental en dicho departamento (CORPAMAG, 2020).

Así mismo, la CGSM hace parte de un complejo ecosistema conformado por varios cuerpos dulceacuícolas como el río Fundación, la ciénaga de Tasajera, entre otros, en el que se da el intercambio de agua con el mar Caribe, por lo cual se infiere la presencia de salinidad dentro de la misma. Este cuerpo hídrico, que es uno de los más importantes de Colombia y el más grande de la costa Caribe, abarcando una gran extensión de espejo de agua y un volumen de agua (CORPAMAG, 2020).

Por lo anterior, la finalidad de este trabajo es obtener la evaluación de la calidad del agua en la CGSM aplicando los métodos fisicoquímicos indicadores de contaminación (ICOpH e ICOSUS). Además, del análisis de la cobertura vegetal, usos y clasificación de suelos y el análisis de variables hidrometeorológicas de la zona de estudio.

A lo largo del documento se encuentra la siguiente información: 1. Planteamiento del Problema, en el cual se establece de manera clara la problemática presentada en la CGSM y que da origen a la presente investigación. 2. Justificación, por medio de la cual se dan a conocer las razones por las cuales es factible la realización del dicho estudio. 3. Objetivos, que establecen los propósitos de la presente investigación en cuento a las acciones a llevar a cabo. 4. Alcances y limitaciones. 5. Marco referencial, el cual está compuesto por unos antecedentes, marco contextual, marco teórico, marco conceptual y marco legal. 6. Metodología. 7. Resultados y discusión. Por ultimo, 8. Conclusiones y recomendaciones.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La calidad del agua es uno de los temas más complejos y de mayor importancia a nivel mundial, siendo este el más atendido en investigaciones debido a la importancia que tiene en la evolución de la calidad de la salud humana y del medio ambiente. La evaluación de la calidad del agua se puede llevar a cabo por diferentes metodologías, ya sea por parámetros fisicoquímicos, biológicos o microbiológicos, propiciando cada uno de ellos características propias del agua en estudio y siendo los indicadores del estado del agua tanto al momento de tomar la muestra como de manera global o histórica.

Los parámetros fisicoquímicos son, en realidad, los más utilizados a lo largo de los años, esto debido que pueden arrojar información inmediata que permita determinar la calidad del agua en cuestión. Sin embargo, no se puede afirmar que son los más idóneos para llevar a cabo una caracterización concreta del entorno acuático, pues existen métodos que permiten analizar, desde una perspectiva espaciotemporal, el comportamiento de la zona de estudio, tal como la bioindicación mediante los macroinvertebrados presentes. Además, es de carácter fundamental tener en cuenta la composición geológica del lugar, puesto que esta tiene una gran incidencia en el comportamiento de la calidad del agua de los cuerpos dulceacuícolas.

A nivel mundial y local son muchos los investigadores que optan por buscar diferentes métodos para determinar de manera cualitativa y cuantitativa la calidad del agua en diferentes cuerpos hídricos (lóticos o lénticos). Como prueba de esto, Figueroa, *et al.*, (2003) realiza un

Ricardo Andrés Flórez Matute

análisis de la distribución espacial de la macrofauna bentónica en la cuenca del río Damas (Sur de Chile), a partir del cual pretende llevar a cabo la evaluación de la calidad del agua mediante el método del Índice Biótico de Familias (IBF o FBI, por sus siglas en inglés). En Manabí (Ecuador), Aveiga Ortiz, *et al.*, (2019) determinan las variaciones fisicoquímicas de la calidad del agua del río Carrizal, estableciendo 20 estaciones de monitoreo a lo largo del mismo, donde se estudiaron las siguientes variables fisicoquímicas: pH, temperatura, turbidez, dureza total (DT), sólidos totales (ST), sólidos suspendidos (SS), alcalinidad, oxígeno disuelto (OD), conductividad eléctrica (CE), potencial REDOX (POR) y tenores de sulfatos. Por su parte, Caho-Rodríguez & López-Barrera (2017) determinan el Índice de Calidad del Agua para el Humedal Torca-Guaymaral (Bogotá, Colombia), tendiendo como base 11 variables o parámetros fisicoquímicos (pH, OD, Conductividad, SST, DQO, DBO, Fósforo Total, Coliformes Fecales, Grasas y Aceites, Tensoactivos y NTK), empleando con ellas las metodologías de UWQI-IDEAM (Universal Water Quality Index) y CWQI-SDA (Canadian Water Quality Index). Asimismo, Sánchez Molano & García (2018) determinan el índice BMWP/Col (de Roldán Pérez, 2003), mediante la utilización de macroinvertebrados como bioindicadores de la calidad de agua, en el cauce del río Guachicos (Pitalito, Huila – Colombia), haciendo la clasificación taxonómica por especies, familias, género, y orden.

Muchos de los cuerpos de agua que se encuentran próximos a la costa norte de Colombia están interconectados con otros sistemas o cuerpos hídricos adyacentes, tal como es el caso de la CGSM, la cual tiene incidencia y transporte de material con el río Magdalena y el mar Caribe. A

Evaluación de la Calidad del Agua y Usos del Suelo en la Ciénaga Grande de Santa Marta, jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del Magdalena.

partir de lo anterior, se infiere que esta es un complejo ecosistema dulceacuícola con propiedades salinas entre sí. La CGSM ha sido estudiada de diferentes maneras y se ha evidenciado la variación de la calidad del agua de la misma a lo largo de los diferentes procesos transcurridos. No obstante, no se ha determinado la calidad del agua a partir de los índices de contaminación ICO, metodología colombiana que mide el grado de contaminación del entorno acuático.

Con lo anterior surgen los siguientes interrogantes; ¿Cuál es el estado actual del agua de la CGSM? ¿Se encontrarán índices de contaminación del agua en la CGSM? ¿Los parámetros fisicoquímicos tendrán relación con la variación hidrometeorológica, la cobertura de la tierra y los suelos de la zona?

2. JUSTIFICACIÓN

La presente investigación tiene como finalidad la evaluación o determinación de la calidad del ecosistema acuático que es la CGSM, que, como se dijo anteriormente, pretende llevar, de manera paralela, dos procesos que permitan obtener evaluación. Lo anterior, es de gran importancia para la comunidad científica y población general, dado que en la región de la costa Caribe no se cuenta con mucha información acerca de la evaluación de la calidad del agua a partir de estos dos métodos en un cuerpo de agua lenticó.

Por otra parte, contribuye a la generación de conocimiento en cuanto a la práctica de nuevos métodos para la determinación de la calidad del agua en cuerpos lénticos como lo es la CGSM, tal como son los ICO, una metodología colombiana poco aplicada y bastante contundente. Además, representa un desafío tanto para el autor como para el lector, puesto que es necesario tener en cuenta la complejidad del sistema al encontrarse integrado por diferentes conexiones fluviales entre otras ciénagas o lagunas y la CGSM, y, el transporte de material desde el río Magdalena y la Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM) hacia la misma (En el caso del río Magdalena, en algunos periodos funciona de manera inversa).

Por último, esta investigación sirve de base para la Corporación Autónoma Regional del Magdalena (CORPAMAG), para un posterior estudio integral de la CGSM donde se permita

Evaluación de la Calidad del Agua y Usos del Suelo en la Ciénaga Grande de Santa Marta, jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del Magdalena.

observar el comportamiento de la misma, comprendiendo la interacción de los diferentes sistemas vecinos. Además, aporta conocimiento a la misma comunidad local y científica, tales como los estudiantes de las diferentes universidades interesados en este ecosistema.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo general

Evaluar la calidad del agua en la Ciénaga Grande de Santa Marta, jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del Magdalena.

3.2. Objetivos específicos

- Caracterizar física la zona de estudio.
- Determinar la cobertura vegetal ribereña y usos del suelo en la zona de estudio.
- Caracterizar fisicoquímica y microbiológicamente el agua en la zona de estudio.
- Determinar la calidad del agua de la zona de estudio.

Evaluación de la Calidad del Agua y Usos del Suelo en la Ciénaga Grande de Santa Marta, jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del Magdalena.

4. ALCANCES Y LIMITACIONES

4.1. Alcances

Con la presente investigación se determinó el estado de la calidad del agua de la Ciénaga Grande de Santa Marta a partir del análisis de los ICO, se identificó a qué tipo de agua corresponde el medio de la CGSM en cuanto al grado de salinidad que esta contenga y de acuerdo con los parámetros estudiados por el INVEMAR en el período de octubre de 2018 a septiembre de 2019. Además, se determinó el tipo de cobertura vegetal riparia y próxima a la zona de la CGSM. Luego, se identificaron las unidades geomorfológicas y geológicas de la zona de estudio. Por último, se realizó un análisis estadístico de las variables hidroclimatológicas y los parámetros fisicoquímicos de los cuales se tenga información.

4.2. Limitaciones

Una de las limitantes fue la falta de información en la zona de estudio, tal como curvas de nivel. Así mismo, la Información no disponible para descarga en plataformas como el SIG-OT, tales como curvas de nivel de la zona. De igual manera, existe poca información en cuanto al desarrollo de los ICO.

Por otro lado, los datos faltantes de parámetros fisicoquímicos en el monitoreo realizado por el INVEMAR constituyen una limitación en cuanto al análisis de información en el presente trabajo, esto dado que superan el 10% que establece como límite la OMM.

5. MARCO REFERENCIAL

5.1. Antecedentes

A continuación, se muestran algunos de los estudios sobre la temática que en la presente pasantía investigativa se aborda. Estos estudios fueron elegidos de manera que representen una explicación acerca de las diferentes metodologías que se pueden aplicar para la evaluación de la calidad del agua mediante los diferentes parámetros o variables (físicoquímicas, biológicas o microbiológicas).

Seiler, *et al.*, (2015), realizaron la evaluación de la incidencia hidrológica sobre la variación de la calidad del agua en la laguna de Patos (una laguna costera en el sur de Brasil) a través de modelos numéricos. Los autores evaluaron la variabilidad espacial y temporal de la clorofila-a y los nutrientes inorgánicos disueltos en el agua durante los periodos de La Niña (2006) y El Niño (2011) para determinar si la variabilidad hidrológica afecta las variables de calidad del agua de la misma, mediante la utilización del modelo MOHID2D.

Así mismo, Belal, El-Sawy & Dar (2016), llevaron a cabo un estudio estableciendo la relación de la calidad del agua con la distribución de la fauna macro-bentónica en el lago Timsah y la laguna Occidental (Egipto), aplicando el índice de Equidad (E'). Los autores establecen que la fauna macro-bentónica se considera como un buen indicador para los cambios ambientales de cualquier ecosistema acuático

Por otra parte, Yáñez (2018), realizó un estudio en el lago San Pablo (Ecuador), determinando el grado de contaminación del agua mediante los parámetros fisicoquímicos de los afluentes y efluente del mismo (pH, Conductividad, OD, Temperatura, sólidos totales, suspendidos y disueltos, nitratos, nitritos, fosfatos, DQO, coliformes totales y metales pesados- Cd, Co, Ni, y Pb-), logrando inferir que uno de los afluentes presenta calidad mala en el agua, y el otro, calidad media, al igual que el efluente.

De acuerdo con Machado, *et al.*, (2018), en el análisis de macroinvertebrados bentónicos e índices biológicos se evaluó la calidad del agua del Río Sardinas (Ecuador), enfocándose en la entomofauna acuática presente durante las épocas lluviosa y seca. Además, se realizó un análisis de componentes principales (PCA). Mientras que, Baylón, *et al.*, (2018), evaluaron la calidad del agua de cinco lagunas del Perú, basándose en la abundancia, riqueza y diversidad del fitoplancton. Además, se evaluaron parámetros fisicoquímicos (pH, conductividad, temperatura y metales pesados). Aplicaron el índice de Shannon-Wiener y el Índice Diatómico General (IDG), logrando identificar con ello que cuatro de ellas presentaron aguas de mala calidad, mientras que la otra presentó calidad biológica óptima. De igual manera, Tapia, *et al.*, (2018), estimaron la diversidad y abundancia de invertebrados bentónicos en lagunas altoandinas del Perú y determinar su posible uso como indicadores biológicos. De las dieciséis lagunas muestreadas, se pudieron determinar cinco en estado moderado, dos en pésimo estado y las nueve restantes como mala, según los valores arrojados por el ABI. Sin embargo, Huanaco, *et al.*, (2018), llevó a cabo

Evaluación de la Calidad del Agua y Usos del Suelo en la Ciénaga Grande de Santa Marta, jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del Magdalena.

la evaluación de la diversidad del fitoplancton de la laguna La Viuda (Lima, Perú), mediante parámetros fisicoquímicos (temperatura, conductividad, pH, salinidad, fosfato, nitrato, nitrógeno, fósforo, metales totales y dureza) y el método de Lackey para el conteo de fitoplancton. Además, se tuvieron en cuenta la abundancia y los índices alfa.

Aveiga Ortiz, *et al.*, (2019), llevaron a cabo un estudio en el río Carrizal (Manabí, Ecuador), implementando el análisis de las variaciones fisicoquímicas y la incidencia de las diferentes posiciones geográficas a lo largo del río. Ante los resultados de la correlación entre los parámetros y la geografía, se calculó un nuevo índice de calidad de agua denominado índice de dureza, pudiendo identificar la influencia de las actividades antropogénicas.

Audouit, *et al.*, (2019), realizaron en Francia una comparación de la representación social de la calidad del agua en lagunas costeras (laguna de Palavas y laguna de Biguglia) con el uso de la normativa de indicadores ecológicos. A partir de lo anterior, surge la incertidumbre de si existe congruencia entre a calidad del agua definida por los criterios ambientales y las representaciones sociales de la laguna y las poblaciones locales. Los residentes de la zona declararon que la calidad del agua es moderada-buena y que la biodiversidad es buena-alta, mejor incluso que en el pasado; sin embargo, se presentan algunas oposiciones entre estas declaraciones y las determinaciones ecológicas.

En la laguna de Nador (Marruecos), Oujidi, *et al.*, (2020), la identificaron como un humedal costero que está sujeto tanto a las presiones de la cuenca como a las escorrentías provenientes de la contaminación doméstica, agrícola, industrial y minera. En esta laguna se

utilizaron análisis estadísticos descriptivos y multivariados para evaluar su estado ambiental a través de parámetros fisicoquímicos, nutrientes y metales traza.

En Caucasia, Antioquia, Velázquez, Jiménez & Sepúlveda (2007), determinaron la calidad del agua de la Ciénaga Colombia mediante la medición de 22 parámetros físicos, químicos y biológicos y la evaluación de fitoplancton. El análisis de los datos se llevó a cabo mediante índices de estado trófico, así como análisis estadísticos de componentes principales y análisis de correspondencia canónica. A partir de estos análisis se pudo concluir la calidad eutrófica del agua.

Por otra parte, Pastrán Pastrán (2017) desarrolló un estudio en el río Suárez, (Chiquinquirá, Boyacá) donde llevó a cabo la evaluación de la calidad del agua del mismo utilizando macroinvertebrados bentónicos. A partir de la metodología del índice de Shannon-Weaver se determinó la diversidad biológica y se realizó una comparación con los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del agua misma. Al analizar y clasificar los macroinvertebrados hasta el nivel de género, se evaluó la calidad del agua de este cuerpo hídrico y se halló una gran relación con los resultados obtenidos mediante el análisis de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos en cada uno de los puntos de muestreo. Así mismo, Caballero H, *et al.*, (2017), realizaron un análisis de la calidad del agua mediante la utilización de bioindicadores en la quebrada Jurado (Pamplona, Norte de Santander). Se aplicó el índice

Evaluación de la Calidad del Agua y Usos del Suelo en la Ciénaga Grande de Santa Marta, jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del Magdalena.

BMWP/Col y se determinó que las aguas de este cuerpo hídrico son moderadamente contaminadas.

En el caso del río Teusacá (afluente del río Bogotá, Colombia), Cárdenas-Castro, *et al.*, (2018), llevaron a cabo la aplicación del Índice Biótico de Familias de macroinvertebrados para su caracterización, desarrollado en la parte alta y baja de la cuenca. Se obtuvo la correlación del IBF con algunas variables fisicoquímicas (COT, fosfatos, sulfatos, nitratos, nitritos) e índices de diversidad estudiados. Mientras que, Murillo-Montoya, *et al.*, (2018), realizó un estudio donde utilizó macroinvertebrados acuáticos para determinar de la calidad del agua de la quebrada Santo Tomas (Colombia) aplicando los índices BMWP/Col y ETP y obtuvieron que las aguas de la quebrada son limpias o libres de contaminación, sin embargo, el índice ASPT indica que el estado de las aguas se encuentra ligera y moderadamente contaminadas.

Por otra parte, Núñez & Fragoso-Castilla (2019), llevaron a cabo un estudio donde hacen uso de macroinvertebrados acuáticos como bioindicadores de la calidad del agua adaptando el índice BMWP/Col a las condiciones de la Ciénaga Mata de Palma (Colombia). Además del índice BMWP/Col, se utilizaron los índices ecológicos de Shannon, Simpson, Margalef y Pielou, con el fin de tener una mayor certeza de la calidad del agua al momento de implementar acciones de preservación, monitoreo y gestión del ecosistema acuático. En periodos de lluvias y en periodos secos, la definición de la calidad del agua se da como ligeramente contaminadas y muy contaminadas, respectivamente.

En el caso de la zona de estudio, según Mancera & Vidal (1994), la presencia y el incremento de microalgas en la CGSM, algunas de ellas altamente tóxicas, está relacionado con la muerte masiva de peces ocurrida durante uno de los eventos presentados en 1994. No obstante, el incremento de las concentraciones de fósforo y florecimiento de nano y picoplancton, pueden ser responsables también de tal situación. Posteriormente, Botero & Mancera (1996), presentan una síntesis de los cambios de origen antrópico ocurridos durante el periodo de 1956-1994 en la CGSM, teniendo en cuenta las variaciones de fauna, flora, geomorfología y las condiciones fisicoquímicas de la misma. Los autores identifican fuertes impactos en los suelos, muerte masiva de los bosques de manglar, una disminución significativa de la diversidad y abundancia de peces, aves y moluscos, además del aumento progresivo del agua. Además, se identifica el aumento paulatino de la salinidad, material suspendido y eutrofización en el agua.

De acuerdo con PROCIÉNAGA (1995a), Rivera, *et al.*, (2006) y el INVEMAR (2019a), es muy notable el cambio que ha tenido la CGSM desde las alteraciones realizadas en los años 1956-1999, durante la construcción de la vía Ciénaga-Barranquilla, conllevando cambios tanto en el componente biótico como en el componente abiótico, donde se puede destacar la notable pérdida de alrededor de 25400 ha de bosque de manglar.

De La Hoz (2004) evaluó la dinámica del fitoplancton de la CGSM y determinó la existencia de cuatro temporadas, basándose en las amplias variaciones de los valores de salinidad en la misma, donde el incremento de las cantidades de sal se vio estrechamente relacionado con

Evaluación de la Calidad del Agua y Usos del Suelo en la Ciénaga Grande de Santa Marta, jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del Magdalena.

altas densidades de fitoplancton, el cual presentó, además, cambios temporales relacionados con las condiciones meteorológicas, los aportes fluviales y marinos a la Ciénaga y el dragado del caño Clarín.

Por otro lado, Severiche, Barreto & Acevedo (2013) estudiaron el efecto de las precipitaciones sobre la calidad del agua en la CGSM durante el periodo 2006–2009, aplicando el indicador ambiental de calidad de aguas marino-costeras para la preservación de flora y fauna y se determinó que las lluvias, durante el periodo de estudio, tienen como características que la época seca se presenta durante el mes de febrero y la mayor cantidad de lluvias se concentra en octubre. Además, los descriptores de calidad para el estado de naturalidad del sistema estuarino se ubicó entre los rangos bueno y excelente.

5.2. Marco contextual

La Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM), al norte del departamento del Magdalena (Figura 1). Limita al Norte con Caño Grande y el Municipio de Pueblo Viejo; al Sur con el Municipio de Pueblo Viejo; al Este con parte de los Municipio de Pueblo Viejo y Ciénaga; y, al Oeste con el Municipio de Sitio Nuevo y Pueblo Viejo. La CGSM tiene como coordenadas geográficas centrales $10^{\circ}51'57''$ Norte y $74^{\circ}23'38''$ Oeste, con una altitud de un (1) msnm, con respecto al Atlántico.

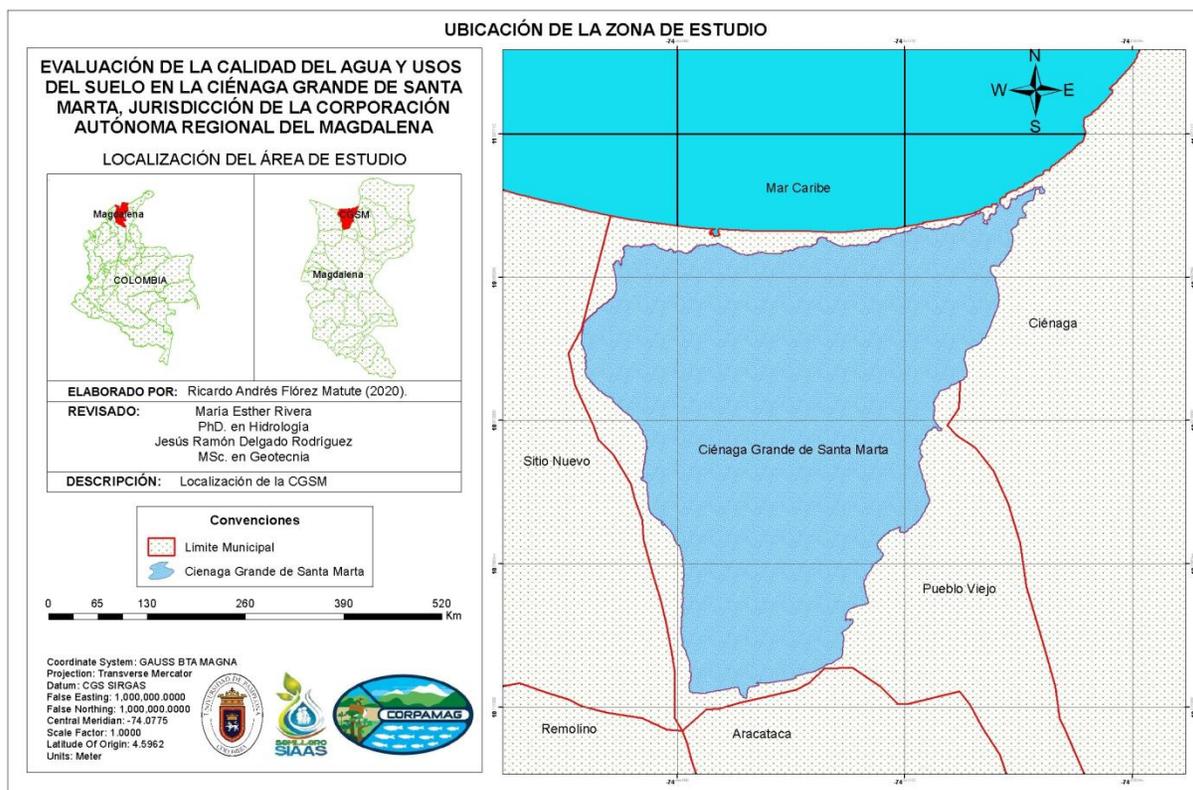


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio. Fuente: Elaborado en ArcGIS por Flórez Matute (2020) a partir de la información del SIG-OT (2018).

De acuerdo con Botero & Botero (1989), la CGSM hace parte de un complejo ecosistema conformado por numerosos canales, pantanos de manglar y lagunas, entre los cuales se encuentra los caños Grande, San Joaquín y Pájaro y las ciénagas Alfandoque, del Chino, La Auyama y de Pajalar (Figura 2), y es la más grande de Colombia y una de las más importantes en el Caribe. Según PROCÍENAGA (1995b), esta pertenece al delta exterior del río Magdalena y, actualmente, abarca una extensión de 430 Km², una profundidad media de 1.8 m y un volumen estimado de agua de 722×10^6 m³ (CORPAMAG, 2020).

Evaluación de la Calidad del Agua y Usos del Suelo en la Ciénaga Grande de Santa Marta, jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del Magdalena.

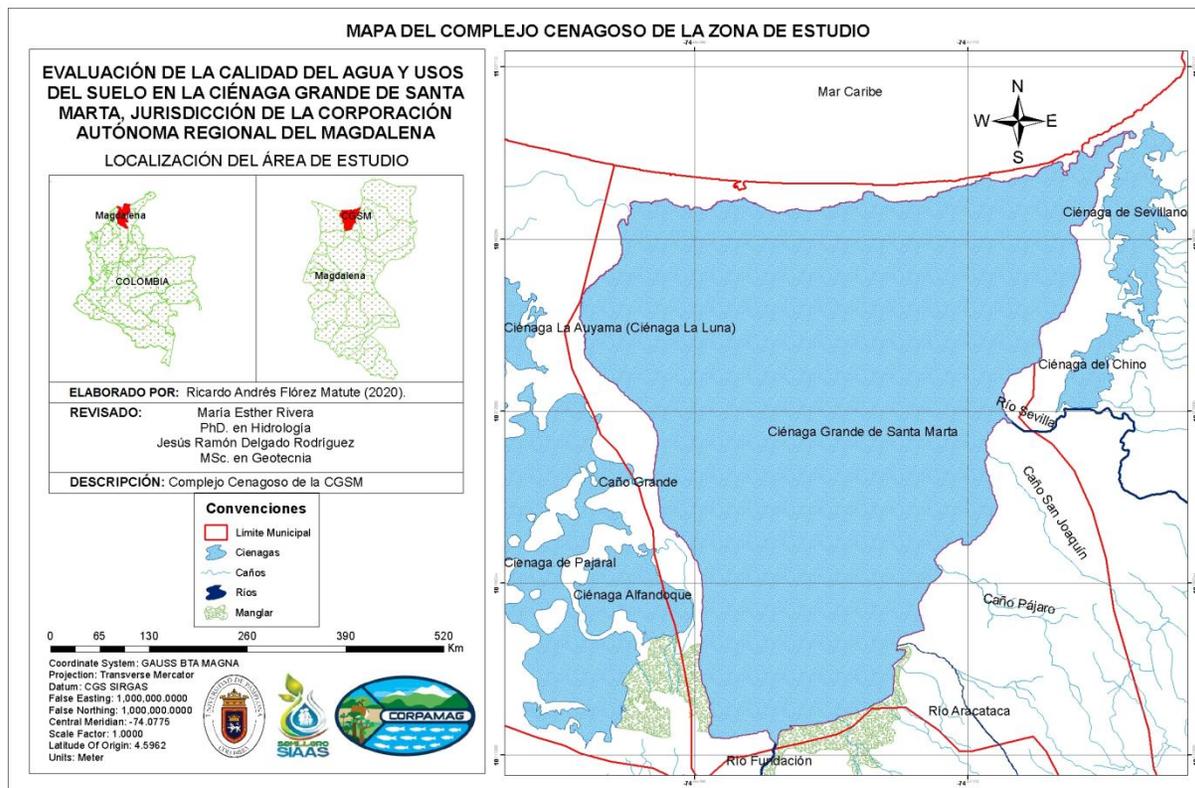


Figura 2. Observación del complejo lagunar conformado por la CGSM. Fuente: Elaborado en ArcGIS por Flórez Matute (2020) a partir de la información del SIG-OT (2018).

De la Figura 2, la CGSM se caracteriza por ser una amplia confluencia de los ríos y caños que bajan desde la Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM) hasta desembocar sus aguas en este complejo lagunar (río Fundación, río Aracataca, río Sevilla, entre otros); del río Magdalena y del mar Caribe (INVEMAR, 2019). Así mismo, se aprecia que cualquier alteración o afectación a cualquiera de los componentes del sistema lagunar puede afectar en gran medida toda la región, de manera que este se comporta como un sistema interconectado entre sí (INVEMAR, 2016). Mientras tanto, de una manera muy particular, Múnera, *et al.*, (2003), indican que la conceptualización del modelo representado por la CGSM consiste en un sistema de elementos lineales, bien llamados canales, y elementos tipo embalse, refiriéndose a las ciénagas, los cuales

intercambian agua y sustancias disueltas en entre sí y con entidades físicas externas tales como la atmósfera, el río Magdalena, las cuencas que drenan la vertiente occidental de la Sierra Nevada de Santa Marta y el mar Caribe.

La Ciénaga Grande de Santa Marta es la laguna costera más grande y productiva del Caribe Colombiano. En su extremo sur, un territorio lleno de manglares, ciénagas, y bosques anfibios con fuertes influencias de aguas marinas se encuentra el bello Santuario de Fauna y Flora, donde el clima es cálido y seco y la temperatura promedio es de 29°C y una precipitación media de 1000 mm anuales; los periodos secos se presentan entre noviembre y abril y entre julio y agosto y los periodos lluviosos entre mayo y junio y entre septiembre y octubre (COLPARQUES, 2020).

La CGSM es un complejo sistema que comprende aparte de los componentes biótico y abiótico, el socioeconómico y cultural, debido que es el hábitat de muchas personas tanto dentro como alrededor de ella, además de ser el sustento de pescadores, principalmente, por lo tanto, la calidad del agua en tal entorno representa una prioridad a tratar, de manera que en ella se da una alta producción primaria, generando alrededor de 1000 g C/m²/año, dada principalmente por el fitoplancton (Hernández, 1986, citado por De La Hoz, 2004).

Evaluación de la Calidad del Agua y Usos del Suelo en la Ciénaga Grande de Santa Marta, jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del Magdalena.

5.3. Marco teórico

En los países desarrollados y en vías de desarrollo, el control de la calidad del agua en los diferentes cuerpos hídricos se realiza mediante la aplicación de alguno de los métodos de análisis de la misma (físicoquímicos, biológicos y microbiológicos) o ya sea por la combinación de estos entre sí (Álvarez, 2005). De manera general, la evaluación de la calidad del agua se ha venido realizando, mediante los análisis físicoquímicos. Sin embargo, muchos países han aceptado la puesta en práctica de los macroinvertebrados para determinar la calidad del agua de los cuerpos acuáticos.

Los análisis físicoquímicos son, hasta la actualidad, el único método que existe para llevar a cabo la identificación y cuantificación de contaminantes en los cuerpos de agua, sin embargo, únicamente proporcionan los valores de la calidad del agua en el momento en que la muestra fue tomada, cuyos valores se comparan con los contemplados en la norma, donde se encuentran definidos de manera estándar dependiendo de su uso o fin. Por el contrario, los análisis microbiológicos y biológicos se utilizan para complementar el análisis físicoquímico sin llegar a identificar con ellos el o los agentes contaminantes existentes (al menos no con exactitud). La ventaja que presentan estos análisis es, básicamente, que no se limita al momento de la toma de la muestra, debido que los organismos vivos presentan adaptaciones evolutivas al medio en que se encuentran y por ello permiten identificar los cambios ocurridos en los cuerpos hídricos a lo largo del tiempo (Álvarez, 2005). De acuerdo con Gaufin & Tarzwell (1952), Hynes, (1959) y Resh, *et al.*, (1995), los países de Norte América y la Unión Europea se han caracterizado por ser los líderes o pioneros en la práctica de caracterizar los ecosistemas

acuáticos mediante el uso de macroinvertebrados y las diferentes metodologías o índices existentes.

5.3.1. La Calidad del Agua y su Relación con la Hidrometeorología

De acuerdo con Carrillo, Rivera & Sierra (2018), el agua y el saneamiento tienen un papel crucial en la transmisión de enfermedades, así mismo las condiciones climatológicas afectan directamente a los ecosistemas acuáticos, “El clima consiste en las características meteorológicas en una determinada área geográfica durante largos períodos de tiempo, generalmente años, mientras que el tiempo son las fluctuaciones atmosféricas, como la temperatura, la precipitación y el viento en períodos de horas o días.

Para Fricas J y Martz T (2007) citado por Carrillo, Rivera & Sierra (2018), América Latina y el Caribe tienen diferentes zonas climáticas que elevan su exposición a desastres naturales de orden climático. Desde 1970 hasta 1999, más del 70% de los desastres en la región fueron meteorológicos, y los más importantes se debieron a inundaciones”, debido a esto, se deben tener en cuenta las condiciones atmosféricas al momento de realizar un análisis de calidad y cantidad de agua, las variables climáticas que generalmente se deben incluir para el análisis son: las precipitaciones, la temperatura, la radiación solar, y la velocidad y dirección del viento.

El efecto de la precipitación se observa en el incremento del caudal generando cambios en la turbidez del agua, también se observa su efecto en miembros de los ecosistemas acuáticos, los cuales reciben dichos impactos, razón por la cual es de gran importancia conocer el comportamiento espacio-temporal de las precipitaciones. De igual manera, la temperatura, y de acuerdo con Icaria (2007) citado por Carrillo, Rivera & Sierra (2018), es clave para los seres vivos, ya que los seres vivos ocupan una franja de temperaturas que oscila entre los -18°C y los 50°C .

Para Custodio & Díaz (2001), citado por Zhen Wu (2009), los parámetros indicadores de contaminación o índices de calidad permiten medir los cambios percibidos en un cierto cuerpo de agua que puede ser afectado por distintos tipos de contaminación o degradación física. Sin embargo, Fawell & Nieuwenhuijsen (2003), consideran que cualquier cambio significativo en la concentración de algún parámetro indicador es sospecha de algún grado de contaminación, ya sea físico, químico o bacteriológico.

Además, existen muchos estudios sobre calidad del agua en diferentes ecosistemas acuáticos (Gupta, Daghe & Kumar, 2009, Kazi, *et al.*, 2009, Dolotov, Gapeeva & Kozlovskii, 2010 y Razzaq-Gumman, 2011, citados por Espinal, Sedeño & López, 2013), pero el monitoreo continuo de los cuerpos de agua aunado a sus variaciones espaciales y temporales generan grandes y complejas matrices de datos que son de difícil interpretación (Kazi et al. 2009, citado por Espinal, Sedeño & López, 2013).

En ese sentido, es necesario hacer uso de herramientas que faciliten la interpretación de los resultados que se obtienen en las investigaciones, de tal manera que los administradores de los recursos hídricos puedan brindar diferentes alternativas de soluciones sobre el manejo del recurso hídrico. Por lo anterior, se cuenta con gran variedad de índices de calidad del agua (ICA) que relacionan gran cantidad de información y da una calificación del recurso hídrico dependiendo de la escala que se utilice. Por otra parte, se conoce que Horton (1965) fue quien formuló por primera vez un ICA. Sin embargo, en la actualidad, se cuenta con varios índices que varían de acuerdo con los parámetros que se desean analizar.

No obstante, se hace necesario utilizar instrumentos o técnicas que permitan obtener un comportamiento espacio-temporal de la calidad del agua. Al respecto, Reghunath, Murthy, & Raghavan (2002) y Simeonov, Simeonova & Tsitouridou (2004), opinan que se puede hacer uso de los análisis estadísticos multivariados, los cuales permiten relacionar el número de muestras y factores que permiten la identificación de las posibles fuentes de contaminación y ofrecen una valiosa y fiable alternativa para la gestión de los recursos hídricos.

5.3.2. Índices de Contaminación (ICO)

De acuerdo con Coello, *et al.*, (2013), citados por Valverde, Moreno & Ortiz (2015), los índices de calidad y los índices de contaminación son muy utilizados para llevar a cabo la determinación numérica de las características tanto positivas como negativas del estado de las

Evaluación de la Calidad del Agua y Usos del Suelo en la Ciénaga Grande de Santa Marta, jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del Magdalena.

fuentes hídricas superficiales. Por otro lado, Ramírez, Restrepo & Viña (1997) establecen que la evaluación de la calidad del agua mediante la utilización de los índices de calidad del agua (ICA) presenta varias limitaciones, por lo cual, indican la formulación y fundamentación de varios índices de contaminación (ICO), los cuales son complementarios en sentido ecológico y, por lo tanto, permiten precisar problemas ambientales, así como profundizar en la identificación de especies con potencial indicador, en el caso de evaluaciones biológicas. Así mismo, Ramírez & Viña (1998) sugieren que el cálculo de estos índices constituye otra vía de llevar a cabo caracterizaciones fisicoquímicas, presentando la ventaja de ser más económicos por la utilización de una menor cantidad de variables (Chavarro & Gélvez, 2016), a la vez que señalan problemas de contaminación puntuales para cada estación de muestreo o muestra a analizar, dado que permiten relacionar parámetros fisicoquímicos y biológicos al tiempo (Cañas, 2010).

Inicialmente, Ramírez, Restrepo & Viña (1997) y Ramírez & Viña (1998), presentan la formulación, fundamentación y aplicación de cuatro índices de contaminación que son: Índice de Contaminación por Mineralización (ICOMI), Índice de Contaminación por Materia Orgánica (ICOMO), Índice de Contaminación por Sólidos Suspendidos (ICOSUS) e Índice de Contaminación Trófico (ICOTRO). Por otro lado, Ramírez, Restrepo & Cardeñosa (1999) identifican la necesidad de formular nuevos índices para los parámetros de pH (ICOpH) y temperatura (ICOTEM), con el fin de complementar la caracterización tanto de las aguas continentales como de los vertimientos, respectivamente.

Los ICO son calculados mediante una ecuación particular para cada índice. Sin embargo, para todos los casos, el valor varía entre 0 y 1, al igual que muchos ICA (Valverde, Moreno &

Ortiz, 2015), reflejando nula o baja contaminación cuando son próximos a cero y alta polución en la medida que se aproximan a uno (Ramírez, Restrepo & Cardeñosa, 1999). La clasificación del índice de contaminación para todos los casos se encuentra distribuida como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Significancia de los índices de contaminación (ICO)

ICO	Contaminación	Descripción
0 - 0.2	Ninguna	Azul
> 0.2 - 0.4	Baja	Verde
> 0.4 - 0.6	Media	Amarillo
> 0.6 - 0.8	Alta	Naranja
> 0.8 - 1	Muy Alta	Rojo

Fuente: Ramírez, Restrepo & Cardeñosa (1999).

Según Chavarro & Gélvez (2016), estos índices resultaron de la experiencia acumulada en diversos proyectos de monitoreo hidrobiológicos, siendo posteriormente desarrollados con base en legislaciones de diversos países, conformes con las concentraciones de las diferentes variables y los usos potenciales de las aguas.

- Índice de Contaminación por pH (ICOpH), este se calcula o se determina a partir del pH medido en el agua en cuestión (Ecuación 1, de Ramírez, Restrepo & Cardeñosa, 1999).

$$ICOpH = \frac{e^{-31.08+3.45pH}}{1 + e^{-31.08+3.45pH}} \quad \text{Ec. 1}$$

Evaluación de la Calidad del Agua y Usos del Suelo en la Ciénaga Grande de Santa Marta, jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del Magdalena.

Si **pH** es menor a 7, entonces **pH'**=14-**pH** y se reemplaza **pH'** en la fórmula anterior.

- Índice de Contaminación por Sólidos Suspendidos (ICOSUS), como su nombre lo indica, se determina a partir de la concentración de Sólidos Suspendidos, dado que los sólidos suspendidos, bajo muchas circunstancias, pueden hacer referencia sólo a compuestos inorgánicos en el agua a analizar (Torres, 2008 y Puerto & Pimentel, 2006, citados por Valverde, Moreno & Ortiz, 2015). Su aplicación se basa en la Ecuación 2, de Ramírez, Restrepo & Viña (1997).

$$ICOSUS = 0.02 + 0,003SSus \quad \text{Ec. 2}$$

Donde, **SSus** corresponde a los Sólidos Suspendidos en unidades de g/m³ o mg/L.

De acuerdo con Ramírez & Viña (1998), Sólidos Suspendidos mayores a 340 mg/L y menores a 10 mg/L, tienen ICOSUS de 1 y 0, respectivamente. Así mismo, Cañas (2010), citado por Montero & Ramírez (2018), indica que, si su resultado es 0, sus concentraciones se consideran nulas, por lo cual no generan problema alguno a la salud humana, o, bien sea, a las actividades cotidianas en la zona.

5.3.3. *Índice Holandés de Calidad del Agua (Ihca)*

De acuerdo con Zhen Wu (2009), la calidad del agua puede ser determinada mediante la asignación de puntajes según el Sistema Holandés de Valoración de la Calidad Físico-química del Agua (ver Tabla 2), el cual emplea únicamente tres indicadores que son importantes para

medir la calidad del agua y descarta la utilización de otros que son muy a menudo reconocidos como importantes por otros autores (Calvo, 2013). Zhen Wu (2009, 2010) y Robledo, Vanegas & García (2014), indican que estos parámetros son el porcentaje de saturación del oxígeno disuelto (PSO), la demanda bioquímica de oxígeno de 5 días (DBO_5) y el nitrógeno amoniacal (NH_4^+-N), permitiendo sintetizar en palabras y mediante un código de colores, la información de estos parámetros de gran importancia en la valoración de la contaminación del agua (Guevara & Herrera, 2014).

En el caso de cuerpos de agua superficiales, en la utilización de este índice, el NH_4^+-N juega un papel fundamental, ya que, de acuerdo con Calvo & Mora (2012), al encontrarse generalmente en aguas superficiales y subterráneas, los cambios en los niveles de concentración sugieren indicios de contaminación antropogénica, atribuyéndose al uso de fertilizantes o a la materia fecal humana y animal.

En la Tabla 3 se muestra la clasificación del agua del cuerpo receptor de acuerdo al grado de concentración, como resultado de la sumatoria del puntaje obtenido (Arias, 2016).

Tabla 2. Asignación de puntajes según el Sistema Holandés de Valoración de la Calidad del Agua para cuerpos receptores.

Puntos	PSO (%)	DBO (mg/L)	NH₄⁺-N (mg/L)
1	91 - 100	≤ 3	≤ 0,50
2	71 – 90; 111 - 120	3,1 – 6,0	0,50 – 1,0
3	51 – 70; 121 - 130	6,1 – 9,0	1,1 – 2,0
4	31 - 50	9,1 – 15	2,1 – 5,0
5	≤ 30 y > 130	≥ 15	≥ 5,0

Fuente: Presidencia de la República, Ministerio de Salud y de Ambiente y Energía de Costa Rica (2007).

Tabla 3. Asignación de clases de calidad del agua según el Sistema Holandés de codificación por colores, basado en valores de PSO, DBO y NH⁺-N.

Clase	Promedio de puntos	Interpretación de calidad	Código de Color
1	3	Sin contaminación	Azul
2	4-6	Contaminación Incipiente	Verde
3	7-9	Contaminación Moderada	Amarillo
4	10-12	Contaminación Severa	Naranja
5	13-15	Contaminación muy severa	Rojo

Fuente: Presidencia de la República, Ministerio de Salud y de Ambiente y Energía de Costa Rica (2007).

5.3.4. *Universal Water Quality Index – UWQI (IDEAM).*

El IDEAM adopta, desarrolla y aplica la metodología UWQI, mediante la cual pretende obtener un índice resumido para establecer la calidad del agua para consumo humano (Cahorodríguez, 2017). Para el cálculo de dicho índice, se emplea una ecuación que consiste en una sumatoria ponderada, la cual se presenta en la Ecuación 3 (Torres et. al., 2009).

$$UWQI = \sum_{i=1}^n w_i l_i \quad \text{Ec. 3}$$

Dónde, w_i - peso o porcentaje asignado al i -ésimo parámetro y l_i - subíndice del i -ésimo parámetro.

De acuerdo con el IDEAM (2015), el UWQI consiste de seis variables básicas para la determinación del ICA en los cuerpos de agua y García, *et. al.*, (2011), las indica de la siguiente manera: una de estado (Oxígeno Disuelto (OD)) y cinco de presión (Demanda Química de Oxígeno (DQO), conductividad eléctrica (CE), Sólidos Suspendidos Totales (SST), pH y relación nitrógeno total (NTK)/fósforo total). En la Tabla 4 se muestra la clasificación del agua en cinco categorías.

Tabla 4. Valores del ICA a partir del UWQI-IDEAM

Valor	Color	Descripción
Entre 0 y 0.25	Rojo	Muy mala
Entre 0.26 y 0.5	Naranja	Mala
Entre 0.51 y 0.7	Amarillo	Regular
Entre 0.71 y 0.9	Verde	Aceptable
Entre 0.91 y 1	Azul	Buena

Fuente: IDEAM (2011).

5.3.5. Cobertura Vegetal Ribereña y Usos Del Suelo

Ballarin y Rodríguez (2013), consideran que la vegetación ribereña corresponde a las plantas que crecen en el entorno de los ríos, en las orillas, en las barras y en los espacios de inundación. Tienen un papel fundamental a la hora de frenar el flujo de la corriente, especialmente en crecidas, además contribuye a la sedimentación de la carga en suspensión que lleva el río, su función de corredor verde sirve para una mejor interacción del río con los ambientes adyacentes y es espacio de gran riqueza. Además, Vannote (1980) y Corbacho (2003), citados en Morelli (2014) citados Carrillo, Rivera & Sierra (2018), explican el papel importante que juega la cobertura vegetal en la estructura y complejidad de los ríos, se encuentra más conectada a la vida dentro del río que fuera de él, cumpliendo así, un papel fundamental en la cadena trófica de los ambientes acuáticos, determinando la composición de las comunidades que lo habitan como son los macroinvertebrados.

Así mismo, la pérdida de la vegetación ribereña en algunos casos se debe al factor antrópico, produce una ausencia de vegetación que, en momento de crecida, sirve para obstaculizar el flujo de agua disminuyendo la velocidad y favorece la sedimentación del material sólido. Además, de que se modifica la forma de la orilla de los ríos, por la presencia de ganado que pisan para poder acceder al río y beber, otra presión que se ejerce sobre la cobertura ribereña, son los cultivos de árboles para su aprovechamiento industrial, por otro parte en las márgenes y riberas de los ríos en muchas ocasiones se vierten y acumulan basuras y escombros (Ballarin y Rodríguez 2013, citados Carrillo, Rivera & Sierra 2018).

Villarreal et. al., (2004), en el Manual de métodos para el desarrollo de inventarios de Biodiversidad del Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt explican que hay cuatro métodos que pueden utilizarse para obtener información representativa tanto de la riqueza, composición de especies y estructura de la vegetación. Por ejemplo, el muestreo estandarizado utilizando grupos taxonómicos definidos, el cual consiste en hacer un inventario de las familias Rubiácea y Melastomatocenea en 0,4 Ha, para analizar el recambio de especies y riqueza de estas familias. Otro método, es el muestreo estandarizado utilizando un gremio, donde se hace un inventario de plantas leñosas en 0,1 Ha (Campo, 2010), con el objeto de analizar la riqueza, la estructura y la composición de la vegetación; el siguiente método, es la colección general de plantas, en donde se colectan todas las especies de la zona de estudio que estén con flores y/o frutos, con el fin de hacer una aproximación florística de la zona; y por último, es la descripción general de la vegetación por medio de perfiles fisionómicos, donde se

Evaluación de la Calidad del Agua y Usos del Suelo en la Ciénaga Grande de Santa Marta, jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del Magdalena.

describen los diferentes estratos verticales con el fin de hacer una aproximación a las características de la vegetación.

Según Aguilera-Díaz (2009) citado por Zabala (2017), dentro de los principales problemas ambientales que se presentan en la Ciénaga se encuentran la deforestación para la adecuación de potreros, lo que conlleva a la degradación de los suelos limitando su productividad, la contaminación del agua debido al uso de agroquímicos y la sobreexplotación de recursos por pesca y minería.

De acuerdo con Carpenter, *et al.*, (1998) y Carney (2009), los usos del suelo agrícola y urbano son fuentes de nutrientes y de contaminantes en los ecosistemas acuáticos. El papel del uso del suelo y el desarrollo de cuencas hidrográficas como factores condicionantes de la biodiversidad acuática se destaca en un número limitado de estudios relacionados con el fitoplancton (Burns y Galbraith, 2007; Stomp, *et al.*, 2011 citado por Zabala A., 2017) y otros componentes de la biota acuática como bacterias, protozoos y zooplancton. Wetzel (2001) y Mazaris, *et al.*, (2010) argumentan que la morfometría del lago es considerada como el mejor indicador de la estructura y productividad del fitoplancton, reflejando el clima y las condiciones de la cuenca (Katsiapi, *et al.*, 2012 citados por Zabala, 2017).

5.4. Marco conceptual

Calidad de Agua. García et. al., (2019) establecen que la calidad del agua “está definida por su composición química y por sus características físicas y biológicas, adquiridas a través de

los diferentes procesos naturales y antropogénicos”. Además, la calidad del agua natural y su variación espaciotemporal se modifica por el flujo de las múltiples actividades socioeconómicas, de acuerdo con las características que son propias de estas dinámicas.

Ciénaga. Según ECURED (2020), las ciénagas son depósitos de aguas no corrientes, es decir, ecosistemas lénticos, con algún grado de conexión con el río, del cual depende la renovación de sus aguas e intercambio de materiales, constituyendo sitios de amortiguación de las crecientes, ya que almacenan agua de desborde y de lluvias durante la época de niveles máximos (potamofase) y la liberan a través de los caños durante la época de los mínimos niveles (limnofase). Por otra parte, Aguilera (2011) define las ciénagas como humedales de importancia ambiental por las funciones que cumplen, tales como la de controlar inundaciones al estancar grandes cantidades de agua, regular los caudales de los ríos, retener los sedimentos al maximizar procesos de decantación y depósitos de materiales purificando el agua proveniente de las cuencas y de los asentamientos humanos adyacentes.

Cuerpo Léntico. Gómez & Mora (2016), definen a los cuerpos lénticos aquellos cuerpos de agua cuyo contenido líquido se mueve dentro de la depresión del terreno donde se encuentran, generando, principalmente, movimientos convectivos con un recambio de aguas más o menos limitado. Comprenden todas las aguas interiores que no presentan corriente continua, es decir, aguas estancadas sin ningún flujo de corriente (del Ángel, et al., 2015).

Evaluación de la Calidad del Agua y Usos del Suelo en la Ciénaga Grande de Santa Marta, jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del Magdalena.

pH. De acuerdo con el IDEAM (2007a), el pH es una forma de expresar la concentración de ion hidrógeno o, más exactamente, la actividad del ion hidrógeno. En general se usa para expresar la intensidad de la condición ácida o alcalina de una solución. No obstante, esto no quiere decir que mida la acidez total o la alcalinidad total de un cuerpo.

Sólidos Suspendidos. Según el IDEAM (2007b), los sólidos suspendidos o sólidos suspendidos totales (SST), son uno de los tipos de sólidos no sedimentables. Estos sólidos son transportados gracias a la acción de arrastre y soporte del movimiento del agua. Por su parte, el DANE (2007) indica que estos sólidos hacen referencia al material particulado que se mantiene en suspensión en las corrientes de agua superficial y/o residual.

5.5. Marco legal

En la tabla 5 se muestran las diferentes Leyes, Resoluciones y Decretos que son aplicables en la presente investigación, rigiendo las diferentes normas y procesos, además de presentar los estándares requeridos para la evaluación de la calidad del agua.

Tabla 5. Normativa colombiana aplicable en la investigación.

Normativa	Aspecto/Descripción
Decreto Ley 2811 de 1974 Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y del Protección al Medio Ambiente
Ley 99 de 1993	Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA y se dictan otras disposiciones.
Decreto 1076 de 2015 Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible
Decreto 1594 de 1984 Ministerio de Agricultura	Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II y el Título III de la Parte III - Libro I- del Decreto - Ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos.
Resolución 2115 de 2007 Ministerio de la Protección Social Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial	Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano
Decreto 4742 de 2005 Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial	Por el cual se modifica el artículo 12 del Decreto 155 de 2004 mediante el cual se reglamenta el artículo 43 de la Ley 99 de 1993 sobre tasas por utilización de aguas.
Decreto 3930 de 2010 Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial	Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9 de 1979, así como el Capítulo 11 del Título VI-Parte 11I- Libro 11 del Decreto - Ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones.

Fuente: Flórez Matute (2020).

Evaluación de la Calidad del Agua y Usos del Suelo en la Ciénaga Grande de Santa Marta, jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del Magdalena.

6. METODOLOGÍA

Los análisis que se abarcan en la presente investigación son los fisicoquímicos y la cobertura vegetal y usos del suelo. El análisis fisicoquímico se llevó a cabo mediante la utilización de los índices de contaminación ICOpH e ICOSUS, además de las concentraciones de salinidad, Clorofila a y Coliformes Totales.

Para la determinación de la calidad del agua en la CGSM, la metodología fue dividida en cuatro fases de acuerdo con los objetivos específicos propuestos y para su cumplimiento se procedió a las siguientes actividades, tal como se muestra en el Diagrama 1, las cuales fueron llevadas a cabo de acuerdo a la experiencia previa y la puesta en prácticas de las diferentes técnicas, por lo cual, esta metodología es un aporte por parte del autor a la comunidad científica.

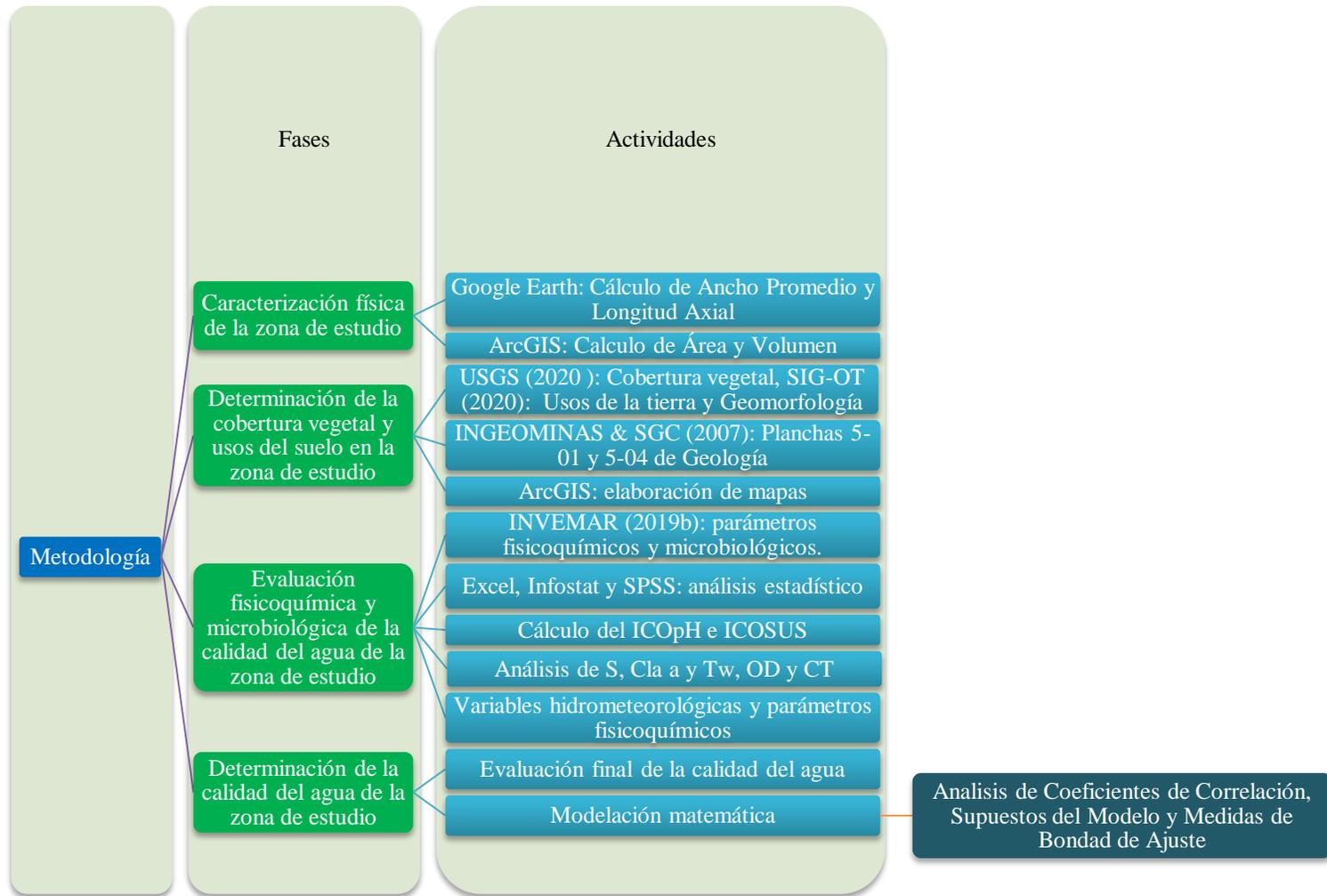


Diagrama 1. Proceso metodológico. Fuente: Flórez Matute (2020).

Evaluación de la Calidad del Agua y Usos del Suelo en la Ciénaga Grande de Santa Marta, jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del Magdalena.

Del diagrama anterior, se describe a continuación el proceso llevado a cabo en cada una de las 4 fases de acuerdo con los objetivos específicos propuestos para dar cumplimiento a la presente investigación.

6.1. Caracterización física de la zona de estudio

Para la caracterización física de la zona de estudio se utilizó el software ArcGIS 10.4 (licencia Universidad de Pamplona) y la plataforma de Google Earth. A partir de la información contenida y procesada en el software y la plataforma anterior, se obtienen parámetros físicos y de forma como la extensión o el área (A), perímetro (P), longitud axial (L), ancho promedio (A_p) y volumen de la CGSM.

El área se determinó encerrando un polígono alrededor del espejo de agua de la misma y el perímetro será la longitud de la línea que cierre dicho polígono, esto haciendo uso del software ArcGIS, calculando la geometría del polígono.

Por otro lado, la longitud axial y el ancho promedio, se determinaron en la plataforma Google Earth, midiendo la longitud máxima de la ciénaga de un extremo a otro y trazando varias líneas en horizontal y calculando su promedio, respectivamente.

En el caso del volumen de la CGSM, fue calculado mediante el software ArcGIS y el procesamiento de las curvas de nivel de la zona. Como la zona es relativamente plana, con pocas variaciones de alturas, no existe información de curvas de nivel en la cartografía nacional de

Colombia, por lo cual se procedió a la construcción de dichas curvas de la siguiente manera: 1. En la plataforma Google Earth se marcó una ruta o línea lo suficientemente amplia, que abarcara el área de la CGSM y las zonas aledañas importantes para el estudio. 2. El archivo generado anteriormente fue ingresado a la plataforma GPS Visualizer, donde se hizo una conversión a puntos con información de elevación o altura sobre el nivel del mar. 3. Se importó la capa al software ArcGIS y se generó un TIN, extrayendo de este los contornos o curvas de nivel generados con un intervalo de 1 metro; posteriormente, se suavizaron las curvas mediante la herramienta de Smooth Line. 4. Con las nuevas curvas suavizadas, se generó un nuevo TIN y se calculó el volumen mediante la herramienta Polygon Volume, en función de la altura del espejo de agua y el TIN generado.

6.2. Determinación de la cobertura vegetal ribereña y usos del suelo en la zona de estudio

Se descargaron imágenes satelitales de Landsat 8 a través de la plataforma Earth Explorer de la USGS. Estas imágenes se importaron a ArcGIS versión 10.4 (licencia de la Universidad de Pamplona) y se realizó una imagen compuesta, cambiando la composición de bandas en el orden 4-5-3, requerido para la identificación de coberturas. De este nuevo Raster generado, se extrajo la información aferente al área de estudio y luego se hizo la conversión a polígonos, donde se pudo identificar los tipos de cobertura aledaños a la CGSM. La información anterior, fue comparada y verificada con las imágenes encontradas en la plataforma Google Earth.

Evaluación de la Calidad del Agua y Usos del Suelo en la Ciénaga Grande de Santa Marta, jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del Magdalena.

Para la Geomorfología, se descargó una capa nacional del Sistema de Información Geográfica para el Ordenamiento Territorial (SIG-OT), se editó en el software ArcGIS 10.4 (licencia Universidad de Pamplona) y se extrajo la información referente al área de estudio, pudiendo identificar las unidades geomorfológicas en la zona adyacente a la CGSM. Así mismo, de la misma plataforma, se descargó la capa de Conflicto de Uso de la Tierra, de la cual se extrajo la información aferente a la zona de estudio y se identificó que tipos de conflictos se presentan en cuanto a la sobreutilización o subutilización del suelo.

En cuanto a la Geología, se importó al software ArcGIS 10.4 (licencia Universidad de Pamplona), en formato de imagen (.jpeg/.png), las planchas 5-01 y 5-04 del INGEOMINAS SGC (2007), se georreferenció y se dibujó mediante la herramienta “Editor”, obteniendo el mapa de Geológico de la zona de estudio.

6.3. Caracterización fisicoquímica y microbiológica de la calidad del agua de la zona de estudio

Se extrajo la información disponible en el Informe Técnico de la CGSM 2019 (INVEMAR, 2019b), acerca de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de nueve (9) estaciones de monitoreo dentro de la misma, las cuales se muestra en la Figura 3, y se encuentran ubicadas en los puntos más críticos o de mayores cambios en cuanto al estado del agua, como lo son frente a los ríos Sevilla, Aracataca y Fundación, en las bocas del Caño Grande (que conecta

con la ciénaga de Pajaral) y La Barra (punto de conexión entre la CGSM y el mar Caribe), el centro de la misma, Islas del Rosario, Tasajera, y, Rinconada, punto de Conexión entre la CGSM y Caño Clarín, por el cual se da el transporte desde y hacia el río Magdalena.

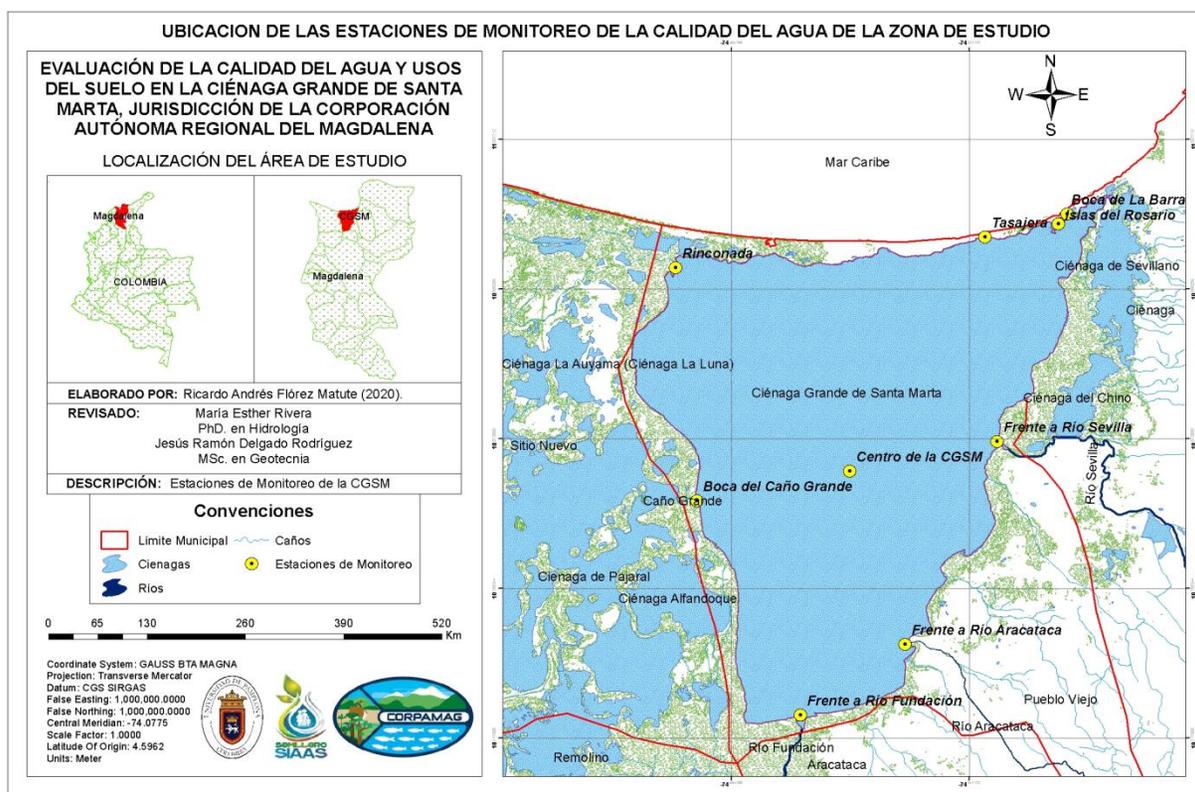


Figura 3. Ubicación de las nueve estaciones de monitoreo de la calidad del agua de la CGSM. Fuente: Elaborado en ArcGIS por Flórez Matute (2020) a partir de la información del SIG-OT (2018) e INVEMAR (2019b).

Para el desarrollo de la presente investigación, se trabajó con siete parámetros físico-químicos y microbiológicos, con los cuales se contaba información dentro en el informe anteriormente mencionado. Estos parámetros fueron pH, Sólidos Suspendidos Totales (mg/L),

Evaluación de la Calidad del Agua y Usos del Suelo en la Ciénaga Grande de Santa Marta, jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del Magdalena.

Temperatura (°C), Salinidad, Oxígeno Disuelto (mg O₂/L), Concentraciones de Clorofila a (µg/L) y Coliformes Totales (LOG₁₀(CTT/100mL)). Es preciso aclarar que varios parámetros indicadores del grado de contaminación del agua, y por ende, de calidad de la misma, tal como Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Demanda Bioquímica de Oxígeno en 5 días (DBO₅), no pudieron ser trabajadas en esta investigación dado que no se encontraron relacionadas en la base de datos utilizada..

Ahora bien, varios de los parámetros presentaron datos faltantes en diferentes estaciones de monitoreo, como es el caso de los SST, Clorofila a y Coliformes totales, por lo cual, se procedió a ingresarlos al software estadístico SPSS (con licencia de prueba gratuita), en el cual se llevó a cabo el análisis de patrones de los mismos (Anexos 1-4) y cálculo de datos perdidos, usando regresiones lineales multivariantes. En el caso de los Coliformes Totales, se calculó teniendo en cuenta parámetros fisicoquímicos como la Salinidad y el pH y variables hidroclimatológicas como la Radiación Solar de Onda Corta y la Precipitación, teniendo en cuenta que estos, al igual que la Temperatura, son los que inciden en mayor medida en las concentraciones de los Coliformes (Chamorro & Jurado, 2018). Es importante mencionar que los datos faltantes no pudieron ser obtenidos por métodos de imputación directa de manera que superaban el 10% del conjunto total de datos, por lo cual se aplicaron regresiones lineales múltiples para determinar estos valores.

Posteriormente, en la aplicación estadística Microsoft Excel, se realizó el cálculo del ICOpH y del ICOSUS a partir de los datos de pH y SST, respectivamente. De acuerdo con los resultados obtenidos y la clasificación propuesta por Ramírez, Restrepo & Cardeñosa (1999), se obtuvo un gráfico de la fluctuación de los valores del ICO y una tabla con la con el grado de

contaminación del agua para cada parámetro. Además, con los datos de Salinidad, obtenidos del mismo informe, se generó una gráfica y una tabla de clasificación del agua según el valor de los mismos, durante el periodo de estudio.

6.4. Determinación de la calidad del agua de la zona de estudio

La determinación final de la calidad del agua de la CGSM se llevó a cabo de la siguiente manera:

- Se descargó de NASA Giovanni información variables hidrometeorológicas (relacionadas con la calidad del agua, tales como Precipitación, Temperatura, Velocidad del Viento y Radiación Solar de Onda Corta y de Onda Larga) aferentes al área de estudio, realizando posteriormente un análisis estadístico y una correlación entre las mismas en el software SPSS (Anexo 5).
- Por otro lado, después de haber determinado el grado de contaminación de salinidad y estado trófico del agua, mediante las clasificaciones de Ramírez, Restrepo & Cardeñosa (1999) (aplicación de Ecuaciones 1 y 2), Knox (2001) y OCDE (1982), respectivamente, se procedió a realizar una relación con las variables hidrometeorológicas, el tipo de cobertura vegetal, los suelos de la zona y otros parámetros fisicoquímicos (Temperatura, Oxígeno Disuelto, Clorofila a y Coliformes Totales).

Además, mediante el análisis estadístico y la experimentación, se obtuvo un modelo matemático para el cálculo del ICO en función de diferentes parámetros fisicoquímicos y variables hidrometeorológicas, siguiendo los pasos que se muestran a continuación:

- Se ingresaron las variables y parámetros considerados como potenciales indicadores del grado de contaminación del agua al software Infostat con versión estudiantil, en el cual se llevó a cabo la correlación de las variables y se obtuvo 10 posibles modelos matemáticos.
- Los 10 posibles fueron evaluados en Excel, realizando la regresión de la variable dependiente (ICO) en función de diferentes variables de acuerdo con el modelo en cuestión, obtenido de Infostat.
- A cada uno de los modelos, a parte del análisis de la suma de Residuos y el R^2 obtenido en la regresión, se les aplicó 5 criterios de evaluación de modelos matemáticos que son: Eficiencia de Nash-Sutcliffe (E_{NSE}), Raíz del error cuadrático medio (RMSE), Criterio de Schultz ($D_{Schultz}$), Desviación media acumulada (MAD) y Error de balance de masas (m).
- Se seleccionó el modelo mejor calibrado y cuyas variables tuvieran mayor incidencia en el grado de contaminación del agua.

7. RESULTADOS Y DISCUSION

7.1. Caracterización física de la zona de estudio

En la Tabla 6 se muestra la caracterización física de la Ciénaga Grande de Santa Marta, a partir de la cual se infiere una gran diferencia entre los valores obtenidos de manera experimental y los reportados por CORPAMAG (2020) en cuanto al área (10.42 Km) y el volumen (207,481 mill de m³). Además, se evidencia un cuerpo de agua extenso, con una longitud axial y un perímetro de 36.58 Km y 140.99 Km, respectivamente, por lo cual se clasifica como el cuerpo de agua lenticó costero más grande de Colombia.

Tabla 6. Resultados de los parámetros físico de la zona de estudio.

Parámetro	Símbolo	Unidad	Valor
Área	A	Km ²	440.42
Perímetro	P	Km	140.99
Volumen	V	mill de m ³	514.519
Longitud Axial	La	Km	36.58
Ancho Promedio	Ap	Km	17.14

Fuente: Flórez Matute (2020).

7.2. Determinación de la cobertura vegetal ribereña y usos del suelo en la zona de estudio

Evaluación de la Calidad del Agua y Usos del Suelo en la Ciénaga Grande de Santa Marta, jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del Magdalena.

A partir de la Figura 4, se identificaron dos grandes grupos de cobertura vegetal: Manglar y Potreros; los cuales, de acuerdo con la FAO-Unesco (1971), hacen parte de formaciones semiáridas de vegetación, con espinares y matorrales cactáceos del Caribe y de las sabanas del norte de Colombia, compuestas por diferentes tipos de sabanas, tierras de pastos y bosques y sabanas pantanosas, donde son muy comunes las gramíneas. El primero de estos tipos de cobertura representa un complejo ecosistema de vegetación riparia alrededor de las orillas del cuerpo hídrico en cuestión y de los cercanos o adyacentes a este, tales como las ciénagas, pantanos y ríos, que consiste, en su gran mayoría, por un bosque de manglar, hierbas y rastreras, el cual, como lo mencionan PROCIÉNAGA (1995), Rivera-Monroy, *et al.*, (2006) y el INVEMAR (2019a), ha sufrido muchos cambios a lo largo del tiempo, perdiendo gran cantidad de área debido a las actividades antrópicas con respecto a los cuerpos hídricos y el uso del suelo.

El área de potreros está estrechamente relacionada al aumento de actividades antrópicas como pastoreo y pastizales, dado que estas zonas pertenecen a fincas o terrenos con poca vegetación, aumentando el uso del recurso hídrico para las diferentes actividades, tal como se muestra en la Figura 5, donde se puede apreciar zonas muy cercanas al margen de la ciénaga en las que se presentan conflictos por sobreutilización de los recursos, es decir, que son tierras donde el uso actual dominante es más intenso en comparación con la vocación de uso principal natural asignado de acuerdo con sus características agroecológicas. Por contrario, cobertura de manglar concierne en gran cantidad a zonas donde el uso dominante de las tierras corresponde a un nivel inferior de intensidad de utilización, si se compara con la capacidad de uso sugerida o la de uso que guardan un cierto nivel de compatibilidad.

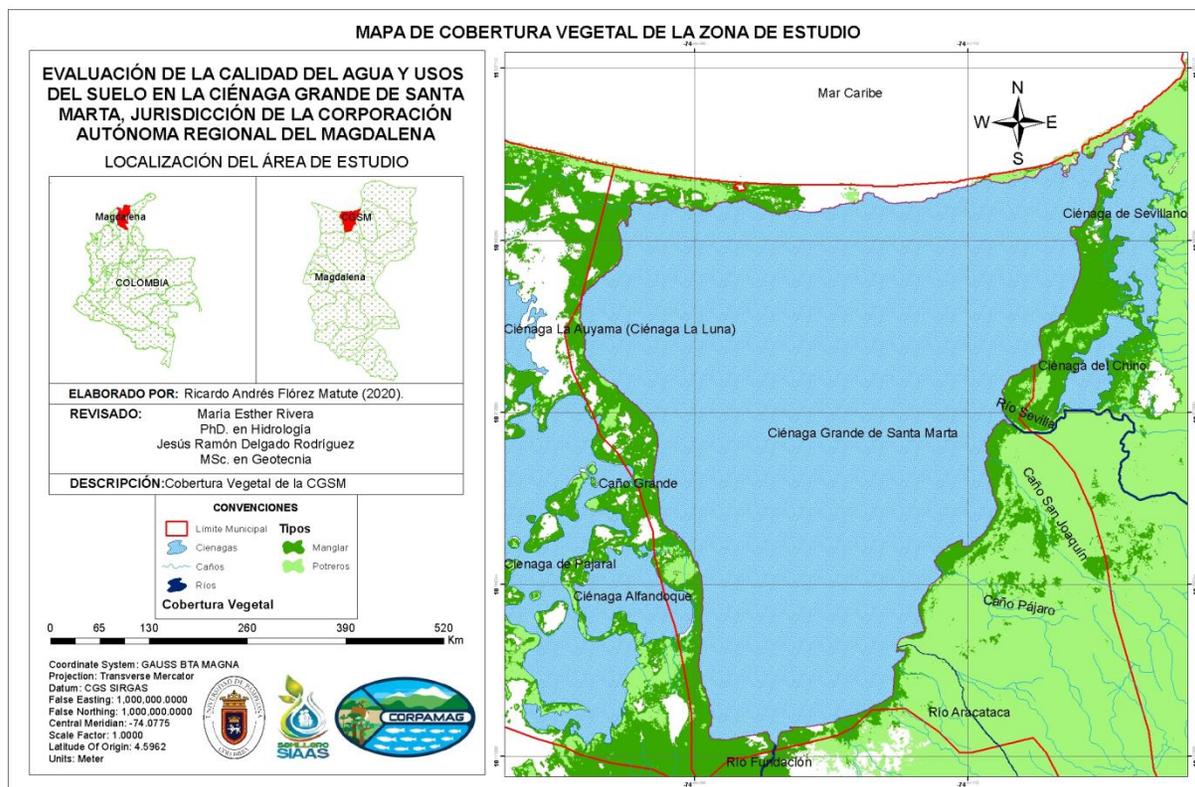


Figura 4. Clasificación de la Cobertura Vegetal de la CGSM. Fuente: Elaborado en ArcGIS por Flórez Matute (2020) a partir de la información de la USGS (2020).

En la Figura 6 se muestra la clasificación de la Geomorfología de la zona de estudio, dentro de la cual se observa que la mayoría del área corresponde a la planicie marina, la cual concierne a suelos de clima cálido y seco, originados a partir de depósitos cuaternarios de origen fluvio-marino y lacustre, cuya composición se da de la siguiente manera: Ustipsamments 30%, Fluvaquents 30%, Haplohemists 15%, Haplofibrists 15% y áreas de playones salinos 10%.

Además, en el paso del río Fundación por el municipio de Aracataca, se puede inferir la

interacción con suelos de planicie fluvio-lacustre, los cuales son suelos de clima cálido y seco, *Evaluación de la Calidad del Agua y Usos del Suelo en la Ciénaga Grande de Santa Marta, jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del Magdalena.*

derivados de rocas metamórficas del Cretácico, cuya composición, de acuerdo con la información contenida en la base de datos del SIGOT y extraída para la zona de estudios, es básicamente Ustorthents, Haplustolls y afloramientos rocosos, con un 50%, 40% y 10%, respectivamente.

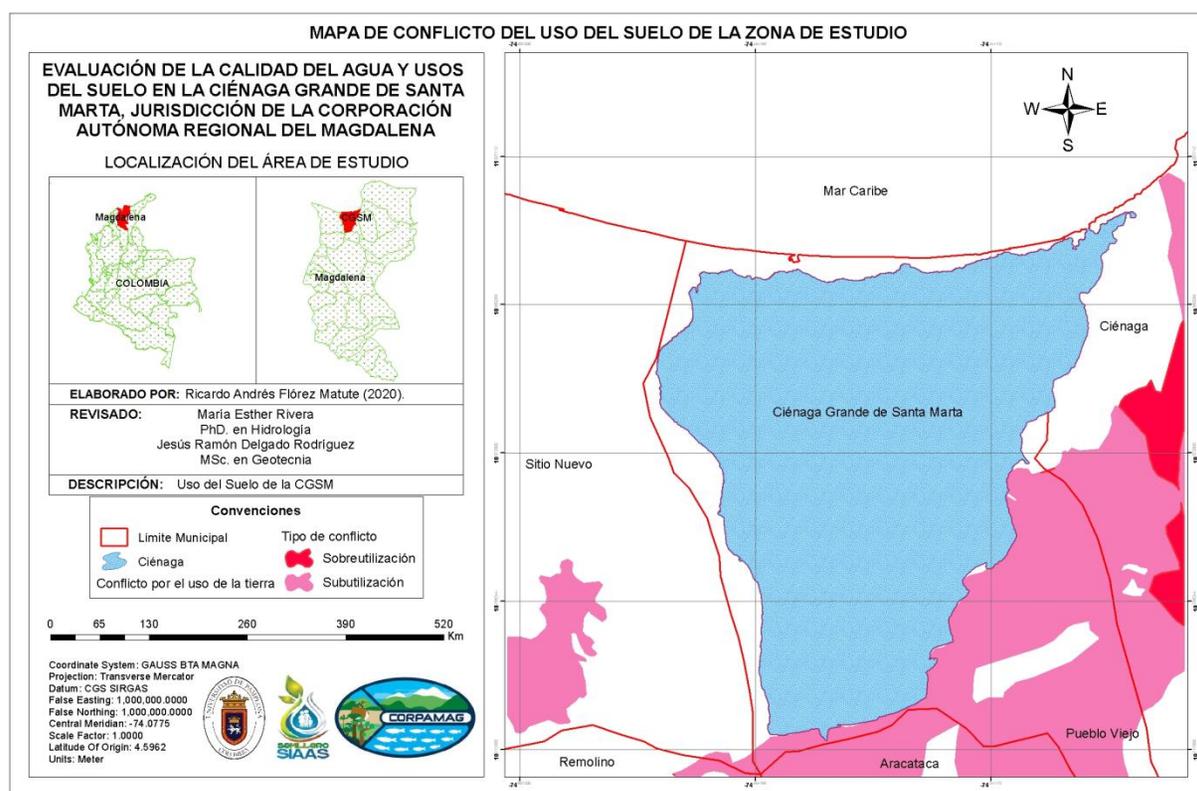


Figura 5. Mapa de Conflicto del Uso del Suelo de la CGSM. Fuente: Elaborado en ArcGIS por Flórez Matute (2020) a partir de la información del SIG-OT (2018).

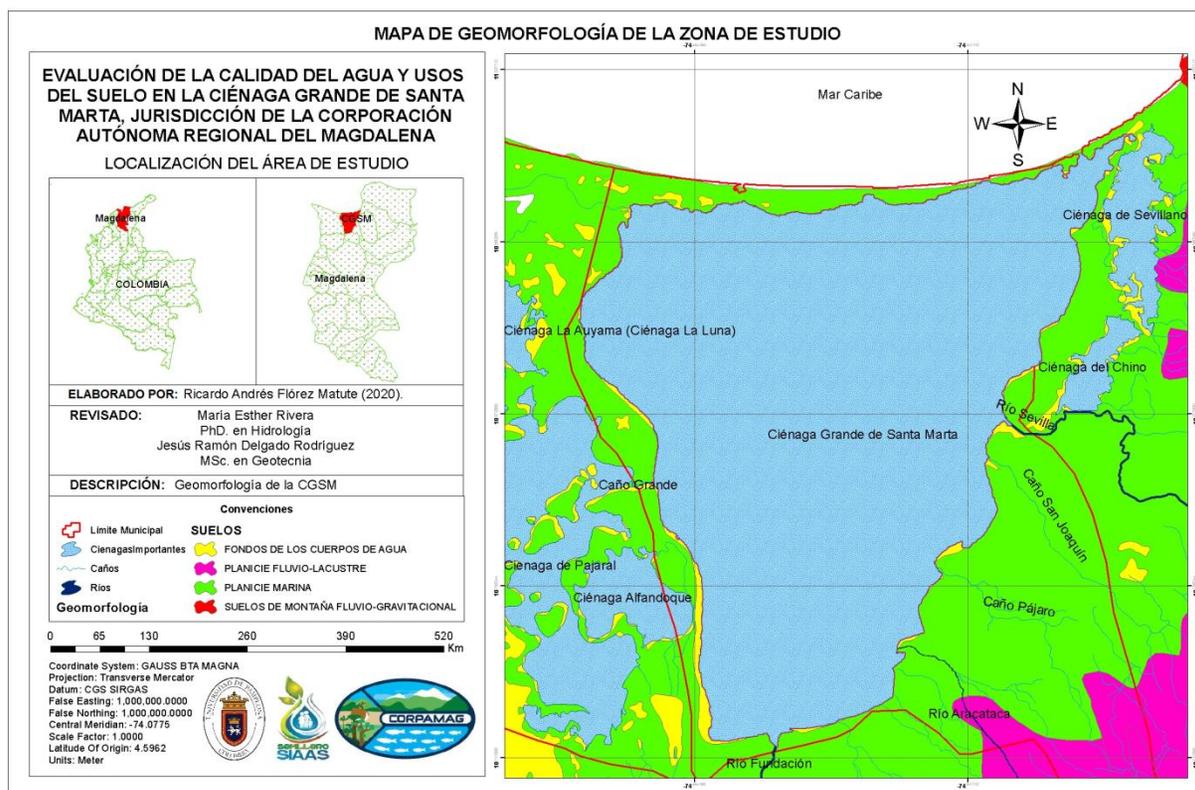


Figura 6. Mapa de Geomorfología de la CGSM. Fuente: Elaborado en ArcGIS por Flórez Matute (2020) a partir de la información del SIG-OT (2018).

De acuerdo con RAMSAR-MAVDT-CORPAMAG-INVEMAR (2004), estas llanuras se encuentran conformadas por los depósitos aluviales terminales de los ríos de la vertiente occidental de la Sierra Nevada de Santa Marta, identificadas por ser superficies cenagosas compuestas esencialmente de lodos y arenas con abundante materia orgánica que sustituye el sustrato apto para el desarrollo del manglar y otras especies halófitas con terrenos que van de planos y homogéneo a ligeramente inclinados en el mismo sentido de la corriente que las formas.

Evaluación de la Calidad del Agua y Usos del Suelo en la Ciénaga Grande de Santa Marta, jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del Magdalena.

Por otro lado, Hernández (2003) establece que la zona acrecional de relieve plano a ondulado está ligada a las llanuras de inundación de la CGSM y sus afluentes, en donde se deposita el material aluvial erodado de la SNSM.

La clasificación Geológica de la CGSM se muestra en la Figura 7, en la cual se observan tres unidades geológicas de la zona costera del caribe: Q-al, Q-ca y Q2-l, que corresponden a Depósitos aluviales y llanuras aluviales, Abanicos aluviales y depósitos coluviales, y, Depósitos paludales, respectivamente.

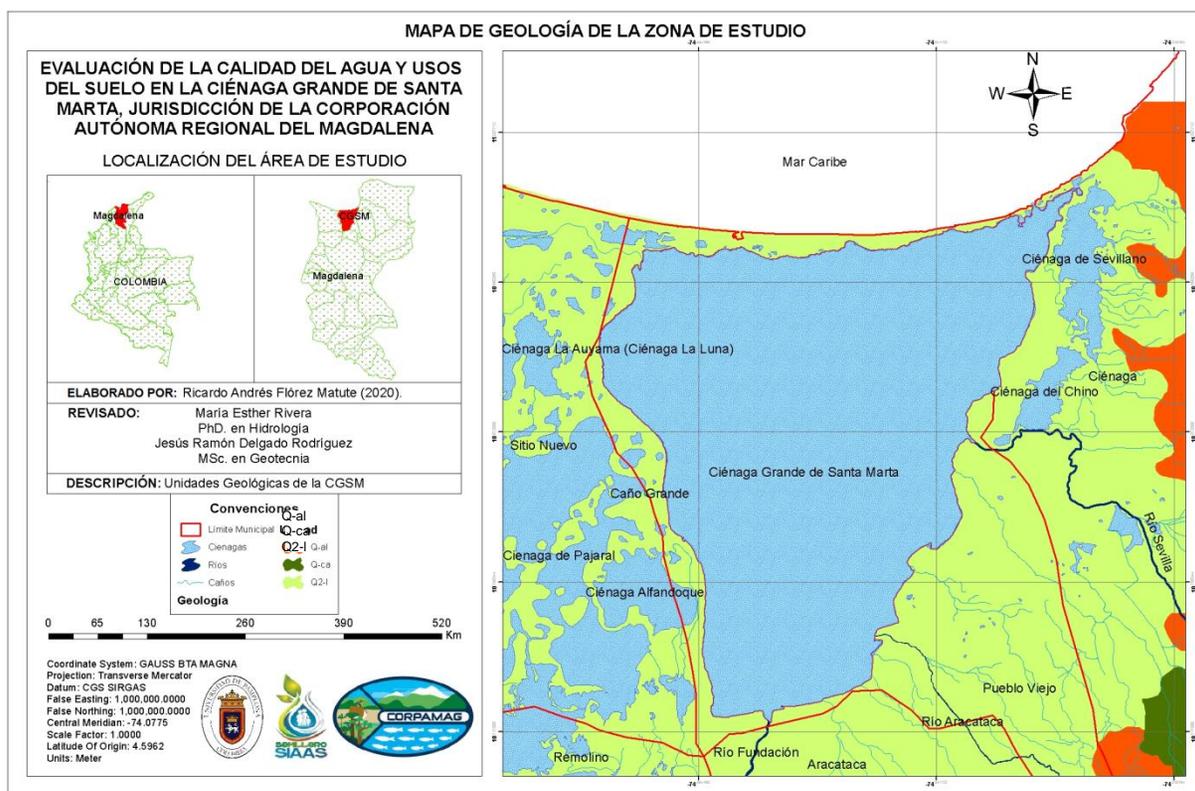


Figura 7. Mapa de Geología de la CGSM. Fuente: Elaborado en ArcGIS por Flórez Matute (2020) a partir de la información del INGEOMINAS & SGC (2007).

Las primeras dos unidades son descritas por Hernández (2003) de la siguiente manera: 1. Q-al: depósitos que han sido formados por la acción de los ríos principales (tales como el río Sevilla), constituidos primariamente por gravas y fragmentos de rocas metamórficas e ígneas de las diferentes unidades del basamento cristalino de la SNSM y están ubicados a lo largo y ancho del río en forma de terrazas, generando una superficie de inundación de 1 Km de ancho, aproximadamente. 2. Q-ca: estos se forman, principalmente, en las estribaciones de la SNSM y conservan, generalmente, una dirección NW, siguiendo la ruta del piedemonte, donde se encuentran ubicados y geomorfológicamente muestran un suave basculamiento hacia el oeste. Están constituidos, principalmente, por gravas subredondeadas y bloques hasta de 1 metro derivadas de rocas ígneas y metamórficas de la SNSM, como lo son los neises, granulitas, dioritas y gabros, en una matriz arenosa y se caracterizan por ser de poca extensión superficial dado que se encuentran suprayacidos por los depósitos de llanura aluvial y depósitos fluviolacustres más recientes. Mientras tanto, la tercera unidad, Q2-l, es identificada por Hoyos (2001) como acumulaciones de material depositado en un pantano (paludal: relativo a los pantanos) o marjal, normalmente están formados por limos y arenas finas con abundante materia orgánica.

De acuerdo con Tschanz, Jimeno & Cruz (1969), citados por Hernández (2003), estas unidades geológicas se caracterizan por el afloramiento de rocas ígneas y metamórficas que varían en edad desde el Proterozoico hasta el Paleógeno, y cuaternarios recientes ubicados en la zona occidental de la SNSM, por la cual bajan varios ríos y caños en dirección a la CGSM,

Evaluación de la Calidad del Agua y Usos del Suelo en la Ciénaga Grande de Santa Marta, jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del Magdalena.

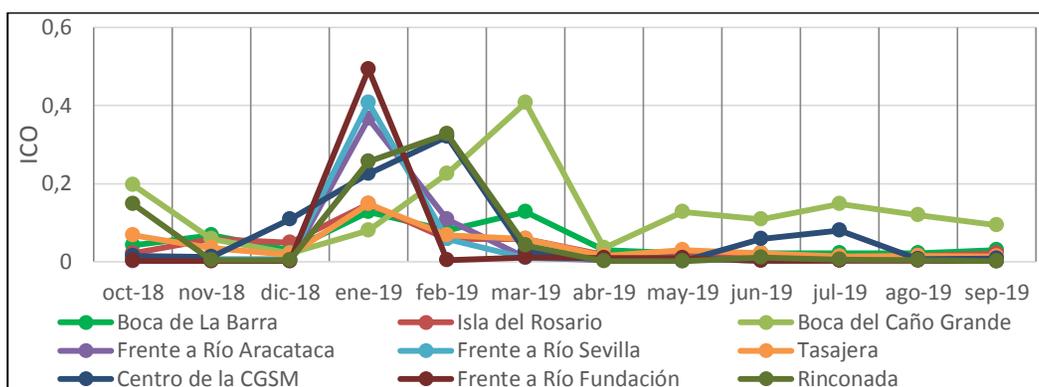
además, hacia el sur de la misma, en el límite entre las planchas 18 Ciénaga y 25 Fundación, se encuentran rocas de tipo granitoides de anfíbol y pirita, anfibólicos, anfibolita granatífera, granulita anfibólica, anfibolitas cuarzo feldespáticas, granitoides ricos en cuarzo, anfibolitas, granulitas anfibólicas con estructuras augen de feldespato potásico; granulitas cuarzo feldespáticas granatíferas; al igual que se pueden encontrar aplitas graníticas milonitizadas, granitoides anfibólicos, metagranodiorita anfibólica y neises anfibólicos milonitizados.

Según Auquilla, Astorga & Jiménez (2005), las variaciones en el uso del suelo y los cambios realizados a la cobertura vegetal, especialmente en la franja ribereña, constituida por manglar, tal como lo mencionan Mancera & Vidal (1994), genera de manera directa alteraciones a la calidad fisicoquímica del agua, dado que, al incrementar el área de potreros, pastos y ganadería, o de terrenos de agricultura, aumenta el aporte de material contaminante al ecosistema acuático.

7.3. Caracterización fisicoquímica y microbiológica de la calidad del agua de la zona de estudio

En la Gráfica 1 se muestra la progresión temporal (octubre de 2018 a septiembre de 2019) del valor del Índice de Contaminación por pH (ICOpH) de las nueve estaciones de muestreo de la CGSM, con un comportamiento homogéneo durante gran parte del tiempo de estudio. Sin embargo, son notables los picos de incremento durante el mes de enero de 2019, donde cinco de las nueve estaciones sobrepasa el límite de la primera franja (0.2) de la clasificación dada por Ramírez, Restrepo & Cardeñosa (1999). Así mismo, a partir de la misma clasificación, en la

Tabla 7 se tienen que el 91.66% de los muestreos reportaron nula o ninguna contaminación, el 5.55% baja contaminación y el 2.77% restante, contaminación media. Además, las estaciones que reportan menor grado de contaminación son Boca de La Barra, Islas del Rosario y Tasajera, siendo la primera de estas la que tuvo los valores más cercanos a 0 durante el periodo de muestreo. La relación de lo anteriormente mencionado puede ser verificada con los valores registrados en el Anexo 6.



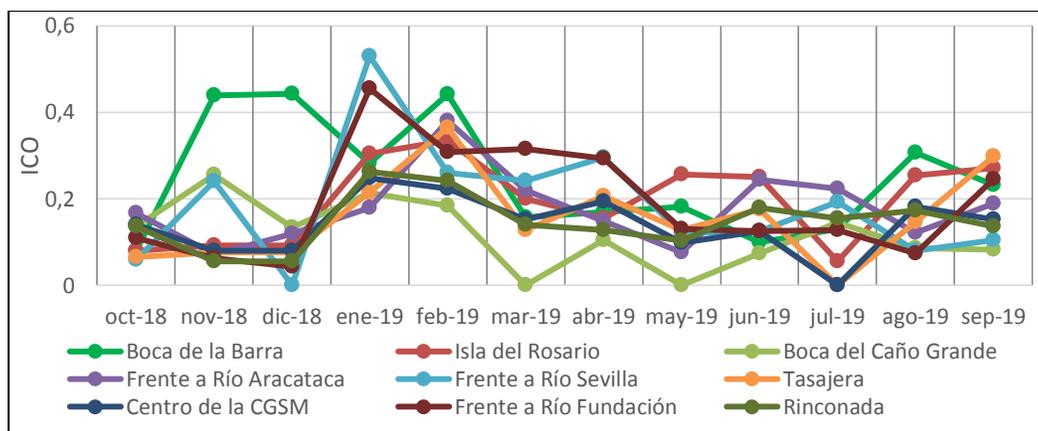
Gráfica 1. Progresión temporal del Índice de Contaminación por pH (ICOpH) de la CGSM. Fuente: INVEMAR (2019b), elaborado por Flórez Matute (2020).

Tabla 7. Índice de Contaminación del agua por pH (ICOpH) de la CGSM

	Contaminación								
	Boca de La Barra	Islas del Rosario	Boca del Caño Grande	Frente a Río Aracataca	Frente a Río Sevilla	Tasajera	Centro de la CGSM	Frente a Río Fundación	Rinconada
Oct/18	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna
Nov/18	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna
Dic/18	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna
Ene/19	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Baja	Media	Ninguna	Baja	Media	Baja
Feb/19	Ninguna	Ninguna	Baja	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Baja	Ninguna	Baja
Mar/19	Ninguna	Ninguna	Media	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna
Abr/19	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna
May/19	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna
Jun/19	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna
Jul/19	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna
Ago/19	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna
Sep/19	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna

Fuente: Flórez Matute (2020).

En cuanto al Índice de Contaminación por Sólidos Suspendidos (ICOSUS), en la Gráfica 2 se puede observar que la mayoría de las estaciones lleva una misma línea de tendencia, sin embargo, las estaciones Frente a Río Sevilla, Boca del Caño Grande y Rinconada presentan valores de 0 durante los meses de diciembre de 2018, marzo y mayo de 2019 y julio de 2019, respectivamente; esto debido que los valores de SST fueron menores a 10 mg/L y se les asignó ese valor de acuerdo con las recomendaciones de Ramírez & Viña (1998), por lo tanto, sus concentraciones se consideran nulas y no hay riesgo de que generen afectaciones a la salud humana o las diferentes actividades que se lleven a cabo en la zona (Cañas, 2010, citado por Montero & Ramírez, 2018). Así mismo, se observa que la estación Frente a Río Sevilla asciende su valor de 0, en diciembre de 2018, a 5.3, enero de 2019, mes donde se presenta un incremento en la concentración de sólidos suspendidos en todas las estaciones, a excepción de la estación Boca de La Barra.



Gráfica 2. Progresión temporal del Índice de Contaminación por Sólidos Suspendidos (ICOSUS) de la CGSM. Fuente: INVEMAR (2019b), elaborado por Flórez Matute (2020).

A partir de lo anterior, en la Tabla 8 se observa la clasificación cualitativa de la contaminación del agua de la CGSM en las diferentes estaciones de monitoreo, dada por Ramírez, Restrepo & Cardeñosa (1999). Además, se infiere que de las 108 muestras analizadas (una muestra mensual para cada una de las nueve estaciones durante doce meses de estudio), el 66.66% (72) clasifican con presencia de contaminación nula o ninguna contaminación, el 28.7% (31) reportan una contaminación baja y el 4.63% (5) contaminación media del agua, siendo las estaciones Centro de la CGSM, Boca del Caño Grande y Rinconada las de mejor calidad dada su nula o baja contaminación durante el tiempo de muestreo, además de tener mediciones completas. Así mismo, se puede determinar que el mes con mayor grado de contaminación fue enero de 2019, seguido de febrero de 2019, y, la estación con mayor grado de contaminación fue Boca de La Barra, seguida de Islas del Rosario, Frente a Río Sevilla y Frente a Río Fundación.

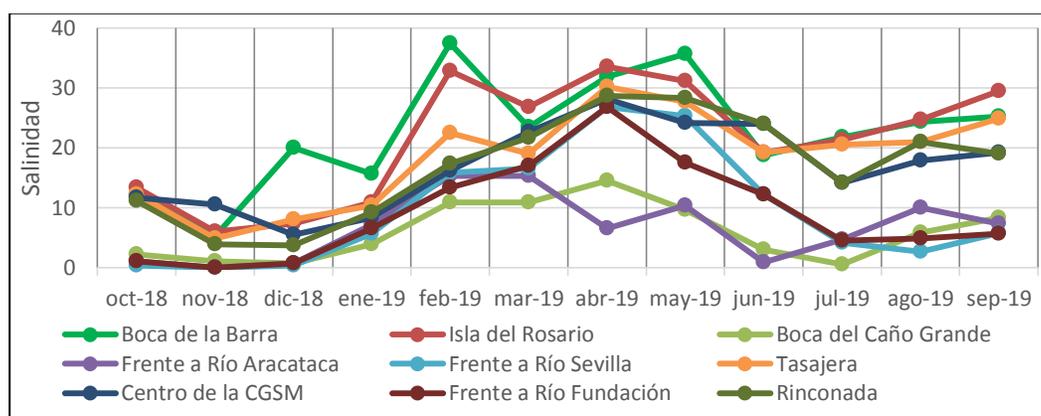
La información detallada de los valores graficados (Gráfica 2) y la clasificación cuantitativa por el ICOSUS a partir de la cual se da la clasificación cualitativa del mismo (Tabla 8), se encuentra relacionada en el Anexo 7.

Tabla 8. Índice de Contaminación del agua de la CGSM por Sólidos Suspendidos (ICOSUS)

	Contaminación								
	Boca de La Barra	Islas del Rosario	Boca del Caño Grande	Frente a Río Aracataca	Frente a Río Sevilla	Tasajera	Centro de la CGSM	Frente a Río Fundación	Rinconada
Oct/18	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna
Nov/18	Media	Ninguna	Baja	Ninguna	Baja	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna
Dic/18	Media	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna
Ene/19	Baja	Baja	Baja	Ninguna	Media	Baja	Baja	Media	Baja
Feb/19	Media	Baja	Ninguna	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
Mar/19	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Baja	Baja	Ninguna	Ninguna	Baja	Ninguna
Abr/19	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Baja	Baja	Ninguna	Baja	Ninguna
May/19	Ninguna	Baja	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna
Jun/19	Ninguna	Baja	Ninguna	Baja	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna
Jul/19	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Baja	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna
Ago/19	Baja	Baja	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna
Sep/19	Baja	Baja	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Baja	Ninguna	Baja	Ninguna

Fuente: Flórez Matute (2020).

En la Gráfica 3 se muestra la conducta de los valores de salinidad en las diferentes estaciones, logrando identificar de esta manera el comportamiento del sistema frente al incremento o disminución en los aportes de agua dulce y salada durante los doce meses de muestreo. Dicho lo anterior, se observa que la gran mayoría de los valores fluctuaron entre 0.56 y 16.98, ubicado dentro del segundo rango de clasificación del agua por salinidad de Knox (2001). Además, se puede notar que durante el mes de febrero de 2019 todas las estaciones reportan un incremento en el valor de salinidad, especialmente las estaciones Boca de La Barra e Islas del Rosario, con valores 37.39 y 32.83, respectivamente. De igual manera, estas estaciones reportan los valores más altos durante los tres siguientes meses (marzo de 2019 a mayo de 2019). Las estaciones Frente a Río Aracataca y Boca del Caño Grande presentan los valores más bajos de salinidad durante el periodo de muestreo. Es importante mencionar que las estaciones Frente a Río Aracataca, Frente a Río Sevilla y Frente a Río Fundación presentaron valores de 0 durante el mes de noviembre de 2018.



Gráfica 3. Progresión temporal de los valores de Salinidad de la CGSM. Fuente: INVEMAR (2019b), elaborado por Flórez Matute (2020).

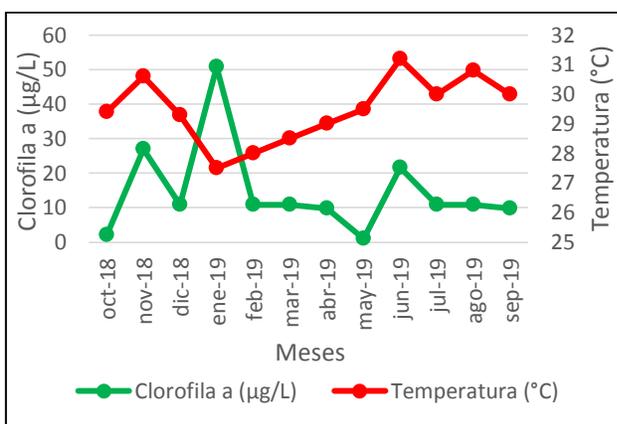
En la Tabla 9 se muestra la clasificación del agua según Knox (2001) para los 108 muestreos en las nueve estaciones durante los doce meses de monitoreo, a partir de lo cual y de acuerdo con la gráfica anterior, se infiere que el 4.63% de los valores fluctuaron de salinidad (5 datos) entre 0 y 0.37, el 56.48% (61 datos) entre 0.56 y 16.98 y el 38.88% (42 datos), entre 17.35 y 37.39, indicando aguas de tipo dulce, salobre y marinas, respectivamente. Además, se observa que la estación con mayor grado de salinidad es Boca de La Barra, la cual se encuentra en el punto de conexión entre el cuerpo hídrico y el mar Caribe, seguida de Islas del Rosario, Tasajera y Rinconada, todas al norte de la CGSM.

Tabla 9. Clasificación del agua de la CGSM de acuerdo con el grado de salinidad

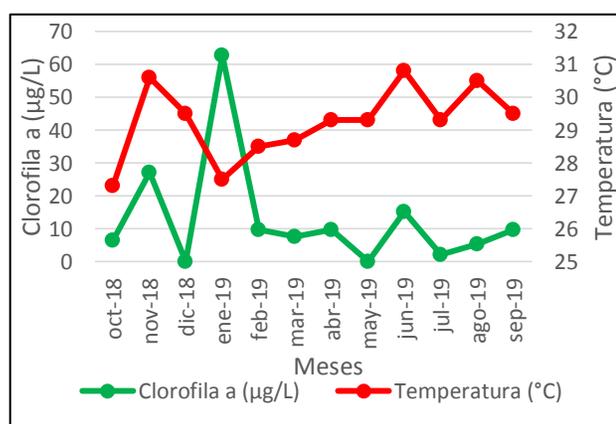
	Tipo de Agua								
	Boca de La Barra	Islas del Rosario	Boca del Caño Grande	Frente a Río Aracataca	Frente a Río Sevilla	Tasajera	Centro de la CGSM	Frente a Río Fundación	Rinconada
Oct/18	Salobre	Salobre	Salobre	Salobre	Dulce	Salobre	Salobre	Salobre	Salobre
Nov/18	Salobre	Salobre	Salobre	Dulce	Dulce	Salobre	Salobre	Dulce	Salobre
Dic/18	Marina	Salobre	Salobre	Salobre	Dulce	Salobre	Salobre	Salobre	Salobre
Ene/19	Salobre	Salobre	Salobre	Salobre	Salobre	Salobre	Salobre	Salobre	Salobre
Feb/19	Marina	Marina	Salobre	Salobre	Salobre	Marina	Salobre	Salobre	Marina
Mar/19	Marina	Marina	Salobre	Salobre	Salobre	Marina	Marina	Salobre	Marina
Abr/19	Marina	Marina	Salobre	Salobre	Marina	Marina	Marina	Marina	Marina
May/19	Marina	Marina	Salobre	Salobre	Marina	Marina	Marina	Marina	Marina
Jun/19	Marina	Marina	Salobre	Salobre	Salobre	Marina	Marina	Salobre	Marina
Jul/19	Marina	Marina	Salobre	Salobre	Salobre	Marina	Salobre	Salobre	Salobre
Ago/19	Marina	Marina	Salobre	Salobre	Salobre	Marina	Marina	Salobre	Marina
Sep/19	Marina	Marina	Salobre	Salobre	Salobre	Marina	Marina	Salobre	Marina

Fuente: Flórez Matute (2020).

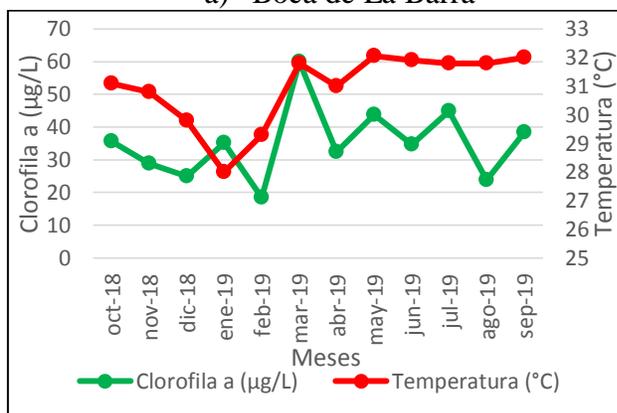
En la Gráfica 4 se observa la relación de la progresión temporal de las concentraciones de clorofila a y la temperatura del agua de la CGSM, en la cual se puede observar que en la mayoría de los casos que el incremento de la temperatura está precedido por el incremento considerable de las concentraciones de clorofila a, tal como ocurre en las estaciones Boca de La Barra, Islas del Rosario, Boca del Caño Grande, Frente a Río Sevilla, Tasajera, Centro de la CGSM, Frente a Río Fundación y Rinconada, a partir de enero de 2019, y, Frente a Río Aracataca, a partir de febrero de 2019.



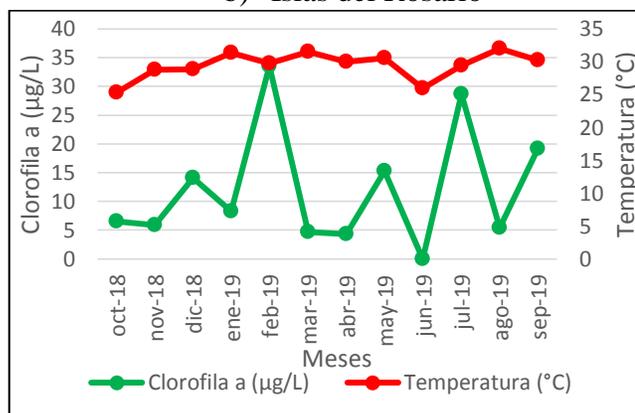
a) Boca de La Barra



b) Islas del Rosario

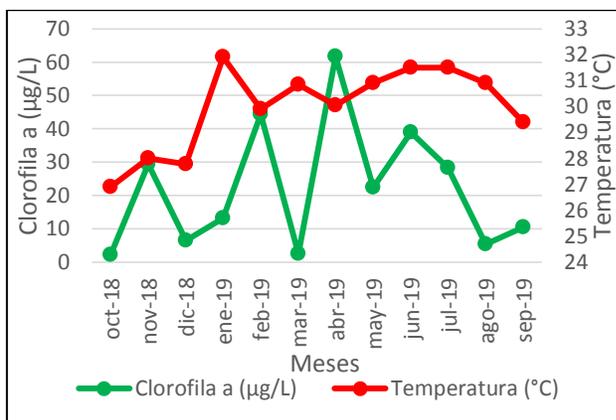


c) Boca del Caño Grande

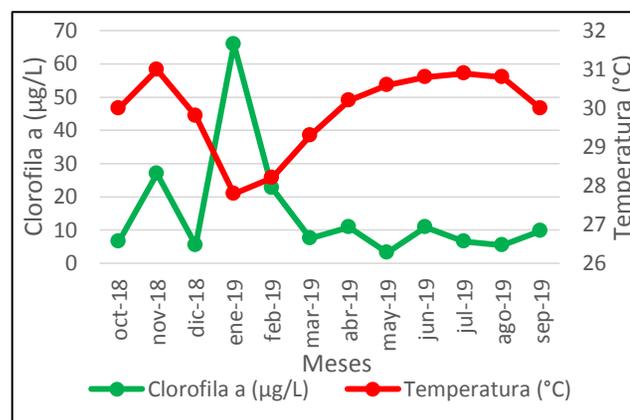


d) Frente a Río Aracataca

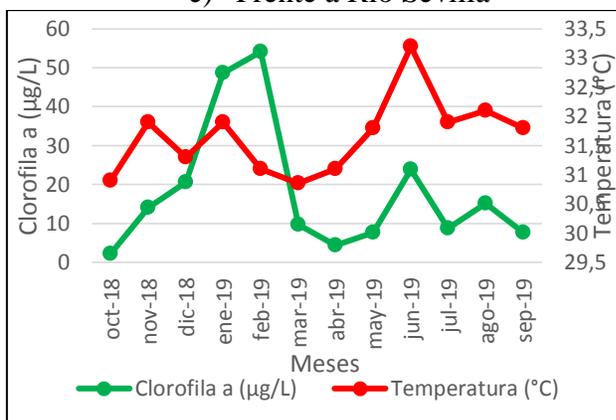
Evaluación de la Calidad del Agua y Usos del Suelo en la Ciénaga Grande de Santa Marta, jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del Magdalena.



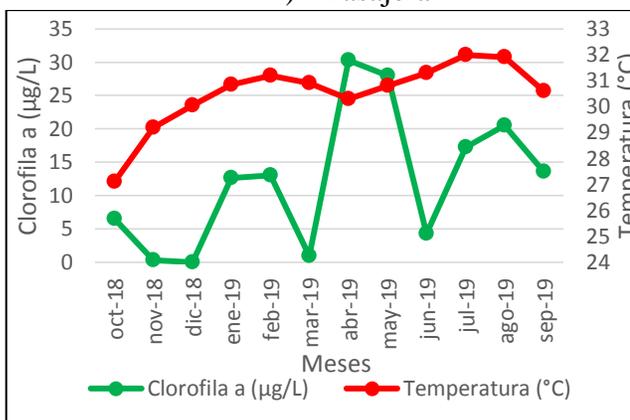
e) Frente a Río Sevilla



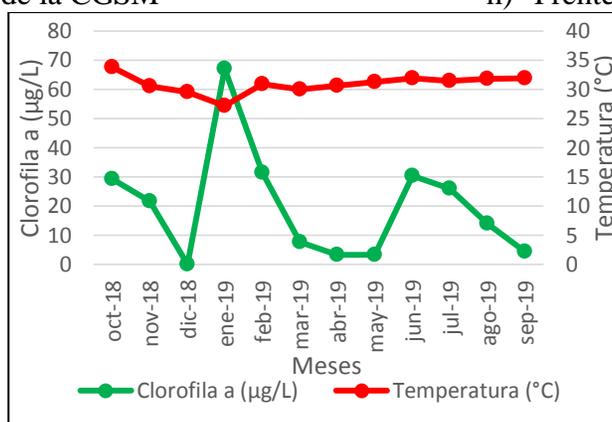
f) Tasajera



g) Centro de la CGSM



h) Frente a Río Fundación



i) Rinconada

Gráfica 4. Progresión temporal de las concentraciones de Clorofila a y la Temperatura del agua de la CGSM. Fuente: INVEMAR (2019b), elaborado por Flórez Matute (2020).

Lo anterior se produce dado que el aumento de las concentraciones de clorofila a está precedido por el aporte excesivo de nutrientes como el fósforo y el nitrógeno (Mancera, Pinto &

Vilardy, 2013), lo que causa que se presente un mayor número de algas y otras plantas, alterando las características del medio y la cadena trófica, aumentando la entropía del ecosistema (JMGAV, 2012, iagua, 2018, Bonansea, et al., 2012, Martínez, 2017 y Vega, de Hoyos & Aldasoro, 2004).

La Tabla 10 muestra la clasificación del estado trófico del agua de acuerdo con la concentración de Clorofila a en las diferentes estaciones a lo largo del periodo de monitoreo, a partir de la cual, se obtiene que el 11.11% (12 datos) son $< 2,5 \mu\text{g Cla/L}$, el 24.07% (26 datos) fluctúa entre los valores de 2.5 y $8 \mu\text{g Cla/L}$, el 36.11% (39 datos) se encuentra entre los 8 y $25 \mu\text{g Cla/L}$ y el 28.7% restante (31 datos), fluctúa entre los valores de 25 a $75 \mu\text{g Cla/L}$; por lo cual le corresponde las clasificaciones de Ultraoligotróficos, Oligotrófico, Mesotrófico y Eutrófico, respectivamente, según la OCDE (1982) y Chapra (1997), citado por López & Madroñero (2015). Es importante mencionar que en la CGSM no se han registrado, durante el periodo de monitoreo, concentraciones de clorofila a mayores a los $75 \mu\text{g Cla/L}$, por lo cual no se presenta la clasificación de Hipereutrófico, lo cual indicaría un grado de contaminación inminente y difícil de reparar.

Por lo anterior, de la Tabla 10 se deduce que la estación que representa el mejor estado trófico del agua de la CGSM es Islas del Rosario, así como también se aprecia que el mes con el mejor comportamiento trófico es el de octubre de 2018.

Tabla 10. Clasificación del estado trófico de de la CGSM según la concentración de Clorofila.

	Estado Trófico								
	Boca de La Barra	Islas del Rosario	Boca del Caño Grande	Frente a Río Aracataca	Frente a Río Sevilla	Tasajera	Centro de la CGSM	Frente a Río Fundación	Rinconada
Oct/18	U	O	E	O	U	O	U	O	E
Nov/18	E	E	E	O	E	E	M	U	M
Dic/18	M	U	M	M	O	O	M	U	U
Ene/19	E	E	E	M	M	E	E	M	E
Feb/19	M	M	M	E	E	M	E	M	E
Mar/19	M	O	E	O	O	O	M	U	O
Abr/19	M	M	E	O	E	M	O	E	O
May/19	U	U	E	M	M	O	O	E	O
Jun/19	M	M	E	U	E	M	M	O	E
Jul/19	M	U	E	E	E	O	M	M	E
Ago/19	M	O	M	O	O	O	M	M	M
Sep/19	M	M	E	M	M	M	O	M	O

Fuente: Flórez Matute (2020).

U: Ultraoligotrófico

O: Oligotrófico

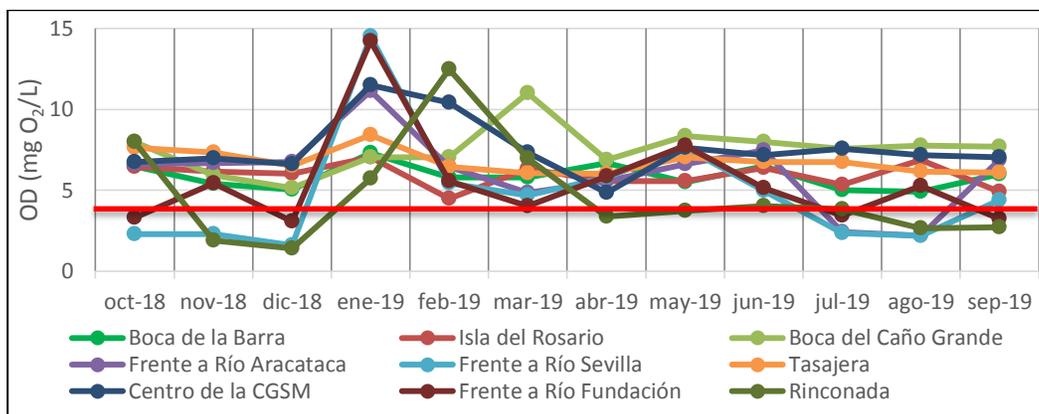
M: Mesotrófico

E: Eutrófico

H: Hipereutrófico

En la Gráfica 5 se observa que el oxígeno disuelto (OD) del agua superficial de las estaciones Boca de La Barra, Islas del Rosario y Tasajera, fue adecuado para la preservación de flora y fauna, dado que supera los 4 mg O₂/L, límite mínimo establecido por el Ministerio de Ambiente en el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible 1076 de 2015 (franja roja). Caso contrario ocurre con las estaciones Frente a Río Aracataca, Frente a Río Sevilla, Frente a Río Fundación y Rinconada, que en varios de los meses de monitoreo presenta valores inferiores a dicho límite establecido, hecho reiterativo y que está relacionado con procesos de descomposición continua de materia orgánica (INVEMAR, 2019b).

Así mismo, varias estaciones, que a pesar de tener valores por encima del límite mínimo para la preservación de flora y fauna, presenta valores que superan los 9 mg O₂/L, llegando a concentraciones de 14.53 mg O₂/L, no son consideradas como buenos indicadores de la preservación de flora y fauna, dado indican condiciones de sobresaturación, lo cual es indicador de la elevada actividad fotosintética, proceso en el cual se consume CO₂ y se libera O₂ (INVEMAR, 2019b), tal como es el caso de las estaciones Frente a Río Sevilla, Frente a Río Fundación Frente a Río Aracataca, Boca del Caño Grande y Rinconada y Centro de CGSM, en uno y dos de los meses de muestreo, respectivamente.



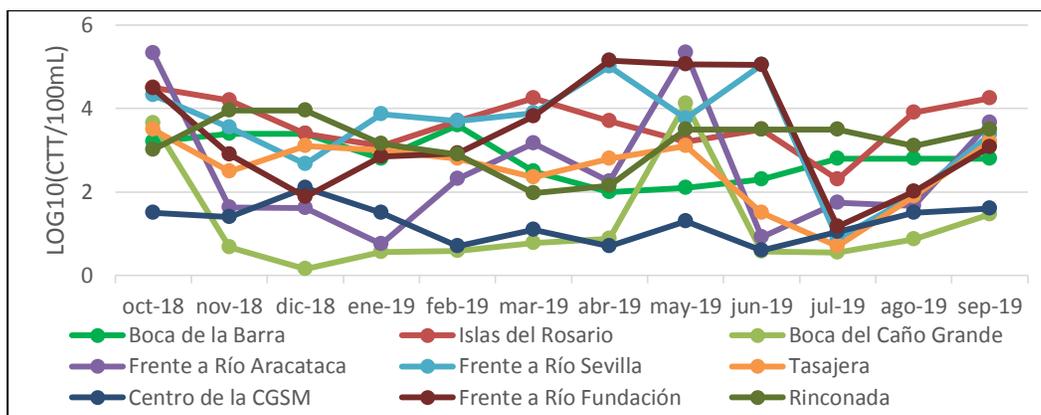
Gráfica 5. Progresión temporal de las concentraciones de Oxígeno Disuelto en el agua de la CGSM. Fuente: INVEMAR (2019b), elaborado por Flórez Matute (2020).

La Gráfica 6 cuenta con la información de las concentraciones de Coliformes Totales LOG₁₀ (CTT/100mL) de cinco estaciones de monitoreo, a diferencia de las anteriores, que muestran información de nueve estaciones de monitoreo. Estas concentraciones indican la cantidad de bacterias encontradas en heces de humanos y animales de sangre caliente, por lo cual, los valores elevados indican contaminación reciente por residuos con contenido fecal (McGinnis, *et al.*, 2018), siendo la principal fuente de entrada de patógenos entéricos, lo que representa un riesgo significativo para las comunidades humanas y la fauna presente (Karbadehi *et al.*, 2017).

De lo anterior, se infiere que la estación con las menores concentraciones de Coliformes Totales a lo largo del periodo es Centro de la CGSM, fluctuando entre los valores de 4 NMP/100mL (Log₁₀=0.6) y 626.5 NMP/100mL (Log₁₀=2.1), para los meses de junio de 2019 y diciembre de 2018. Así mismo, la estación con las mayores concentraciones, a lo largo del periodo, es Islas del Rosario, con valores que van de 709.5 NMP/100mL (Log₁₀=2.3) y 116904.76 NMP/100mL (Log₁₀=4.5), para los meses de julio de 2019 y octubre de 2018.

Ricardo Andrés Flórez Matute

Se observa también, que 21 de los valores de concentración de Coliformes Totales registrados en el monitoreo, se encuentran en la línea o por encima del límite permisible para contacto secundario establecido por el Decreto 1076 de 2015 (5000 NMP/100mL: $\text{Log}_{10}=3.7$).

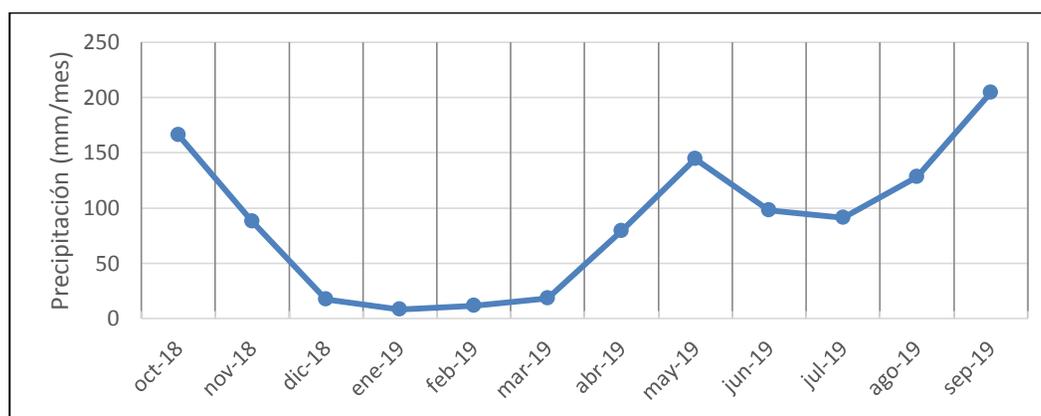


Gráfica 6. Progresión temporal de las concentraciones de Coliformes Totales en el agua de la CGSM. Fuente: INVEMAR (2019b), elaborado por Flórez Matute (2020).

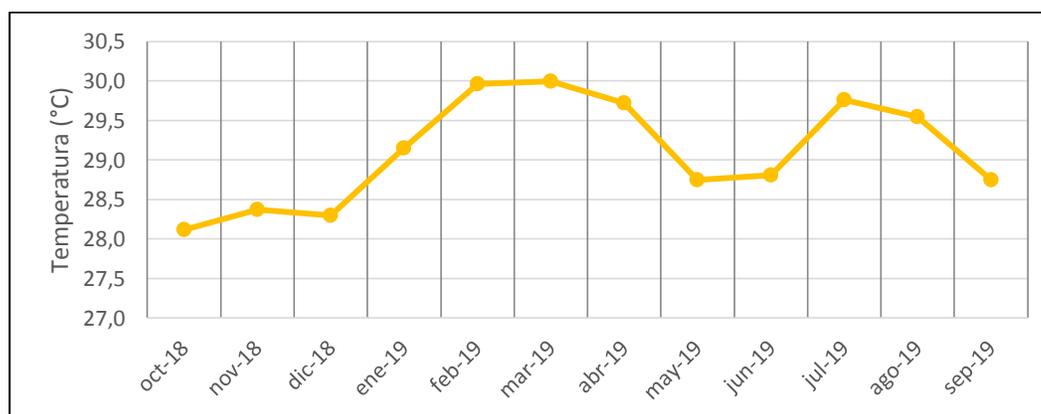
Los parámetros de Clorofila a y Coliformes Totales presentan un comportamiento atípico, generando controversia con la literatura, de manera que la salinidad, limitan la permanencia y proliferación de los coliformes en los ecosistemas acuáticos marinos y estuarinos (Gómez et al., 2008), pero, en la estación Boca de La Barra, donde se da la conexión entre la CGSM y el mar Caribe y se presentó el valor más alto de salinidad registrado en las diferentes estaciones y meses de monitoreo (37.39, en febrero de 2019), también se presentó la concentración más alta de Coliformes Totales, con un valor de 4428.57 NMP /100mL ($\text{LOG}_{10}=3.6$), para el mismo mes.

7.4. Determinación de la calidad del agua de la zona de estudio

Como se muestra en la Gráfica 7, durante el periodo de estudio, los meses de diciembre de 2018, enero, febrero y marzo de 2019 representan los valores más bajos de precipitación, siendo el segundo de estos el que reporta el menor dato con un valor de 8.297 mm, dato que se ve relacionado con el aumento significativo de los valores en las variables de Temperatura (Gráfica 8), Radiación Solar (Grafica 9) y Velocidad del Viento (Gráfica 10).

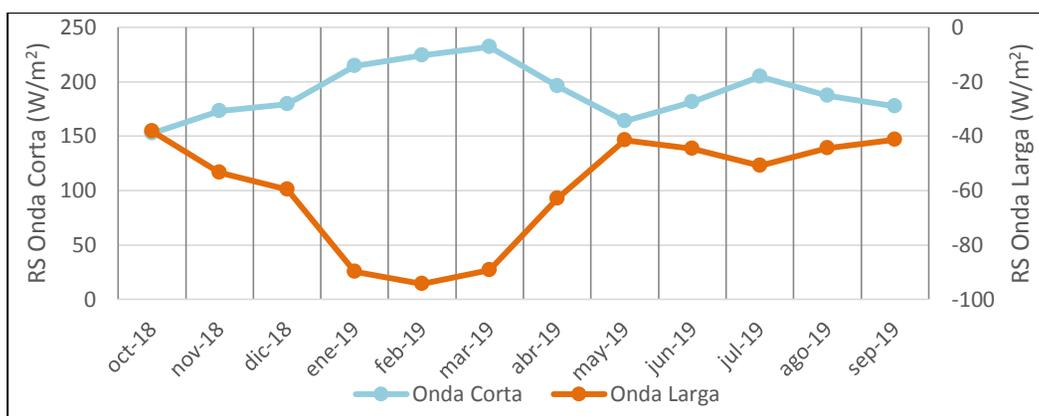


Gráfica 7. Progresión temporal de la Precipitación sobre el área de la CGSM. Fuente: NASA Giovanni (2020), elaborado por Flórez Matute (2020).

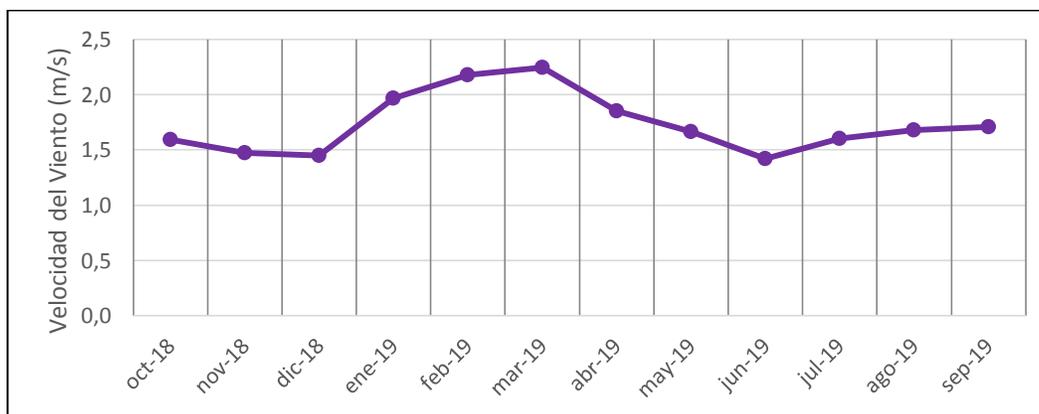


Gráfica 8. Progresión temporal de la Temperatura sobre el área de la CGSM. Fuente: NASA Giovanni (2020), elaborado por Flórez Matute (2020).

Ricardo Andrés Flórez Matute



Gráfica 9. Progresión temporal de la Radiación Solar de Onda Larga y de Onda Corta sobre el área de la CGSM. Fuente: NASA Giovanni (2020), elaborado por Flórez Matute (2020).

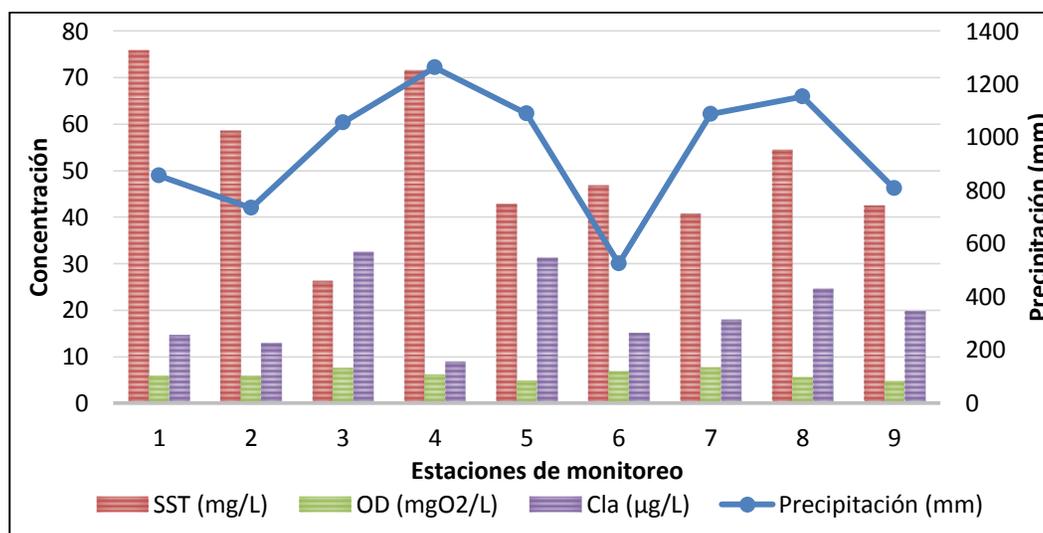


Gráfica 10. Progresión temporal de la Velocidad del Viento sobre el área de la CGSM. Fuente: NASA Giovanni (2020), elaborado por Flórez Matute (2020).

A partir de lo anterior, se evidencia una relación entre el comportamiento de las variables hidrometeorológicas y el incremento significativo de la salinidad en las estaciones de muestreo durante los meses de enero y febrero de 2019.

Evaluación de la Calidad del Agua y Usos del Suelo en la Ciénaga Grande de Santa Marta, jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del Magdalena.

En las Gráficas 11 y 12 se muestra la relación entre el comportamiento de la Precipitación y los parámetros de Sólidos Suspendedos Totales, Oxígeno Disuelto y Clorofila a, para la primera, y Precipitación y pH, Salinidad y Coliformes Totales, para la segunda. Los valores que en las gráficas se presentan corresponden a los valores anuales a partir de los datos obtenidos del periodo de monitoreo. Las estaciones de monitoreo enumeradas del 1 al 9 corresponden a Boca de La Barra, Isilas del Rosario, Boca del Caño Grande, Frente a Río Aracataca, Frente a Río Sevilla, Tasajera, Centros de la CGSM, Frente a Río Fundación y Rinconada, correspondiendo el numero 1 a la primera y el 9 a la última de las mencionadas.



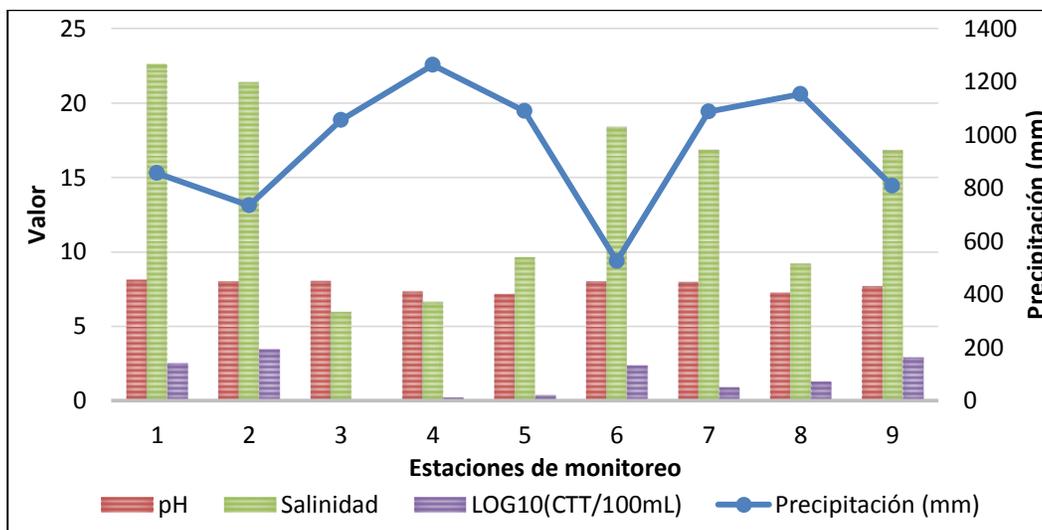
Gráfica 11. Relación entre la Precipitación de la zona y los parámetros de Sólidos Suspendedos Totales, Oxígeno Disuelto y Clorofila a. Fuente: modificado de INVEMAR (2019b) y NASA Giovanni (2020), elaborado por Flórez Matute (2020).

Los valores más altos de SST están relacionados con el incremento significativo de las precipitaciones, por lo cual se intuye el aporte de agua dulce en forma de lluvia escorrentía y el caudal aportado por los ríos podrías estar generando aportes de sólidos que estos arrastras hasta el cuerpo hídrico. Sin embargo, no se cumple en todos los casos de las estaciones, al igual que la

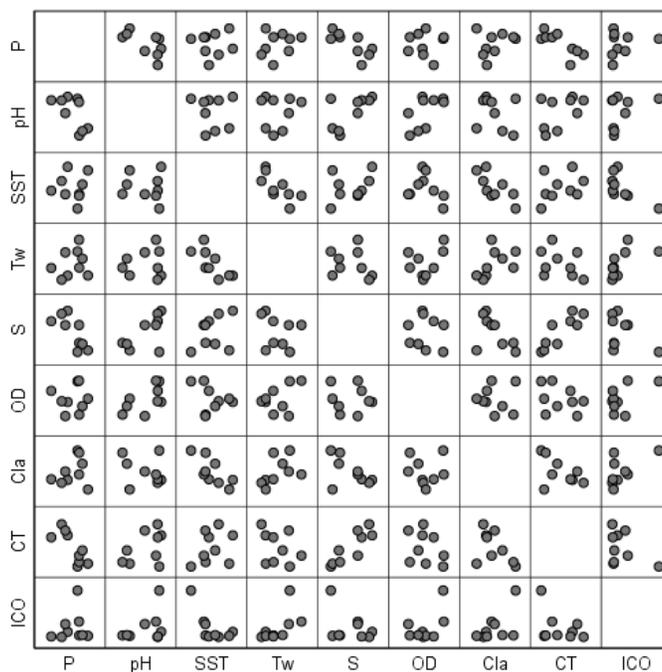
Ricardo Andrés Flórez Matute

Tabla 11 indica que estas dos variables poseen poca relación entre sí. Así como ocurre con los SST, el OD tampoco se encuentra muy relacionado con los cambios de precipitación identificados en el área de la CGSM. En cuanto a las concentraciones de Clorofila a, se evidencia que se encuentran medianamente relacionadas entre sí de forma directa.

En la Gráfica 12 se observa una significativa relación inversa entre la precipitación y los valores de pH y Salinidad del agua, la cual es corroborada por los coeficientes de correlación mostrados en la Tabla 11 con valores de -0,619 y -0,750, respectivamente, mientras que los Coliformes Totales tienen una relación muy estrecha pero inversa (coeficiente de relación de -0,796). De lo anterior se infiere que en épocas de lluvias el medio acuático de la CGSM presenta menor cantidad de material fecal proveniente de las necesidades humanas y animales de sangre caliente. Estos valores pueden ser evidenciados en el esquema de dispersión matricial representado en la Gráfica 13.



Gráfica 12. Relación entre la Precipitación de la zona y los parámetros de pH, Salinidad y Coliformes Totales. Fuente: modificado de INVEMAR (2019b) y NASA Giovanni (2020), elaborado por Flórez Matute (2020).



Gráfica 13. Diagrama de dispersión matricial de las variables en estudio. Fuente: Flórez Matute (2020).

De la gráfica anterior, es preciso resaltar que la salinidad es el parámetro con mayor particularidad, de manera que en época de sequías puede crear determinados contextos que impactan el ecosistema, tanto acuático como de manglar, entre los cuales se puede mencionar la migración de gran cantidad de especies de peces dulceacuícolas hacia otras zonas del complejo cenagoso, de manera que las características del agua no son las mejores, dando paso al decrecimiento del material vegetal (Severiche, Barreto & Acevedo, 2013).

De la Tabla 11 se puede observar, que la variable con mayor relación con el valor del ICO son los SST, pero de manera inversa (-0.69), lo que quiere decir, que si esta última aumenta, la primera disminuye y viceversa (Novales, 2012). Seguidamente, se encuentran las variables de T_w , Cla y OD, todas con relación directa con respecto a la variable dependiente (ICO). Por el contrario, la variable con menor incidencia en el comportamiento del ICO es la Precipitación (P), indicando una relación baja. Lo anterior mostro en la Gráfica 13, dónde se observó mayor dispersión de los datos en la correlación de las variables de Precipitación e ICO. Caso inverso ocurre con la relación entre la T_w , Cla, SST y OD con respecto al ICO, en la que se evidencian puntos datos con menor dispersión entre sí, por lo cual hay mayor grado de relación, en este caso dependencia, entre estos cuatro grupos de variables.

Tabla 11. Coeficientes de correlación de Pearson para las variables en la construcción del modelo.

Correlación de Pearson									
	ICO	P	pH	SST	T _w	S	OD	Cla	CT
ICO	1	0,184	0,391	-0,690	0,599	-0,372	0,547	0,567	-0,415
P	0,184	1	-0,619	0,029	0,241	-0,750	0,021	0,272	-0,796
pH	0,391	-0,619	1	-0,113	0,093	0,627	0,598	-0,236	0,447
SST	-0,690	0,029	-0,113	1	-0,728	0,337	-0,314	-0,741	0,321
T _w	0,599	0,241	0,093	-0,728	1	-0,232	0,376	0,469	-0,333
S	-0,372	-0,750	0,627	0,337	-0,232	1	-0,068	-0,517	0,865
OD	0,547	0,021	0,598	-0,314	0,376	-0,068	1	-0,038	-0,331
Cla	0,567	0,272	-0,236	-0,741	0,469	-0,517	-0,038	1	-0,487
CT	-0,415	-0,796	0,447	0,321	-0,333	0,865	-0,331	-0,487	1

ICO: Índice de Contaminación, P: Precipitación, pH: potencial Hidrógeno, SST: Sólidos Suspendidos Totales, T_w: Temperatura del agua, S: Salinidad, OD: Oxígeno Disuelto, Cla: Clorofila a y CT: Coliformes Totales

Fuente: modificado de SPSS por Flórez Matute (2020).

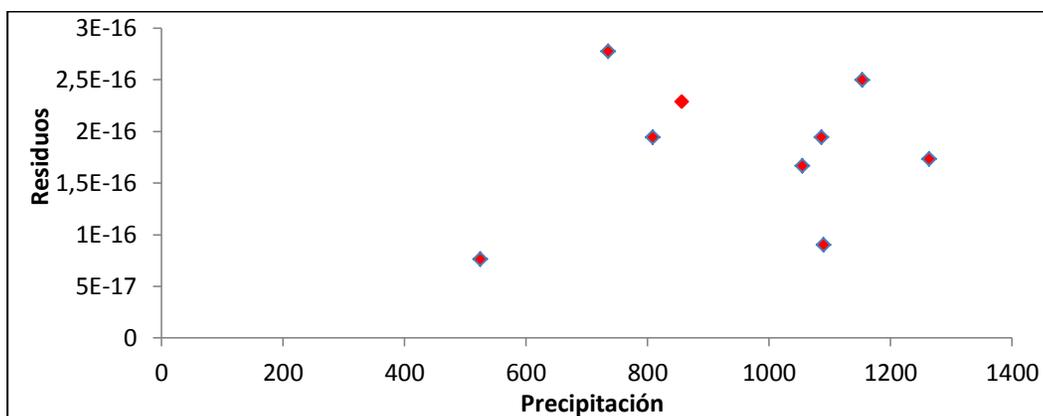
De acuerdo con Amat (2016), se obtuvo un modelo matemático lineal multivariable o múltiple del Índice de Contaminación (ICO) en función de una variable hidrometeorológica y siete parámetros fisicoquímicos, tal como se muestra en la Ecuación 4.

$$\begin{aligned}
 \mathbf{ICO} = & 4,557 \times 10^{-5} \mathbf{P} + 0,126 \mathbf{pH} - 0,0004 \mathbf{SST} \\
 & + 0,007 \mathbf{T}_w - 0,004 \mathbf{S} - 0,018 \mathbf{OD} + 0,0003 \mathbf{Cla} \\
 & - 0,003 \mathbf{CT} - 0,967
 \end{aligned}
 \tag{Ec. 4}$$

Donde **P** es la Precipitación en mm, **pH** es el potencial Hidrógeno, **SST** es la Concentración de Sólidos Suspendidos Totales en g/m³ o mg/L, **T_w** es la Temperatura del agua en °C, **S** es el grado de Salinidad del agua, **OD** es la concentración de Oxígeno Disuelto en mgO₂/L, **Cla** es la concentración de Clorofila a en µg/L y **CT** es la concentración de Coliformes Totales en LOG₁₀(CTT/100mL).

El análisis de los supuestos del modelo, Sumatoria de Residuos, Linealidad, Independencia, Homocedasticidad y Normalidad, obtenidos de la regresión, se muestra a continuación:

- La Sumatoria de Residuos presenta una tendencia a 0 ($1,65146 \times 10^{-15} \approx 0$), por lo cual, se infiere que los valores simulados son muy similares a los observados (Moreno, Rodríguez & Soberon, 2018 y Flórez, 2012). Además, en la Gráfica 14 y los Anexos del 8 al 14, se puede observar la poca, casi nula, variación de los valores pronosticados a los observados, es decir, los residuos generados son casi despreciables.

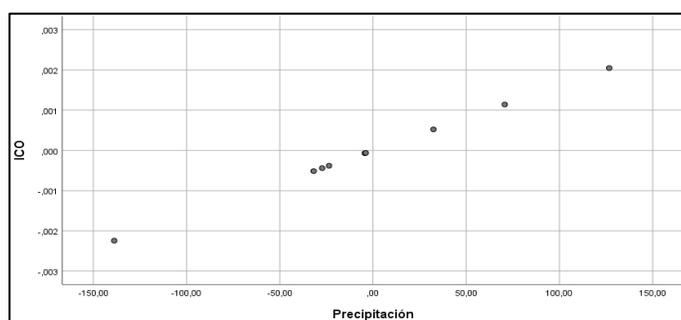


Gráfica 14. Dispersión de los Residuales de Precipitación. Fuente: Flórez Matute (2020).

- De acuerdo con Quiroga (2016), existe linealidad entre la variable dependiente, ICO, y cada una de las variables independientes, a partir de lo cual se infiere que no existe un error de especificación. Para el caso de la variable independiente Precipitación (P), en la Gráfica 15 se observa su comportamiento lineal y son directamente proporcionales.

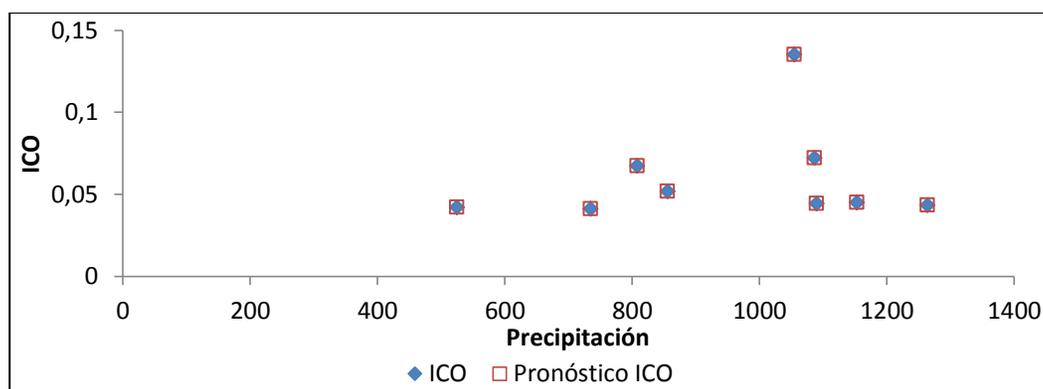
Evaluación de la Calidad del Agua y Usos del Suelo en la Ciénaga Grande de Santa Marta, jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del Magdalena.

Además, en los Anexos del 15 al 21, se observa la linealidad para cada variable parcial, y, que en el caso del pH, Tw y Cla, son directamente proporcionales al ICO, y SST, OD, S y CT, inversamente proporcionales al ICO.



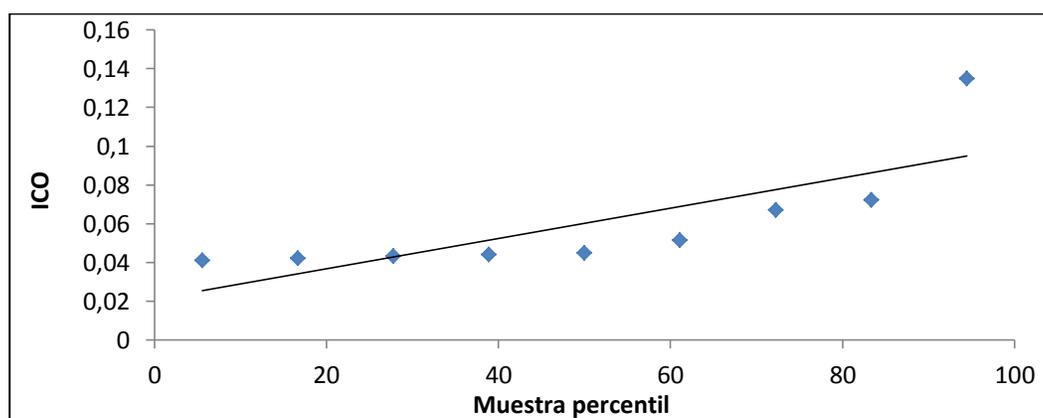
Gráfica 15. Diagrama de dispersión parcial para la variable independiente de Precipitación.
Fuente: Flórez Matute (2020).

- Mediante el estadístico de Durbin-Watson, se tiene que existe una relación de independencia con una correlación positiva, de manera que D (0.313) es menor que DL (1.381), para un tamaño de muestra de 72 con nueve términos en la ecuación, incluida la intercepción (Durbin & Watson, 1951, Savin & White, 1977 y Quiroga, 2016).
- En cuanto a la homocedasticidad, en la Gráfica 15 se muestra la igualdad de varianzas de los residuos y los pronósticos, a partir de lo cual se infiere que la variación de los residuos es uniforme en todo el rango de valores de los pronósticos (Quiroga, 2016 y Flórez, 2012). Asimismo, para el caso de las otras siete variables, se presenta un comportamiento igual al mostrado en la Gráfica 15 (Anexo 22-28).



Gráfica 16. Curva de Regresión ajustada para la variable de Precipitación. Fuente: Flórez Matute (2020).

- En la Gráfica 16 se observa que los valores siguen un patrón acorde con la línea de tendencia, cuyo comportamiento de normalidad de los errores permite la estimación por intervalos de confianza para la predicción de valores (Flórez, 2012).



Gráfica 17. Probabilidad normal. Fuente: Flórez Matute (2020).

Por otro lado, el coeficiente de determinación, R^2 , arrojado durante la regresión es de 1, lo que indica la varianza residual es nula, es decir, que el ajuste es perfecto, por lo que puede

Evaluación de la Calidad del Agua y Usos del Suelo en la Ciénaga Grande de Santa Marta, jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del Magdalena.

utilizarse con confianza para efectuar evaluaciones e inferencias acerca de la cuestión conceptual que lo motivó inicialmente (Novales, 2010).

En la Tabla 11 se muestran los resultados de la aplicación de cinco medidas de bondad de ajuste o criterios de calibración del modelo obtenido, a partir de lo cual, la Eficiencia de Nash-Sutcliffe (E_{NSE}), la Raíz del error cuadrático medio (RMSE), el Criterio de Schultz ($D_{Schultz}$), la Desviación media acumulada (MAD) y el Error de balance de masas (m), el primero con un valor de uno (1) y los otros cuatro tendentes a cero (≈ 0), indican una simulación perfecta del modelo, conllevando a un ajuste perfecto del mismo, dado que la desviación de los valores simulados con respecto a los observados es mínima (Molnar, 2011; Finger, 2011; Zappa, 2011).

Tabla 12. Medidas de bondad de ajuste del modelo.

Criterio	Ajuste
E_{NSE}	1
RMSE	$1,941 \times 10^{-16}$
$D_{Schultz}$	$1,203 \times 10^{-13}$
MAD	$1,834 \times 10^{-16}$
m	$3,051 \times 10^{-13}$

Fuente: Flórez Matute (2020).

Aunque el valor el coeficiente de relación entre el ICO y la Precipitación es casi nulo, en la simulación y calibración del modelo se pudo determinar que esta es de vital importancia para este, de manera que los cambios inducidos son muy notorios en el valor del ICO.

8. CONCLUSIONES

La CGSM es un amplio complejo ecosistémico que abarca una gran extensión superficial, ocupando casi que en su totalidad (más del 70%) el área del municipio de Pueblo Viejo, Magdalena, y almacenando un gran volumen de agua.

Los índices de contaminación del agua (ICO) aplicados indican que esta no se encuentra contaminada o que en ella hay poca contaminación. Sin embargo, se puede afirmar que el ICOpH presenta menor sensibilidad a los cambios ocurridos que el ICOSUS, el cual puede variar de una clasificación a otra con el más mínimo de los cambios de los valores. Así mismo, se concluye que los ICO indican que el agua de la CGSM es buena calidad.

Por otro lado, la clasificación por Salinidad y Clorofila-a indican que el agua se encuentra medianamente contaminada, con altos valores de sal en estaciones tales como Frente a Río Fundación, Centro de la CGSM y Rinconada, las cuales se encuentran ubicadas a 32,52 Km, 19,04 Km y 22,66 Km, respectivamente, del punto de conexión entre la CGSM y el mar Caribe, siendo la estación de Rinconada el punto por medio del cual el Caño Clarín conecta a la CGSM con el Río Magdalena, un aporte de agua dulce, así como el río Fundación . Mientras tanto, las concentraciones de Clorofila-a muestran eutrofización en el agua para las condiciones propias de la toma de la muestra.

Evaluación de la Calidad del Agua y Usos del Suelo en la Ciénaga Grande de Santa Marta, jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del Magdalena.

En cuanto a las concentraciones de Oxígeno Disuelto, se puede inferir que estas revelan un ambiente acuático, generalmente, óptimo para la preservación y conservación de la flora y la fauna, a partir de lo cual se concluye un agua de buena calidad. Sin embargo, en el caso de las estaciones con concentraciones por debajo del límite mínimo permisible, se debe a la intervención antrópica en las diferentes actividades del desarrollo, tal como ocurre frente a los cuerpos de los ríos Aracataca, Fundación y Sevilla, y, en la conexión con el caño Clarín.

Así mismo, el comportamiento de los valores de salinidad corresponde al aumento o disminución de la precipitación a lo largo del periodo de monitoreo, al igual que los índices más altos de contaminación, tanto por pH como por Sólidos Suspendidos, y el estado eutrófico del agua, que se evidencian, generalmente, en los meses con menor precipitación y/o aporte de agua dulce al sistema.

Los parámetros fisicoquímicos están estrechamente relacionados con las variables hidrometeorológicas, especialmente la salinidad, dado que se evidenció un incremento considerable de las concentraciones de sal en los meses en que se presentan menores precipitaciones y el aumento de temperaturas, atendiendo al aumento de la evapotranspiración, quedando la misma cantidad de sal para un menor volumen de agua. Además, las bajas precipitaciones disminuyen el aporte de agua dulce por parte de los ríos y caños que bajan de la SNSM y que se conectan con otros cuerpos dulceacuícolas, tales como el río Magdalena.

A partir de lo anterior, se determinó que la calidad del agua de la Ciénaga Grande de Santa Marta es clasificada como buena, basándose en los diferentes análisis realizados indicadores del grado de contaminación en el agua y las aptitudes para preservar y conservar la flora y fauna. Sin embargo, es preciso anotar que varias de las metodologías son muy sensibles a los cambios mínimos en algunos valores de los parámetros fisicoquímicos, por lo cual, fue muy acertado realizar un análisis multivariado de los diferentes indicadores de la calidad del agua con lo que se contaba información de la CGSM.

El modelo obtenido del Índice de Contaminación en función de la Precipitación y 7 parámetros fisicoquímicos (pH, SST, Cla, OD, S, T_w y CT) es óptimo, funcional y confiable, con un ajuste perfecto, lo cual indica que la desviación o diferencia entre lo observado y lo simulado no es muy significativa, por lo cual se infiere que este es adecuado para la determinación de tal índice en las condiciones de la CGSM.

9. RECOMENDACIONES

Se recomienda a la Corporación Autónoma Regional del Magdalena -CORPAMAG- y al Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras «José Benito Vives de Andreis» -INVEMAR- la constancia en la toma de muestras de los parámetros utilizados, especialmente Sólidos Suspendidos Totales, Clorofila-a y Coliformes Totales, así como también, la inclusión de parámetros indicadores de la calidad y el grado contaminación del agua, tales como Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Conductividad Eléctrica, Dureza, Fósforo Total, Nitrógeno Total, entre otros. Además, se recomienda hacer mantenimiento a los equipos de medición de parámetros tales como Oxígeno Disuelto, puesto que se presentan valores muy elevados en las concentraciones de este para un agua no potable.

Para futuros trabajos relacionados con la temática que esta investigación se abordó, se recomienda realizar un trabajo de campo minucioso, por medio del cual se puedan llevar a cabo la medición de muchos parámetros, y con ello, la aplicación tanto de los índices de calidad (ICA), mediante sus diferentes metodologías de cálculo, como de los índices de contaminación (ICO) y su análisis por medio de los seis tipos de modelos.

Así mismo, se recomienda tener en cuenta el análisis biológico de la zona, especialmente, el muestreo de fitoplancton y el análisis y clasificación de macroinvertebrados bentónicos para la clasificación de la calidad del agua por medio de métodos biológicos.

Ricardo Andrés Flórez Matute

LISTA DE REFERENCIAS

- Aguilera Díaz, M. M. (2009). Ciénaga De Ayapel: Riqueza en Biodiversidad y Recursos Hídricos. Documentos de trabajo sobre economía regional, (112), 74.
- Aguilera Díaz, M. M. (2011). La economía de las ciénagas del Caribe colombiano. Colección de Economía Regional. Banco de la República. ISBN: 978-958-664-245-3.
- Álvarez, M., Córdoba, S., Escobar, F., Fagua, G., Gast, F., Mendoza, H., Ospina, M., Umaña, A. M. & Villareal, H. (2004). Manual de Métodos para el Desarrollo de Inventarios de Biodiversidad. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Álvarez Arango, L. F. (2005). Metodología para la utilización de los Macroinvertebrados Acuáticos como Indicadores de la Calidad Del Agua. Desarrollar una metodología para la evaluación de los macroinvertebrados acuáticos como indicadores de los recursos hidrobiológicos – Proyecto Andes. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Amat Rodrigo, J. (2016). Introducción a la Regresión Lineal Múltiple. Ciencia de Datos. [En Línea]. Fecha de consulta: 4 de junio de 2020, Disponible en: https://www.cienciadedatos.net/documentos/25_regresion_lineal_multiple#:~:text=La%20regresi%C3%B3n%20lineal%20m%C3%BAltiple%20permite,2%2C%20X3%E2%80%A6.
- Arias Araya, M. F. (2016). Calidad de cuerpos receptores de agua, según el Índice Holandés de Valoración, en la Cuenca del Bebedero, Guanacaste. Costa Rica.
- Arija, C. M. (2012). Taxonomía, Sistemática y Nomenclatura, herramientas esenciales en Zoología y Veterinaria REDVET. Revista Electrónica de Veterinaria, 13(7). E-ISSN: 1695-7504.
- Audouit, C., Pasqualini, V., De Wit, R., Flanquart, H., Deboudt, P. & Rufin-Soler, C. (2019). Comparing social representation of water quality in coastal lagoons with normative use of ecological indicators. Marine Policy. 101, 137-146. ISSN 0308-597X.
- Auquilla, R. C., Astorga, Y. & Jiménez, F. (2006). Influencia del uso del suelo en la calidad del agua en la subcuenca del río Jabonal, Costa Rica. Recursos Naturales y Ambiente. 48, 81-92.
- Aveiga Ortiz, A. M., Noles, P., De la Cruz, A., Peñarrieta, F. & Alcántara, F. (2019). Variaciones físico-químicas de la calidad del agua del río Carrizal en Manabí. Enfoque UTE, 10(3), 30-41. e-ISSN: 1390-6542 / p-ISSN: 1390-9363.
- Ballarin Ferrer, D. y Rodríguez Muñoz, I. (2013). Hidromorfología fluvial: algunos apuntes aplicados a la restauración de ríos en la Cuenca del Duero. Valladolid, España: Confederación Hidrográfica del Duero (MAGRAMA).

Evaluación de la Calidad del Agua y Usos del Suelo en la Ciénaga Grande de Santa Marta, jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del Magdalena.

- Baylón Coritoma, M., Roa Castro, K., Libio Sánchez, T., Tapia Ugaz, L., Jara Pena, E., Macedo Prada, D., Salvatierra Sevillano, A. & Dextre Rubina, A. (2018). Evaluación de la diversidad de algas fitoplanctónicas como indicadores de la calidad del agua en lagunas altoandinas del departamento de Pasco (Perú). *Ecología Aplicada*, 17(1). 119-132. ISSN 1726-2216 Versión impresa / ISSN 1993-9507 Versión electrónica. Departamento Académico de Biología, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima – Perú.
- Belal, A. A. M., El-Sawy, M. A. & Dar, M. A. (2016). The effect of water quality on the distribution of macro-benthic fauna in Western Lagoon and Timsah Lake, Egypt. I. *Egyptian Journal of Aquatic Research* 42, 437–448. National Institute of Oceanography and Fisheries.
- Bonanseña, M., Ledesma, C., Rodríguez, C. & Delgado Sánchez, A. R. (2012). Concentración de clorofila-a y límite de zona fótica en el embalse Río Tercero (Argentina) utilizando imágenes del satélite CBERS-2B. *Revista Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*. 7(3). ISSN = 1980-993X.
- Botero, J. E. & Botero, L. (1989). Problemática del sistema Ciénaga Grande de Santa Marta, Delta exterior del río Magdalena. En: *Colombia y el Agua: tres aspectos*. Bogotá. Fescol 5, 11-28.
- Botero, L. & Mancera-Pineda, J. E. (1996). Síntesis de los cambios de origen antrópico ocurridos en los últimos 40 años en la Ciénaga Grande de Santa Marta (Colombia). *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 20(78), 465-474. ISSN 0370-3908.
- Caballero H, J E., Márquez V, A. O., Montoya P, B. E., Cobos, R. M. & Rivera, M. E. (2017). Análisis de la Calidad Del Agua A partir de Bioindicadores en la Quebrada Jurado, Pamplona - Norte De Santander. Póster. Universidad de Pamplona. Red Colombiana de Semilleros de Investigación (Fundación RedCOLSI).
- Caho-Rodríguez, C. A. & López-Barrera, E. A. (2017). Determinación del Índice de Calidad de Agua para el sector occidental del humedal Torca-Guaymaral empleando las metodologías UWQI y CWQI. *Producción + Limpia*. 12(2), 35-49 - DOI: 10.22507/pml.v12n2a3.
- Calvo Brenes, G. (2013) Nueva metodología para valorar la calidad de las aguas superficiales para su uso como clase 2 en Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. 26(2), 9-19.
- Calvo Brenes, G. & Mora Molina, J. (2012). Análisis de la calidad de varios cuerpos de agua superficiales en el GAM y la Península de Osa utilizando el Índice Holandés. *Tecnología en Marcha*. 25(5), 37-44.
- Campo Icurmen, J. M. (2010). Estructura, Riqueza y Composición de Plantas arborescentes en un Bosque de Niebla Entresacado del Tolima (Colombia). *Acta biol. Colomb.*, 15(2), 247-262. ISSN electrónico 1900-1649. ISSN impreso 0120-548X.
- Cañas, J. S. (2010). Determinación y evaluación de índices de contaminación (ICOS) en cuerpos de agua. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10654/10901>.
- Cárdenas-Castro, E., Lugo-Vargas, L., González-Acosta, J. A. & Tenjo-Morales, A. I. (2018). Aplicación del Índice Biótico de Familias de Macroinvertebrados para la caracterización del agua del río Teusacá, afluente del río Bogotá. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*. 21(2):587-597.
- Carrillo, A. G., Rivera, M. E. & Serra L, J. (2018). Evaluación Físicoquímica E Hidrobiológica Del Agua De La Quebrada Zipachá del Municipio de Pamplona - Norte De Santander,

- Colombia. Ponencia. VI Congreso Internacional del Medio Ambiente y Desarrollos Sostenible CIMADES 2018.
- Chapra, S. (1997). *Surface Water – Quality Modeling*. New York: McGraw-Hill.
- Chamorro Vallejo, C. F. & Jurado Castro, J. C. (2018). Modelación de la concentración de coliformes fecales en el río Bermúdez, municipio de Chachagüí, Nariño. *Boletín Informativo CEI*, 5(3), 81-86.
- Chavarro, A. G. & Gélvez Bernal, E. J. (2016). Caracterización de la calidad de las aguas de la quebrada Fucha utilizando los índices de contaminación ICO con respecto a la precipitación y usos del suelo. *MUTIS, Journal of the Faculty of Sciences and Engineering, Jorge Tadeo Lozano University*. 6(2), 19-31.
- Coello, J. R., Ormaza, R. M., Déley, Á. R., Recalde, C. G. & Ríos, A. C. (2013). Aplicación del ICA-NSF para determinar la calidad del agua de los Ríos Ozogoché, Pichahuiña y Pomacocha-Parque Nacional Sangay-Ecuador. *Rev del Instituto de Investigación (RIIGEO). FIG-MMG-UNMSM*. 15(30), 66-71.
- COLPARQUES (2020). Ciénaga Grande de Santa Marta: Santuario de Fauna y Flora. [En Línea], Fecha de Consulta: 23/Febrero/2020, Disponible en: <http://www.colparques.net/CIENAGA>.
- Convenio RAMSAR [RAMSAR] – Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial [MAVDT] - Corporación Autónoma Regional del Magdalena [CORPAMAG] - Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras, «José Benito Vives de Andreis» [INVEMAR]. (2004). Plan de manejo para el sitio Ramsar y reserva de la biosfera, Sistema Delta Estuarino del río Magdalena, Ciénaga Grande de Santa Marta. ISBN: 958-97548-4-8.
- Corbacho, C., J.M. Sánchez & E. Costillo. 2003. Patterns of structural complexity and human disturbance of riparian vegetation in agriculture landscapes of a Mediterranean area. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. Universidad de Extremadura. Extremadura, 13: 495-507.
- Corporación Autónoma Regional del Magdalena [CORPAMAG]. (2020). Cuerpos de Agua del Departamento del Magdalena. Información Ambiental: Recurso Hídrico. [En Línea] Publicado el 14/Septiembre/2012, Última actualización el 03/Enero/2020, Fecha de Consulta: 21/Febrero/2020, Disponible en: <https://www.corpamag.gov.co/index.php/es/informacion-ambiental/recurso-hidrico>.
- Custodio, E.; Díaz, E. 2001. Sección 18: Calidad del agua subterránea. En: *Hidrología Subterránea*. Eds. E. Custodio; M.R. Llamas. 2 ed. Tomo II. Barcelona, España, Omega. 18.28-18.31.
- De La Hoz Aristizabal, M. V. (2004). Dinámica del fitoplancton de la Ciénaga Grande de Santa Marta, Caribe Colombiano. *Bol. Invest. Mar. Cost.* 33, 159-179. ISSN 0122-9761.
- De Pauw, N. & Hawkes, H. A. (1993). Biological monitoring of water quality, en: *River quality monitoring and control*, W. J. Walley y S. Judd, eds., publicado por Aston University, Reino Unido, 249 p.
- Del Ángel Vicencio, M. A., López Cano, R. E., Zapata Cruz, M. L. & Corona Perez, B. (2015). Cuerpos de agua lénticos y lóticos. Prezi. [En Línea], Fecha de Consulta: 28 de mayo de 2020, Disponible en: <https://prezi.com/ceeat-9dmlgdg/cuerpos-de-agua-lenticos-y-loticos/>.

Evaluación de la Calidad del Agua y Usos del Suelo en la Ciénaga Grande de Santa Marta, jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del Magdalena.

- Departamento Administrativo Nacional de Estadística [DANE]. (2007). Total, de sólidos en suspensión (Sólidos Suspendidos Totales). FICHA TECNICA. Sistema de Información del Medio Ambiente.
- Dolotov A. V., Gapeeva M. V. & Kozlovskii E. V. (2010). Assessment of the Uvod reservoir pollution with heavy metals. *J. Water Resour.* 37, 58-64.
- Durbin, J. & Watson, G. S. (1951). Testing for serial correlation in least squares regression II. *Biometrika.* 38(1/2), 159-177. doi:10.1093/biomet/38.1-2.159
- Espinal Carreón, T., Sedeño Díaz, J. E. & López López, E. (2013). Evaluación de la calidad del agua en la Laguna de Yuriria, Guanajuato, México, mediante técnicas multivariadas: Un análisis de valoración para dos épocas 2005, 2009-2010. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 29(3), 147-163.
- Fawell, J., Nieuwenhuijsen, M.J. (2003). Contaminants in Drinking Water. *British Medical Bulletin* 68, 199-208.
- Figueroa, R., Valdovinos, C., Araya, E. & Parra, O. (2003). Macroinvertebrados bentónicos como indicadores de calidad de agua de ríos del sur de Chile. *Revista Chilena de Historia Natural.* 76, 275-285.
- Finger, D. (2011). "Calibration of Hydrological Models". *Hydrological Processes and Modelling.* Swiss Federal Research Institute WSL. Switzerland.
- Flórez, A. J. (2012). Modelo de Regresión Lineal: Supuestos del modelo. Escuela de Estadística. Facultad de Ingenierías.
- Food and Agriculture Organization [FAO] & United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization [UNESCO]. (1971). Mapa mundial de Suelos. 1:5.000.000. Volumen IV, América del Sur.
- Fricas J, Martz T. Los efectos del cambio climático en el agua, el saneamiento y las enfermedades diarreicas en América Latina y el Caribe, 2007. En línea, Disponible en: <http://www.prb.org/SpanishContent/2007/efectosclimaticolac.aspx>
- García, M., Sánchez, F. D., Marín, R., Guzmán, H., Verdugo, N., Domínguez, E., Vargas, O., Panizzo, L., Sánchez, N., Gómez, J. & Cortés, G. (2019). El Agua. IDEAM.
- García, M., Vargas, N. O., Onofre, C., Aguirre, S. & Sánchez, F. D. (2011). Marco conceptual y metodológico para las evaluaciones regionales del agua. Bogotá: IDEAM.
- Gaufin, A. R. & Tarzwell, C. M. (1952). Aquatic invertebrates as indicators of stream Pollution. *Amer. Publ. Health Rep.* 67(1).
- Gomez Hastamorir, L. P. & Mora Ortegón, S. D. (2016). La biorremediación como alternativa de recuperación para cuerpos de agua lénticos en la ciudad de Bogotá. *Boletín Semillas Ambientales.* 10(2), 6-11. ISSN: 2463-0691.
- Guevara, D. & Herrera Murillo, J. (2014). Informe de calidad de las Aguas Superficiales de San José: Año 2014. Publicación de resultados generada en el marco del Programa de Cooperación UNA-MSJ Programa Agenda Verde San José. Municipalidad de San José, Ministerio de Salud de Costa Rica, Universidad Nacional de Costa Rica y Laboratorio de Análisis Ambiental de la Universidad Nacional de Costa Rica.
- Gupta, I., Daghe, S. & Kumar, R. (2009). Study of variations in water quality of Mumbai coast through multivariate analysis techniques. *Indian J. Mar. Sci.* 30, 170-177.
- Hernández, C. (1986). Producción primaria y dinámica del fitoplancton en la Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia. Tesis (Msc.) Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 1-177.

- Hernández, M. (2003). Geología de las planchas 11 Santa Marta y 18 Ciénaga, Escala 1:100.000; Memoria Explicativa. Instituto de Investigación e Información Geocientífica Minero Ambiental y Nuclear - INGEOMINAS.
- Hynes, H. B. N. (1959). The use of invertebrates as indicators of river pollution". *Proc. Linnean Soc. London*, (2), 165-170.
- Horton R. K. (1965). An index number system for rating water quality. *J. Wat. Pollut. Con. Fed.* 37, 300-305.
- Hoyos Patiño, F. (2001). Geotécnia: Diccionario básico. Universidad Nacional de Colombia.
- Huanaco, J. L., Montoya Terreros, H., Castellanos Sánchez, P. L. & Quiroz Barraza, R. A. (2018). Evaluación de la diversidad del fitoplancton de la laguna La Viuda (Lima, Perú) en agosto-noviembre 2016. *Arnaldoa* 25(3), 1027-1040. ISSN: 1815-8242 (edición impresa) / ISSN: 2413-3299 (edición online).
- iagua. (2018). Eutrofización: Causas, consecuencias y soluciones. [En Línea], Fecha de Consulta: 25 de mayo de 2020, Disponible en: <https://www.iagua.es/noticias/sewervac-iberica/eutrofizacion-causas-consecuencias-y-soluciones>.
- Icaria, L. (2007). Los límites de temperatura para la vida. *Xataka Ciencia*. [En Línea], Fecha de Consulta: 23/Febrero/2020, Disponible en: <https://www.xatakaciencia.com/biologia/los-limites-de-temperatura-para-la-vida>.
- Instituto Colombiano de Geología y Minería [INGEOMINAS] & Servicio Geológico Colombiano [SGC]. (2007). Atlas Geológico de Colombia. Planchas 5-01 y 5-04, descargadas del Servicio Geológico Colombiano [SGC].
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM], Subdirección de Geomorfología y Suelos. (2001). Geomorfología y susceptibilidad a la inundación del valle fluvial del Magdalena, sector Barrancabermeja – Bocas de Ceniza. Zonificación geomorfológica del valle inundable del río Magdalena sector Barrancabermeja – Barranquilla. Estudio Ambiental de la Cuenca Magdalena Cauca y elementos para su ordenamiento territorial. Acuerdo IDEAM CORMAGDALENA, Convenio 033-99. Plancha 15, pág. 53.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (2007a). pH en agua por electrometría. Subdirección de Hidrología - Grupo Laboratorio de Calidad Ambiental. (Versión 03) 1-7.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (2007b). Sólidos Suspendidos Totales en agua secados a 103 – 105 °C. Subdirección de Hidrología - Grupo Laboratorio de Calidad Ambiental. (Versión 03) 1-7.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (2011). Hoja metodológica del indicador Índice de calidad del agua (Versión 1,00). Sistema de Indicadores Ambientales de Colombia - Indicadores de calidad del agua superficial. Bogotá: IDEAM.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (2015). Estudio nacional del agua 2014. Bogotá: IDEAM.
- Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras, «José Benito Vives de Andreis» [INVEMAR]. (2016). Concepto Técnico: Estado Actual y efectos de la Doble Calzada Ciénaga-

Evaluación de la Calidad del Agua y Usos del Suelo en la Ciénaga Grande de Santa Marta, jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del Magdalena.

- Barranquilla sobre la ecorregión Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM). CPT-CAM-011-16. 43 pp.
- Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras, «José Benito Vives de Andreis» [INVEMAR] (2019a). Ciénaga Grande de Santa Marta: La historia de un humedal resistente y de características especiales. Financiado por la Unión Europea. Realización y compilación de información: Julián Beltrán, Alexandra Rodríguez y Leonardo Arias. Leer en la web, en <https://arcg.is/1TvqD80>.
- Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras, «José Benito Vives de Andreis» [INVEMAR]. (2019b). Monitoreo de las condiciones ambientales y los cambios estructurales y funcionales de las comunidades vegetales y de los recursos pesqueros durante la rehabilitación de la Ciénaga Grande de Santa Marta. Informe Técnico Final 2019, Volumen 18. Santa Marta 214 p +anexos.
- JMGAV. (2012). Eutrofización: Causas y Efectos. TRIPLENLACE, Ambiente. [En Línea], Fecha de Consulta: 25 de mayo de 2020, Disponible en: <https://triplenlace.com/2012/09/27/eutrofizacion-causas-y-efectos/>.
- Karbasdehi, V., Dobaradaran, S., Nabipour, I., Ostovar, A., Arfaeinia, H., Vazirizadeh, A., Mirahmadi, R., Keshtkar, M., Faraji, F. & Khalifei, F. (2017). Indicator bacteria community in seawater and coastal sediment: the Persian Gulf as a case. *Journal of Environmental Health Science & Engineering* 15(6), 1-15.
- Kazi T. G., Arain M. B., Jamali M. K., Jalbani N., Afridi H. I., Sarfraz R. A., Baig J. A. y Shah A. Q. (2009). Assessment of water quality of polluted lake using multivariate statistical techniques: a case study. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 72, 301-309.
- Knox, G. A. (2001). *The ecology of seashore*. CRC Press. Boca Ratón. 557.
- López Martínez, M. L. & Madroñero Palacios, S. M. (2015). Estado trófico de un lago tropical de alta montaña: caso laguna de La Cocha. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 25(2), 21-42.
- Machado, V., Granda, R. & Endara, A. (2018). Análisis de macroinvertebrados bentónicos e índices biológicos para evaluar la calidad del agua del Río Sardinas, Chocó Andino Ecuatoriano. *Enfoque UTE*, 9(4), 154-167. e-ISSN: 1390-6542 / p-ISSN: 1390-9363.
- Mancera Pineda., J. E. & Vidal V., L. A. (1994). Florecimiento de microalgas relacionado con mortandad masiva de peces en el complejo lagunar Ciénaga Grande de Santa Marta, Caribe Colombiano. *An. Inst. Invest. Mar. Punta Betín* 23, 103-117. ISSN 0120-3959.
- Mancera Pineda, J. E, Pinto, G. & Vilardey, S. (2013). Patrones de distribución estacional de masas de agua en la Bahía de Santa Marta, caribe colombiano: Importancia relativa del upwelling y outwelling. *Bol. Invest. Mar. Cost.* 42(2), 329-360.
- Martínez García, I. (2017). Monitorización de la calidad del agua en embalses mediante técnicas de observación remota. Universidad de Cantabria.
- McGinnis, S., Spencer, S., Firnstahl, A., Stokdyk, J., Borchard, M., McCarthy, D. T. & Murphy, H. M. (2018). Human bacteroides and total coliforms as indicators of recent combined sewer overflows and rain events in urban creeks. *Science of The Total Environment*. 630, 967-976.
- Molnar, P. (2011). "Calibration". *Watershed Modelling*. Institute of Environmental Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources Management, ETH Zürich. Switzerland.
- Montero Murcia, V. & Ramírez Dalel, Y. (2018). Análisis de la variabilidad en la calidad del agua, a partir del uso de índices de contaminación (ICO's) como aporte al POMCA de la

- cuenca del río Guayuriba. [Tesis]. Universidad Santo Tomás, Facultad De Ingeniería Ambiental, Villavicencio.
- Morelli, E. & Verdi, A. (2014). Diversidad de macroinvertebrados acuáticos en cursos de agua dulce con vegetación ribereña nativa de Uruguay. *REVISTA MEXICANA DE BIODIVERSIDAD* 44(4). 85: 1160-1170.
- Moreno, P., Rodríguez Poo, J. M. & Soberon, A. (2018). *Econometría I, Tema 2: El Modelo de Regresión Lineal Simple*. Departamento de Economía. Universidad de Cantabria. 1-42.
- Múnera, J., Vélez, J., Poveda, G., Posada, J. E. & Montoya, J. D. (2003). Taller de ciencias del mar: “Dinámica hidrológica de la Ciénaga Grande de Santa Marta mediante técnicas de sensores remotos”. *Avances en Recursos Hidráulicos*. 10, 47-62.
- Murillo Montoya, S. A., Mendoza-Mora, A., Restrepo-Bastidas, E. S. & Rodríguez, M. A. (2018). Utilización de macroinvertebrados acuáticos como herramienta para determinar la calidad del agua en la quebrada Santo Tomás, municipio de Pensilvania, Colombia. *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.* 42(164), 212-220.
- NASA Giovanni. (2020). *EARTHDATA*. Giovanni: The Bridge Between Data and Science v 4.34. Plataforma abierta a la libre consulta de datos, disponible en: <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>.
- Novales, A. (2010). *Análisis de Regresión*. Departamento de Economía Cunitativa. Universidad Complutense. 1-116. Recuperado de: <https://www.ucm.es/data/cont/docs/518-2013-11-13- Analisis%20de%20Regresion.pdf>.
- Núñez, J. C. & Fragoso-Castilla, P. J. (2019). Uso de Macroinvertebrados Acuáticos como Bioindicadores de Contaminación del Agua de la Ciénaga Mata de Palma (Colombia). *Información Tecnológica*. 30(5), 319-330.
- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico. (1982).
- Oujidi, B., Tahri, M., Layachi, M., Abid, A., Bouchnan, R., Selfati, M., Bounakhla, M., Bouch, M. E., Maanan, M., Bazairi, H. & Snoussi, M. (2020) Effects of the watershed on the seasonal variation of the surface water quality of a post-restoration coastal wetland: The case of the Nador lagoon (Mediterranean sea, Morocco). *Regional Studies in Marine Science* 35. ISSN 2352-4855.
- Pastrán Pastrán, M. S. (2017). Evaluación de la calidad del agua mediante la utilización de Macroinvertebrados Bentónicos, como bioindicadores: estudio de caso en el río Suárez (Chiquinquirá – Boyacá). Proyecto de grado para optar al título de Ingeniera Ambiental, Universidad Libre. Bogotá, Colombia.
- Presidencia de la República, Ministerio de Salud y de Ambiente y Energía de Costa Rica. (2007). Reglamento para la evaluación y clasificación de la calidad de cuerpos de agua superficiales. *La Gaceta* (178), 7.
- PROCIÉNAGA. (1995a). Plan de manejo ambiental de la subregión Ciénaga Grande de Santa Marta. 1995-1998. Proyecto de rehabilitación de la Ciénaga Grande de Santa Marta, PROCIÉNAGA (CORPAMAG - INVEMAR - CORPES - GTZ), Santa Marta.
- PROCIÉNAGA. (1995b). Proyecto de rehabilitación de la Ciénaga Grande de Santa Marta. Plan de manejo ambiental de la Subregión Ciénaga Grande de Santa Marta 1995 - 1998. Santa Marta.

Evaluación de la Calidad del Agua y Usos del Suelo en la Ciénaga Grande de Santa Marta, jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del Magdalena.

- Quiroga Ríos, A. (2016). Supuestos del modelo de regresión lineal. Prácticas de estadística. Escuela Superior de Informática.
- Ramírez, A. & Viña, G. (1998). Limnología Colombiana: Aportes a su conocimiento y estadísticas de análisis. Universidad Jorge Tadeo Lozano – Bp, Exploration. ISBN 958-9029-06-x.
- Ramírez, A., Restrepo, R. & Cardeñoso, M. (1999). Índices de contaminación para caracterización de aguas continentales y vertimientos: Formulaciones. CT&F - Ciencia, Tecnología y Futuro. 1(5), 89-99.
- Ramírez, A., Restrepo, R. & Viña, G. (1997). Cuatro índices de contaminación para caracterización de aguas continentales: Formulaciones y aplicación. CT&F - Ciencia, Tecnología y Futuro. 1(3), 135-153.
- Razzaq-Gumman, A. (2011). Assessment of water quality of Rwal lake by long time period. Environ. Monit. Assess. 180, 115-126.
- Reghunath, R., Murthy, T. R. S. & Raghavan, B. R. (2002). The utility of multivariate statistical techniques in hydrogeochemical studies: an example from Karnataka, India. Water Res. 36, 2437-2442.
- Resh, V. H., Richard, H. N. & Barbour, M. T. (1995). Design and implementation of rapid assessment approaches for water resource monitoring using macroinvertebrates. Aust. J. Ecology., 20, 108-121.
- Rivera-Monroy, V. H., Twilley, R. R., Mancera, E., Alcántara-Eguren, A., Castañeda-Moya, E., Casas, O., Reyes, P., Restrepo, J., Perdomo, L., Campos, E., Cotes, G. & Viloria, E. (2006). Aventuras y desventuras en Macondo: Rehabilitación de la Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia. Ecotrópicos 19(2), 72-93.
- Robledo, J., Vanegas Chacón, E. A. & García Álvarez, N. (2014). Aplicación del Sistema Holandés para la evaluación de la calidad del agua. Caso de estudio Lago de Izabal, Guatemala. Revista INGENIERÍA AGRÍCOLA. 4(2), 15-21. ISSN-2326-1545, RNPS-0622.
- Roldán Pérez, G. A. (2003). Bioindicación de la calidad del agua en Colombia. Uso del método BMWP/Col. Editorial Universidad de Antioquia. Disponible en <https://goo.gl/5UMB9u>.
- Roldán Pérez, G. A. (2016). Los macroinvertebrados como bioindicadores de la calidad del agua: cuatro décadas de desarrollo en Colombia y Latinoamérica. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 40(155), 254-274.
- Sánchez Molano, M. & García D. P. (2018). Determinación del índice BMWP/Col, mediante la utilización de macroinvertebrados como bioindicadores de la calidad de agua, en el cauce del río Guachicos, que surte el acueducto del municipio de Pitalito. Proyecto de investigación para optar por el título de Ingeniero Ambiental, Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD. Pitalito, Huila (Colombia).
- Savin, N. E. y White, K. J. (1977). The Durbin-Watson test for serial correlation with extreme sample sizes or many regressors. Econometrica. 45(8), 1989-1996.
- Seiler, L. M. N., Fernandes, E. H. L., Martins, F. & Abreu, P. C. (2015). Evaluation of hydrologic influence on water quality variation in a coastal lagoon through numerical modeling. Ecological Modelling. 314, 44-61. ISSN 0304-3800.
- Severiche Sierra, C. A., Barreto Lezama, A. J. & Acevedo Barrios, R. L. (2013). Efecto de las Lluvias sobre la Calidad del Agua en La Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia. AVANCES Investigación en Ingeniería. 10(1), 58-67.

- Sistema de Información Geográfico para el Ordenamiento Territorial [SIG-OT]. (2018). Explorador de capas. Plataforma abierta a la libre consulta de datos espaciales y alfanuméricos, disponible en: <http://sigotvg.igac.gov.co:8080/>.
- Simeonov, V., Simeonova, P. & Tsitouridou, R. (2004). Chemometric quality assessment of surface waters: two case studies. *Chem. Eng. Ecol.* 11, 449-469.
- Tapia, L., Sánchez, T., Baylón, M., Jara, E., Arteaga, C., Maceda, D. & Salvatierra, A. (2018). Invertebrados bentónicos como bioindicadores de calidad de agua en lagunas altoandinas del Perú. *Ecología Aplicada*, 17(2), 149-163. ISSN 1726-2216 Versión impresa / ISSN 1993-9507 Versión electrónica. Departamento Académico de Biología, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima – Perú.
- Torres, P., Cruz, C. H. & Patiño, P. J. (2009). Índices de calidad de agua en fuentes superficiales utilizadas en la producción de agua para consumo humano una revisión crítica. *Revista Ingenierías*, 8(15), 79-94.
- Torres Solano, D. P. (2008). Diagnóstico de la calidad del agua de la Microcuenca Sancotea, Socorro – Santander. *Investigación y Tecnología, Revista Ingenio Libre, Universidad Libre*. 54-66.
- TSCHANZ, C., JIMENO, A. & CRUZ, J. (1969). Geology of the Sierra Nevada de Santa Marta Area. Preliminary report. Escala 1:200.000. Ingeominas, Informe 1829, 288. Bogotá.
- United States Geological Survey [USGS]. (2020). EarthExplorer. USGS: Science for a changing world. Plataforma abierta a la libre consulta de datos y metadatos, disponible en: <https://earthexplorer.usgs.gov/>.
- Valverde Solís, A., Moreno Tamayo, E. & Ortiz Palacios, N. Y. (2015). Análisis de la calidad de varios cuerpos de aguas superficiales en Bahía Solano utilizando índices de contaminación. *Investigación, Biodiversidad y Desarrollo*. 34(1), 14-21.
- Vannote, R., Minshall, G., Cummins, K., Sedell, J. & Cushing, C. (2011). The River Continuum Concept. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 37. 130-137. 10.1139/f80-017.
- Vega, J. C., Hoyos, C. d., & Aldasoro, J. J. (1992). The Sanabria lake. The largest natural freshwater lake in Spain. *Asociación Española de Limnología*, 49-57.
- Velázquez R, J. O., Jiménez G, G. J. & Sepúlveda L, M. (2007). Determinación de la calidad ambiental de la Ciénaga Colombia. *Gest. Ambient.* 10(1), 187-200. ISSN electrónico 2357-5905. ISSN impreso 0124-177X.
- Yáñez Flores, S. G. (2018). Evaluación de la contaminación del agua mediante parámetros fisicoquímicos en las desembocaduras de los principales afluentes y efluente del lago San Pablo, provincia de Imbabura (año 2017). Trabajo De Titulación, Modalidad Proyecto de Investigación previo a la obtención del Título de Ingeniera Ambiental, Universidad Central del Ecuador. Quito, Ecuador.
- Zabala Agudelo, A. M. (2017). Tesis Maestría. Diagnóstico Ambiental de La Ciénaga de Ayapel a Través de la Variación Temporal de los Aspectos Morfofuncionales del Fitoplancton y un Indicador de Calidad Ecológica. Universidad de Antioquia Corporación Académica Ambiental, 102p.

- Zappa, M. (2011). "PREVAH – Calibration and Verification". Hydrological Processes and Modelling. ETH Zürich. Switzerland.
- Zhen Wu, B. Y. (2009). Calidad físico-química y bacteriológica del agua para consumo humano de la microcuenca de la quebrada Victoria, Curubandé, Guanacaste, Costa Rica, año hidrológico 2007-2008. Programa de Maestría en Manejo de Recursos Naturales. Escuela de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad Estatal a Distancia.
- Zhen Wu, B. Y. (2010). Índices de calidad del agua en la microcuenca de la quebrada Victoria, Guanacaste, Costa Rica (2007-2008). Cuadernos de Investigación UNED (Edición en Línea, ISSN: 1659-441X). 2(1), 45-61.