



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TECNOLOGÍA Y GESTIÓN DEL AGUA

TESIS DE MAESTRÍA

**“ALTERNATIVA DE MANEJO DE UNA SUB-CUENCA (SAN JUAN DEL RÍO)
CONTAMINADA, EVALUACIÓN DE ALGUNOS COMPUESTOS
ORGÁNICOS E INORGÁNICOS Y PROPUESTA
DE REMEDIACIÓN Y TRATAMIENTO”**

QUE PRESENTA LA

ING. AIDA ELENA GARCÍA CARRIÓN

DIRECTOR DE TESIS:

DR. LUIS ARMANDO BERNAL JÁCOME

SAN LUIS POTOSÍ, AGOSTO, 2015



CENTRO DE
INVESTIGACIÓN
Y ESTUDIOS
DE POSGRADO

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), y la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP) y al Centro de Investigación y Estudios de Posgrados (CIEP) por el apoyo económico a través de las becas otorgadas. Asimismo, a la Dra. Marisol Gallegos García por la ayuda en mis trámites de firmas.

Mis más sincero agradecimiento a mi director de tesis el Dr. Luis Armando Bernal Jácome, por toda su ayuda y el apoyo para la realización de este trabajo.

Al comité de tesis el Dr. Cristóbal Aldama Aguilera, y el Dr. Hilario Charcas, por los comentarios y revisiones de la tesis que sirvieron para enriquecerla.

Al Departamento de movilidad de Posgrados de la UASLP por el apoyo económico para la movilidad en Barranquilla, Colombia. Y al Profesor Franklin Torres Bejarano, por la supervisión y apoyo en esta estancia.

A la Profesora Joana Diaz Moreira de la Faculdade de Engenharia do Porto, Portugal. Por aceptación de asesoría y utilización de instalaciones para realizar con éxito los experimentos de laboratorio para el tratamiento del agua.

Lo maravilloso de aprender es que nadie puede arrebatárnoslo.

BB King

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	8
ÍNDICE DE TABLAS	9
ÍNDICE DE GRÁFICAS	10
INTRODUCCIÓN.....	12
1. DELIMITACIÓN Y PROPUESTA DE MANEJO DE LA SUB-CUENCA SAN JUAN DEL RÍO	16
1.1 EL AGUA EN MÉXICO	16
1.1.1 LA CRISIS DEL AGUA EN MÉXICO	16
1.1.2 SITUACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN MÉXICO	17
1.1.3 LA GESTIÓN INTEGRADA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN MÉXICO.....	19
1.2 ANTECEDENTES	20
1.2.1 LOS RETOS DEL AGUA EN MÉXICO	20
1.2.2 USOS DEL AGUA EN MÉXICO	20
1.2.3 GRADO DE PRESION DEL AGUA EN MÉXICO	22
1.2.4 HISTORIA DE MANEJO DE CUENCAS EN MÉXICO	23
1.2.5 CONCEPTO DE CUENCA HIDROGRÁFICA EN MÉXICO	25
1.2.6 ADMINISTRACIÓN DE LAS CUENCAS EN MÉXICO.....	27
1.2.7 LA GESTIÓN Y PLANEACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO	28
1.2.8 PRINCIPIOS PARA LA GESTIÓN DEL AGUA.....	30
1.2.9 GESTIÓN INTEGRADA DEL RECURSO HÍDRICO (GIRH).....	32
1.2.10 MANEJO INTEGRAL DE CUENCA HIDROGRÁFICA.....	35
1.2.11 SISTEMA DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA.....	38
1.2.12 LA PROBLEMÁTICA DE LAS CUENCAS HIDROGRÁFICAS	39
1.2.13 BENEFICIOS DE LA GESTIÓN INTEGRAL DE LOS RECURSOS HÍDRICOS (GIRH).....	40
1.3 OBJETIVOS	42
1.3.1 OBJETIVO GENERAL.....	42
1.3.2 OBJETIVOS PARTICULARES	42
1.4 CARACTERIZACIÓN DE LA SUB-CUENCA SAN JUAN DEL RÍO CASO DE ESTUDIO	43
1.4.1 UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	43
1.4.2 PROBLEMÁTICA DE LA SUB-CUENCA SAN JUAN DEL RÍO.....	46
1.5 DETERMINACIÓN DE PARAMETROS GEO-MORFOLOGICOS DE LA SUB-CUENCA SAN JUAN DEL RÍO.....	48

1.5.1	ÁREA DE LA CUENCA	49
1.5.2	FORMA DE LA CUENCA.....	50
1.5.3	RELACIÓN DE ELONGACIÓN	51
1.5.4	RED DE HIDROGRÁFICA.....	52
1.5.5	DENSIDAD DE DRENAJE	53
1.5.6	DENSIDAD DE CORRIENTE	53
1.5.7	PENDIENTE MEDIA DE LA CUENCA.....	54
1.5.8	CURVA HIPSOMÉTRICA.....	55
1.5.9	ELEVACIÓN MEDIA DE LA CUENCA.....	56
1.5.10	ELEVACIÓN MEDIANA DE LA CUENCA.....	57
1.5.11	PENDIENTE DEL CAUCE PRINCIPAL.....	57
1.5.12	PERFIL DEL CAUCE PRINCIPAL	58
1.6	TIEMPO DE CONCENTRACIÓN.....	59
1.6.1	FÓRMULA DE KIRPICH	60
1.6.2	FÓRMULA DE CALIFORNIA HIGHWAYS AND PUBLIC WORKS.....	60
1.7	CLIMA	61
1.7.1	CLIMOGRAMAS	63
1.8	VEGETACIÓN Y USO DE SUELO.....	65
1.9	EDAFOLOGÍA	66
1.10	ESCORRENTÍA.....	68
1.11	CONCLUSIÓN DE LA CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA.....	71
2.	DETERMINACIÓN DE COMPUESTOS INORGÁNICOS Y SU REMEDIACIÓN EN LA ZONA DE ESTUDIO.....	73
2.1	CONTAMINACIÓN POR METALES PESADOS.....	73
2.1.1	PLOMO - METAL PESADO.....	74
2.1.2	CONTAMINACIÓN POR PLOMO	76
2.1.3	DISTRIBUCIÓN DE METALES PESADOS (PLOMO) EN ECOSISTEMAS ACUÁTICOS	77
2.2	EL PLOMO SOBRE LA SALUD HUMANA.....	78
2.2.1	INGESTIÓN DEL PLOMO	78
2.3	CARACTERIZACIÓN DE PLOMO EN LA SUB-CUENCA SAN JUAN DEL RÍO	79
2.3.1	TOMA DE MUESTRA	81
2.4	ESPECTROSCOPIA DE ABSORCIÓN ATÓMICA.....	82

2.4.1	DESCRIPCIÓN DE ESPECTROSCOPIA DE ABSORCIÓN ATÓMICA.....	82
2.4.2	ANÁLISIS DE LA MUESTRA	83
2.4.3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LAS MEDICIONES DE PLOMO EN LA ZONA DE ESTUDIO	84
2.5	PROPUESTA TRATAMIENTO DEL CAUCE PRINCIPAL DE LA SUB-CUENCA SAN JUAN DEL RÍO	86
2.6	METODOLOGIA PORPUESTA DE ADSORCIÓN MEDIANTE CARBON ACTIVADO COMO TRATAMIENTO DE REMOCIÓN DE PLOMO	87
2.6.1	MODELOS DE ISOTERMAS DE ADSORCIÓN	89
2.6.2	ISOTERMA DE LANGMUIR	89
2.6.3	ISOTERMA DE FREUNDLICH.....	90
2.7	RESULTADOS Y DISCUSION DE ADSORCIÓN CON CARBON ACTIVADO.....	91
3.	MODELACIÓN DEL CAUCE PRINCIPAL DE LA SUB-CUENCA SAN JUAN DEL RÍO.....	92
3.1	GENERALIDADES DE LA MODELACIÓN.....	92
3.2	MODELACIÓN DEL CAUCE PRINCIPAL	93
3.3	SELECCIÓN DEL MODELO APROPIADO DE SIMULACIÓN	94
3.4	MODELO DE SIMULACIÓN QUAL2K	94
3.5	REPRESENTACIÓN DE UNA CORRIENTE SUPERFICIAL EN EL QUAL2K.....	97
3.6	INFORMACIÓN DE ENTRADA AL MODELO	98
3.7	INFORMACIÓN DE SALIDA DEL MODELO	99
3.8	APLICANDO QUAL2K EN LA SUB-CUENCA SAN JUAN DEL RÍO	100
3.8.1	DATOS DE ENTRADA AL MODELO DE SIMULACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	101
3.8.2	BASE DE DATOS PARA LA CALIBRACIÓN Y VERIFICACIÓN DEL MODELO	102
3.8.3	CONDICIONES SUMINISTRADAS AL MODELO QUAL2K PARA SU SIMULACIÓN	103
3.9	MODELACIÓN DEL CAUCE PRINCIPAL DE LA SUB-CUENCA SAN JUAN DEL RÍO.....	105
3.10	CONCLUSIÓN DE MODELACIÓN DEL CAUCE PRINCIPAL EN LA ZONA DE ESTUDIO	112
4.	ALTERNATIVA DE TRATAMIENTO DE UN EFLUENTE INDUSTRIAL DE LA SUB-CUENCA SAN JUAN DEL RÍO.....	114
4.1	ANTECEDENTES DE LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL.....	114
4.2	EL BIODIESEL.....	117
4.2.1	PRODUCCIÓN DE BIODIESEL.....	119
4.3	MATERIAS PRIMAS UTILIZADAS PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL.....	120
4.3.1	CARACTERIZACION DE LA MATERIA PRIMA	121

4.3.2	INDICE DE ACIDEZ.....	121
4.3.3	PROCEDIMIENTO DE OBTENCIÓN DE INDICE DE ACIDEZ SEGÚN SU MATERIA PRIMA .	122
4.4	METODOLOGIA EMPLEADA PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL.....	124
4.4.1	PROCEDIMIENTO DE PRODUCCIÓN DE BIODIESEL POR TRANSESTERIFICACIÓN BÁSICA HOMOGENEA.....	125
4.4.2	RENDIMIENTO DE LA PRODUCCION DE BIODIESEL.....	127
4.5	PURIFICACIÓN DE BIODIESEL	128
4.6	MATERIALES Y METODOS DE MEDICIÓN	131
4.6.1	VALOR DE pH.....	131
4.6.2	CONDUCTIVIDAD.....	132
4.6.3	DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO).....	132
4.6.4	DEMANDA BIOLÓGICA DE OXÍGENO (BOD)	133
4.6.5	FÓSFORO TOTAL.....	133
4.6.6	SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	134
4.6.7	GRASAS Y ACEITES.....	134
4.7	CARACTERIZACIÓN DEL EFLUENTE DE AGUA PROVENIENTE DEL LAVADO DE BIODIESEL...	135
4.7	TRATAMIENTO DEL EFLUENTE	136
4.7.1	MÉTODOS Y MATERIALES DE TRATAMIENTO DEL EFLUENTE	138
4.8	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	142
4.8.1	PORCENTAJE DE DESEMPEÑO DEL TRATAMIENTO DEL EFLUENTE	145
4.8.2	PORCENTAJE DE DESEMPEÑO DE SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	145
4.8.3	VARIACION DE pH.....	148
4.8.4	VARIACIÓN DE CONDUCTIVIDAD	149
4.8.5	DESEMPEÑO DE REMOCION DE DQO	150
4.8.6	DEMANDA QUIMICA DE OXIGENO (DBO ₅).....	153
4.8.6	GRASAS Y ACEITES.....	155
4.9	COCLUSION DE TRATAMIENTO EN LA PURIFICACIÓN DE BIODIESEL.....	158
	CONCLUSIONES GENERALES	160
	Referencias.....	162

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Componentes del ciclo hidrológico mexicano (Carabias, 2005).	16
Figura 2. Usos del agua en México (CONAGUA, 2011).	22
Figura 4. Regiones Hidrológico Administrativas (CONAGUA, 2014).	28
Figura 5. Ciclo de gestión de la planificación e implementación, basado en el aprendizaje mediante la práctica (Global Water Partnership; International Network of Basin Organizations, 2009).	30
Figura 6. Componentes de la gestión del agua.	31
Figura 7. Metodología para la gestión del agua (Alliance for water stewardship, 2012).	32
Figura 8. Componentes de la jerarquía hidrográfica (Helena Cotler Ávalos, 2009).	36
Figura 9. Etapas del manejo integral de cuencas hidrográficas.	37
Figura 10. Localización de la zona de estudio.	45
Figura 11. Forma (oblonga) de la Sub-Cuenca San Juan del Río.	51
Figura 12. Red de drenaje dentrítico.	53
Figura 13. Clasificación de curva Hipsométrica según su forma.	55
Figura 14. Elevación mediana	57
Figura 15. Representación del cauce principal (Elevaciones vs Longitud del cauce).	59
Figura 16. Mapa de cauce principal	59
Figura 17. Mapa de Clima Sub-Cuenca San Juan del Río.	62
Figura 18. Vegetación de la zona de estudio.	65
Figura 19. Clasificación del tipo de suelo en la Sub-cuenca San Juan del Río.	68
Figura 20. Mapas necesarios para la obtención del cálculo de escorrentía. (NASA, 2014)	70
Figura 21. Principales interacciones y flujos de metales pesados entre compartimentos del medio acuático.	78
Figura 22. Representación de los puntos de muestreo en la zona de estudio.	80
Figura 23. Representación fotográfica de los puntos de muestra.	81
Figura 24. Representación de los componentes del espectrofotómetro de absorción atómica	83
Figura 25. Equipo de espectroscopia de absorción atómica.	83
Figura 26. Esquematación general del modelo QUAL2K para un río con quebradas o ríos tributarios representados como vertimientos puntuales (Chapra Steve, 2008).	98
Figura 27. Hoja de ingreso de información de los tramos de modelación en el QUAL2K (“reach”)	101
Figura 28. Datos de entrada para la simulación del modelo QUAL2K.	102
Figura 29. Información suministrada al modelo QUAL2K en la cabecera del cauce principal de la sub-cuenca San Juan del Río durante el monitoreo realizado en febrero del 2013.	103
Figura 30. Información suministrada en las estaciones de monitoreo sobre el cauce principal de la sub-cuenca San Juan del Río ubicadas aguas abajo, realizado en febrero del 2013.	104
Figura 31. Hoja electrónica “Rates” para el ingreso de los parámetros de calibración en el modelo QUAL2K.	105
Figura 32. Representación de la producción de biodiesel por reacciones de transesterificación	116
Figura 33. Reacciones reversibles en el proceso de producción de biodiesel (Freeman, 1986)	119
Figura 34. Proceso de transesterificación con metanol y catalizador.	120
Figura 35. Materias primas utilizadas en la producción de biodiesel	121
Figura 36. Resultado de titulación	123
Figura 37. Procedimiento utilizado en la producción de biodiesel	124
Figura 38. Reactor de biodiesel.	126
Figura 39. Separación de fases según su materia prima	126
Figura 40. Separación de fases	127
Figura 41. Rotavapor utilizado para la extracción del metanol	127

Figura 42. Lavado de biodiesel a) Aceite de soja, b) Manteca de Puerco, c) Aceite de Ricino _____	129
Figura 43. Potenciómetro utilizado para la determinación de pH. _____	132
Figura 44. Equipo de centrifugación. _____	139
Figura 45. Separación de fases obtenida del proceso de centrifugación. _____	140
Figura 46. Formación de coágulos en el proceso de coagulación, en los efluentes, producidos por diferentes materias primas para la producción de biodiesel _____	141
Figura 47. Resultado final del proceso de centrifugación-coagulación-floculación en los efluentes obtenidos de la purificación de biodiesel producido por diferentes materias primas. _____	141
Figura 48. Separación de fases post-coagulación/floculación, para su caracterización final. _____	142

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características de la cuenca hidrológica del Pánuco (CONAGUA, SEMARNAT, 2012).	44
Tabla 2. Clasificación del tamaño de la cuenca.....	49
Tabla 3. Clasificación de la forma de la cuenca.	50
Tabla 4. Clases de densidad de drenaje (Instituto Nacional de Ecología , 2004).	53
Tabla 5. Clasificación de la cuenca utilizando la pendiente media (Instituto Nacional de Ecología , 2004). ...	54
Tabla 6. Valores para la obtención de la curva hipsométrica	55
Tabla 7. Clasificación de la pendiente del cauce principal.....	58
Tabla 8. Clasificación de los climas presentes en la zona de estudio.	62
Tabla 9. Descripción de tipos de suelos en la sub-cuenca San Juan del Río (INEGI, 2004).	66
Tabla 10. Tabla de Prevert (Sara Ibáñez Asensio, 2005).	69
Tabla 11. Compuestos del plomo (Ministerio de Salud Digesa, s.f.).....	75
Tabla 12. Descripción de los puntos de muestreo en la sub-cuenca San Juan del Río.....	80
Tabla 13. Resultados de concentración de plomo en la sub-cuenca San Juan del Río, en el periodo seco, 2013	84
Tabla 14. Resultados de concentración de plomo en la sub-cuenca San Juan del Río, en el periodo de lluvia, 2013.....	84
Tabla 15. Resultados de concentración de plomo en la sub-cuenca San Juan del Río, en el periodo post-lluvias, 2013.....	84
Tabla 16. Resultados de concentración de plomo en la sub-cuenca San Juan del Río, en el periodo seco 2014	84
Tabla 17. Parámetros fisicoquímicos y biológicos del modelo QUAL2K.	99
Tabla 18. Posición geográfica de los tramos de la sub-cuenca San Juan del Río.	100
Tabla 19. Descripción de los tramos de modelación del cauce principal de la sub-cuenca San Juan del Río.	100
Tabla 20. Propiedades de biodiesel (Demirbas, 2008)	118
Tabla 21. Métodos para la medición del índice de acidez.	122
Tabla 22. Resultados de índice de acidez de las diferentes materias primas.	124
Tabla 23. Parámetros utilizados en la producción de biodiesel (Araújo, 2011), (Joana M. Dias, 2008), (Dias, 2008).....	124
Tabla 24. Rendimiento de producción de biodiesel según su materia prima	128
Tabla 25. Caracterización típica de un efluente residual de agua en la producción de biodiesel. (Rattanapan, 2011).....	130

Tabla 26. Métodos establecidos para la medición de parámetros de calidad de agua (American Public Health Association, 2005).	131
Tabla 27. Parámetros iniciales de la caracterización del efluente del agua obtenida de los lavados de diésel.	135
Tabla 28. Caracterización inicial de los efluentes de purificación del biodiesel producido por diferentes materias primas.....	142
Tabla 29. Valores de los parámetros iniciales que marca la normatividad.....	143
Tabla 30. Parámetros de caracterización de los efluentes obtenidos de la producción de biodiesel con diferentes materias primas después del proceso de centrifugación.....	144
Tabla 31. Parámetros de caracterización de los efluentes obtenidos de la producción de biodiesel con diferentes materias primas después del proceso de coagulación/floculación.	144
Tabla 32. Porcentaje de remoción de sólidos suspendidos totales (SST) (mg/L) de valores iniciales con centrifugación.....	146
Tabla 33. Porcentaje de remoción de sólidos suspendidos totales (SST) (mg/L) comparando valores de centrifugación con coagulación/floculación.....	146
Tabla 34. Porcentaje de remoción de sólidos suspendidos totales (SST) (mg/L) comparando valores iniciales y post-tratamiento.	147
Tabla 35. Variaciones del pH inicial en las diferentes etapas del tratamiento de los efluentes.	148
Tabla 36. Variaciones de la conductividad en las diferentes etapas del tratamiento del efluente.	149
Tabla 37. Porcentaje de remoción de demanda química de oxígeno (mg/L) comparando valores iniciales con centrifugación.....	150
Tabla 38. Porcentaje de remoción de demanda química de oxígeno comparando valores de centrifugación con coagulación/floculación.....	151
Tabla 39. Remoción de demanda química de oxígeno global.	151
Tabla 40. Porcentaje de remoción de demanda biológica de oxígeno (%) de los valores iniciales con centrifugación.....	153
Tabla 41. Porcentaje de remoción de demanda biológica de oxígeno de los valores de centrifugación con coagulación/floculación	154
Tabla 42. Remoción de demanda biológica de oxígeno global.	154
Tabla 43. Porcentaje de remoción de grasas y aceites (%) de los valores iniciales con centrifugación.	155
Tabla 44. Porcentaje de remoción de grasas y aceites (%) de los valores de centrifugación con coagulación/floculación	156
Tabla 45. Porcentaje de remoción de grasas y aceites (%) de los valores iniciales a post-tratamiento.....	156

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Curva hipsométrica de la zona de la subcuenca San Juan del Río.	56
Gráfica 2. Climograma de la estación de Zimapan, en el estado de Hidalgo, parte norte de la cuenca.	63
Gráfica 3. Climograma de la estación de San Juan del Río en el estado de Querétaro, parte media de la cuenca.	64
Gráfica 4. Climograma de la estación Aculco en el estado de México, parte sur de la cuenca.	64
Gráfica 5. Resultados del modelo QUAL2K del cauce principal de la sub-cuenca San Juan del Río, durante el periodo seco (febrero 2013), para a) Re-aireación, b) Temperatura, c) pH, d) Oxígeno Disuelto.	107

Gráfica 6. Resultados del modelo QUAL2K del cauce principal de la sub-cuenca San Juan del Río, durante el periodo de lluvias (junio 2013), para a) Reaereación, b) Temperatura, c) pH, d) Oxígeno Disuelto.	109
Gráfica 7. Resultados del modelo QUAL2K del cauce principal de la sub-cuenca San Juan del Río, durante el periodo de post-lluvias (noviembre 2013), para a) Re-aireación, b) Temperatura, c) pH, d) Oxígeno Disuelto.	111
Gráfica 8. Influencia del tratamiento en la remoción de solidos suspendidos totales.	148
Gráfica 9. Comportamiento del pH en el tratamiento del efluente.	149
Gráfica 10. Comportamiento de la conductividad en el tratamiento del efluente.	150
Gráfica 11. Influencia del tratamiento en la remoción de demanda química de oxígeno.	152
Gráfica 12. Influencia del tratamiento en la remoción de demanda química de oxígeno.	155
Gráfica 13. Influencia del tratamiento en la remoción de grasas y aceites.	157

INTRODUCCIÓN

El agua constituye el elemento articulador de todos los sistemas vivos del planeta, además de ser un recurso natural, único, finito e indispensable para todo organismo viviente. Sin agua no hay vida humana, animal, ni vegetal. Es por ello que la mayoría de los pueblos, culturas y todas las actividades humanas están en mayor o menor grado con dependencia del agua ya que es fundamento y origen de la vida; como la agricultura, la industria, servicios domésticos y el desarrollo tecnológico, por esta razón, el acceso a este bien es considerado como un derecho humano fundamental en calidad y cantidad (Harris Castro, 2010). Los ríos, lagos y arroyos (cuerpos de agua) siempre han sido un factor constante en la formación, transformación y crecimiento de las ciudades, debido a que se encuentra estrechamente vinculada a los paisajes fluviales. Aunque, es cierto que el ciclo del agua es renovable y que las moléculas de agua no se desintegran, sino que sólo cambian de estado; la cantidad y calidad del agua sí están disminuyendo en muchas regiones y localidades debido al cambio climático y a que los ecosistemas acuáticos están siendo profundamente alterados y, con ellos, el ciclo del agua (Carabias, 2005).

Como se sabe el ciclo del agua regula procesos biofísicos y funciones ambientales vitales de los ecosistemas; a través de sus funciones físicas, químicas y biológicas. El ciclo hidrológico liga a los grandes sistemas de producción, transferencia y almacenamientos de energía y materiales del planeta. La falta de entendimiento sobre la importancia de la conservación de los ecosistemas acuáticos y de instrumentos apropiados que estimulen el manejo sustentable del agua, así como la aplicación de tecnologías inadecuadas y la introducción de especies exóticas, han ocasionado que los cuerpos de agua se sobreexploten, azolven, contaminen y desvíen provocando severos daños a los ecosistemas y a su biodiversidad, e incluso han llegado a constituir un freno para el desarrollo humano (Carabias, 2005).

La crisis del agua está vinculado especialmente a la forma en cómo los individuos y los miembros de la sociedad, administran el acceso al agua y sus beneficios. La contaminación del agua debilita o destruye los ecosistemas naturales que sustentan la salud humana, la producción de alimentos y la biodiversidad (Unidas, 2014). Es así que para impedir el incremento de la contaminación de los recursos hídricos, el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), o en Inglés PNUD define "la gobernanza de los recursos hídricos" como "un conjunto de sistemas políticos, sociales, económicos y administrativos que directamente logran afectar indirectamente el uso, desarrollo y

gestión de los recursos hídricos, como su distribución” (PNUD, 2011), basándose en los siguientes principios:

1. La equidad y la eficiencia en los servicios de asignación y distribución de los recursos hídricos.
2. La gestión del agua basada en las cuencas hidrográficas.
3. La necesidad de un enfoque integrado de gestión de recursos hídricos
4. La necesidad de un equilibrio entre el uso de los recursos hídricos para las actividades socio-económico y el uso de los ecosistemas” (PNUD, 2011).

Por lo cual para cumplir con los principios para la gobernanza de los recursos hídricos es necesaria la formulación, elaboración y aplicación de políticas, legislación e instituciones orientadas para la gestión integrada de los recursos hídricos.

En este contexto una propuesta de plan de manejo de una sub-cuenca hidrográfica es un área importante debido a que es un conjunto de acciones de gestión ambiental el cual contribuirá con la mejora de la calidad del agua, ya que es el factor más importante para determinar el estado de conservación de los recursos de la cuenca, esto explica la dificultad y la importancia para un buen diagnóstico del estado de la cuenca, por lo tanto la participación conjunta de actores y usuarios de los servicios y recursos de la zona de estudio la sub-cuenca San Juan del Río, harán posible la aplicación de todas las acciones técnicas directas e indirectas, planes o proyectos de manejo de cuenca que se requieren; con el fin de contribuir a la sustentabilidad ambiental para mantener la productividad de la tierra, deteniendo o revirtiendo los procesos de degradación de la misma. Dichas prácticas y/o planes de manejo, deben orientarse a mantener y/o mejorar las condiciones físicas, químicas y biológicas de la cuenca; por lo tanto en términos generales una cuenca hidrográfica es el espacio geográfico donde fluye un canal o cauce principal y que es delimitado por una línea divisoria de aguas (parteaguas), por lo que para fines de análisis y planeación de territorio y planificación, se consideran pequeñas cuencas hidrográficas (sub-cuencas), debido a que es necesario considerar que una cuenca hidrográfica de mayor tamaño es más compleja desde el punto de vista geomorfológico y de los sistemas agrícolas e industriales que se desarrolla en dicho territorio ya que esta situación puede dificultar la planificación y ejecución de prácticas conservacionistas por su extensión tan grande.

Con dichos argumentos, este trabajo de investigación es el estudio de la sub-cuenca San Juan del Río, Querétaro, mencionando una propuesta de manejo del recurso hídrico de la zona debido a que dicha área ha tenido un desarrollo industrial impresionante ya que está dentro del corredor industrial México-Monterrey, por lo que es necesario contar con nuevas técnicas de tratamiento del recurso hídrico siendo el objetivo general del trabajo proponer alternativas para un uso óptimo de los recursos hídricos disponibles en la zona de estudio, determinando un componente inorgánico (el plomo) presente en el cauce principal de la sub-cuenca, además para entender el comportamiento del cauce principal se realizó su modelación mediante un programa computacional llamado QUAL2K, debido a que simula la calidad de los ríos y arroyos; además de proponer un tratamiento al efluente obtenido en la producción de biodiesel, ya que es posible que en un futuro no muy lejano, sea necesario contar con la industria productora de biodiesel debido a que es necesario contar con nuevas fuentes de combustibles limpios y amigables con el ambiente ya que el combustible más utilizado es el petróleo, por lo que es un recurso de energía limitado, el cual cuenta con una reserva mundial de 1,668.9 billones de barriles en el 2012, la cual se calcula que esta cantidad solo es suficiente para abastecer durante 53 años a nivel mundial, es decir que se puede proyectar una crisis energética, es por esto que se crea una reciente preocupación sobre nuevas tecnologías para fuentes de energía alternativas así como el tratamiento del efluente de la purificación de la producción de biodiesel.

Para este estudio, se realizó un análisis del estado de la sub-cuenca San Juan del Río, ya que en México se cuenta con un déficit de conocimientos sobre el manejo sustentable de los cuerpos de agua; mediciones deficientes y regulaciones del deterioro de la calidad y de las condiciones actuales de las cuenca hidrográficas y la falta de instrumentos adecuados para sus mediciones, además de ausencia de políticas correctas que favorezcan la preservación y cuidado de cuerpos de agua; se examinó también, mediante espectroscopia de absorción atómica el componente inorgánico “plomo” para dar medidas o técnicas que disminuyan dicho componente; ya que el agua es una fuente significativa de metales pesados (compuestos inorgánicos); por el cual mediante los procesos de erosión, lixiviación, disolución, hidratación y carbonatación de ciertos materiales, el agua moviliza y distribuye el plomo (Fifield, 2000). Este parámetro es un problema de contaminación para el cual es necesario proponer un tratamiento de remediación debido a que el suelo y sedimentos son el sustrato terrestre y acuático para plantas que absorben y, en algunos casos, bioacumulan metales pesados requeridos para su alimentación, por lo que como parte importante de la cadena alimentaria, las plantas son la ruta por la cual los animales y humanos

incorporan estos elementos creando posibles problemas en la salud de la población. Proponiendo como método de tratamiento para dicho problema de contaminación, adsorción con carbón activado; debido a que es un método de tratamiento simple ya que es una de los procesos más utilizados para la remoción del plomo en el agua, porque posee un gran porcentaje de remoción el cual es un excelente parámetro disminuyendo así la posibilidad del afectar las condiciones del medio ambiente de la cuenca y su población.

Dentro de la propuesta de tratamiento del efluente, proveniente de la producción de biodiesel creado mediante una reacción alcalina homogénea, por lo que para el tratamiento del efluente de la purificación del biodiesel, se utilizan diferentes procesos como: centrifugación, coagulación y floculación; obteniendo alto porcentajes de remoción de los contaminantes orgánicos generados por dicho proceso de producción; debido a que es necesario un tratamiento de dicho efluente ya que sus parámetros de: demanda química de oxígeno, demanda biológica de oxígeno, sólidos suspendidos totales, pH, grasas y aceites etc. no logran cumplir con los valores que las normas de descargas de aguas residuales de México y Portugal.

1. DELIMITACIÓN Y PROPUESTA DE MANEJO DE LA SUB-CUENCA SAN JUAN DEL RÍO

1.1 EL AGUA EN MÉXICO

México cuenta con una extensión territorial de 1,964 millones de km^2 , tiene una población de 112 millones 336 mil 538 habitantes, lo cual lo ubica en el décimo primer lugar del mundo en materia de población con una tasa de crecimiento de 1.4% (INEGI, 2010). La precipitación media en el territorio nacional es de 775 mm, equivalentes a $1,513 \text{ km}^3$, de esta cantidad $1,084 \text{ km}^3$ se evapotranspira y el escurrimiento superficial medio es de 400 km^3 , de los cuales se aprovechan 47 km^3 . Por otro lado, los acuíferos reciben una recarga de 78 km^3 y se les extrae 28 km^3 , obteniendo una cantidad de 476 km^3 de agua disponible (figura 1). Sin embargo, el agua que se precipita, escurre y almacena no está distribuida físicamente de manera homogénea en el territorio nacional, ni en las distintas épocas del año (Carabias, 2005).



Figura 1. Componentes del ciclo hidrológico mexicano (Carabias, 2005).

1.1.1 LA CRISIS DEL AGUA EN MÉXICO

Uno de los mayores retos a los que se enfrenta México y el mundo en el siglo XXI es el de tener acceso a suficiente agua limpia. Debido a que el agua se está convirtiendo, en muchas regiones del mundo, en un factor limitante para la salud humana, la producción de alimentos, el desarrollo industrial y el mantenimiento de los ecosistemas naturales y su biodiversidad, e incluso para la estabilidad social y política de los países. “Si bien es cierto el ciclo global del agua es renovable y las moléculas de agua no se desintegran sino que sólo cambian de estado, sin embargo, la cantidad y calidad del agua dulce sí están disminuyendo en muchas regiones y localidades debido

a que los ecosistemas acuáticos están siendo profundamente alterados y, con ellos, el ciclo del agua” (Carabias, 2005).

Es decir que los problemas actuales relacionados con el agua son muy severos en México. En muchas regiones la disponibilidad natural es crítica, la calidad es inapropiada, los servicios son insuficientes, no alcanza la inversión económica para cubrir los rezagos y menos aún para atender la demanda creciente; las actividades productivas compiten por el agua, y el cambio climático incrementa la vulnerabilidad de los ecosistemas y de las personas. Otro indicador de la crisis del agua es el creciente número de conflictos que se originan por la competencia por el recurso entre habitantes de una misma ciudad, entre regiones de un país y entre países. Asimismo, la falta de capacidad de aplicación de la ley, debido a que a las autoridades les resulta cada vez más difícil aplicar medidas de administración del agua.

1.1.2 SITUACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN MÉXICO

El agua es un recurso vital, se inscribe en la cadena de las necesidades absolutas para la conservación de todas las especies vivientes. Ya que es un recurso vital no sustituible, que es por naturaleza el elemento más irremplazable de la vida. Sus características intrínsecas dan al agua un poder simbólico importante dado a que forma parte de la cultura de la sociedad. Los actos políticos, económicos y jurídicos relacionados con la gestión del agua responden a contextos geográficos, hídricos y demográficos, así como a la dinámica social, tanto en el ámbito local, regional y nacional como internacional (Louise Rolland, 2010).

El uso inadecuado del agua y la transformación de los ecosistemas naturales amenaza la existencia de especies biológicas y el desarrollo económico y social del país. En el país, la disponibilidad natural de agua estimada para el año 2004 fue de 4 500 m³/hab/año (Carabias, 2005). Sin embargo el gobierno mexicano declaró el tema del agua como un problema de interés nacional. Aunque en términos absolutos el país no carezca de agua, la desigualdad en la repartición de este recurso en el territorio, su contaminación y la falta de mantenimiento de las infraestructuras hidráulicas son responsables de su escasez, además del incremento en la demanda debido al crecimiento poblacional, el empleo de ineficientes sistemas de riego agrícola, la contaminación de las fuentes

del agua, y la modificación del ciclo hidrológico debido al deterioro de los ecosistemas y el cambio climático.

En México pueden distinguirse dos formas principales de manejar las aguas, el agua local y la nacional. En la primera, destacan los grupos y autoridades locales en el manejo del líquido; es decir, a pequeña escala los aprovechamientos eran de propietarios, vecinos organizados, autoridades municipales; en la segunda, es la nación a través del gobierno federal, la que intenta imponer un manejo centralizado y uniforme a lo largo y ancho del país, activo protagonista de los usos del agua por medio de la inversión pública (Luis Aboites Aguilar, 2010).

Los cuerpos de agua que no están clasificados como aguas nacionales, tienen el dominio de privado o local; sin embargo, si se encuentra en varios terrenos pertenecientes a distintos propietarios o, si son declarados de utilidad pública, forman parte integral de los bienes del dominio público del estado donde se sitúan y serán regulados por el gobierno, debido a que el código civil federal en el artículo 764, define dos tipos de dominio: el público y el privado; es decir que los que son públicos están bajo el cargo de la federación o de los estados o municipios, aunque estos mismos están divididos en varias categorías la primera es los bienes comunes; es decir los que son inapropiables por naturaleza, están fuera del comercio y que son inalienables e imprescriptibles, la segunda categoría; son los bienes destinados a los servicios públicos, los cuales también son inalienables e imprescriptibles, y en tercer lugar los bienes propios utilizados con fines administrativos que forman parte del dominio privado del estado, todos los demás bienes, en la medida que no son excluidos del comercio, son susceptibles de adquisición por particulares. Por lo que el agua se considera como un bien común, aunque en ocasiones los ríos y mantos acuíferos son considerados bienes comunes públicos y privados, por lo que las aguas susceptibles de apropiación por particulares, son solo las que se encuentran ubicadas exclusivamente dentro de un predio.

Es por esto que el derecho civil ha tenido un alcance limitado en la regulación de la administración de las aguas, por lo cual dichos títulos existentes dejaron de ser derechos de propiedad y pasaron a ser derechos de uso, clasificados de la siguiente manera: uso doméstico, uso público, riego, producción de energía, actividades industriales y entarquinamiento de terrenos.

La ley sobre aprovechamiento de aguas de jurisdicción federal de 1910, confirma el principio de la jurisdicción sobre las aguas nacionales, es decir, bajo el dominio público de la federación. Por lo

cual en la constitución de 1917 consagro con claridad la supremacía del interés público sobre la propiedad privada, donde en el artículo 27, se reafirma el dominio público de la nación sobre las aguas e integró los principios de imprescriptibilidad y de inalienabilidad de ellas (Aguilar, 1998).

1.1.3 LA GESTIÓN INTEGRADA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN MÉXICO

La Gestión Integrada de los Recursos Hídricos en México (GIRH) es un enfoque de política pública, incremental y adaptativo, que persigue el desarrollo y manejo coordinado del agua, la tierra y los recursos relacionados; mediante un sistema de representación democrática para el provecho y manejo del recurso hídrico y de los diferentes usuarios a nivel de cuenca, es decir los participación de los representantes de los ejidos, propietarios ribereños, de empresas locales, municipales, del estado y de la comunidad en general.

Está orientada a propiciar que el aprovechamiento de los recursos hídricos se dirija hacia la consecución de objetivos nacionales de desarrollo económico y social bajo criterios de equidad y sostenibilidad ambiental. Creando comités para la toma de decisiones los cuales deberán de aprobar la programación de riego, los proyectos de instalación de nuevas industrias, al igual que toda actividad que necesite recursos hídricos, además, considerando también las subcuencas, microcuencas y acuíferos como unidades interdependientes para la gestión y desarrollo de los recursos hídricos; buscando establecer objetivos a corto y largo plazos para las políticas hídricas mediante la planeación estratégica; está orientada a establecer la política hídrica como una política transversal, de manera que los demás sectores tomen en cuenta al agua en el desarrollo de sus propuestas y actividades de gobierno (Louise Rolland, 2010), (Juan C. Valencia Vargas, 2010).

Por lo cual el país se dividió en 37 regiones hidrográficas, que a su vez se agrupan en las 13 regiones hidrológico-administrativas (RHA) (CONAGUA, 2015), las cuales fueron delimitadas a partir de las cuencas naturales hidrográficas y la división territorial de los municipios, en donde cada región cuenta con una organización de consejos de cuenca; estos consejos son formados por representantes gubernamentales, diversos usuarios y representantes de la sociedad civil, para coordinar y programar los usos del agua en la región.

1.2 ANTECEDENTES

1.2.1 LOS RETOS DEL AGUA EN MÉXICO

México presenta problemas que obligan a hacer una mejor administración para poder satisfacer las demandas de sus habitantes, entre ellos se encuentran:

- a) La escasez del agua.
- b) La contaminación del recurso.
- c) La necesidad de mejorar su administración.
- d) La falta de ordenamiento ecológico.
- e) El impacto del cambio climático sobre el ciclo hidrológico.
- f) La poca inversión en investigación y desarrollo tecnológico del país.

Las posibles soluciones a estos problemas mencionados, se deben de plantear a nivel de cuenca, debido a que es necesario la participación y fortaleza de las organizaciones relacionadas al agua, como los consejos de cuencas, los comités de cuenca, los comités de aguas subterráneas, los organismos de cuenca y los tres niveles de gobierno englobados en un mismo territorio. Por lo que es necesario proponer acciones para lograr el equilibrio de las cuencas sobreexplotadas y evitar que lleguen a esta situación, mediante programas de gestión integrada del recurso hídrico. Para ellos se requiere plantear instrumentos económicos, sociales y políticos que lo soporten (Felipe I. Arreguí Cortés, 2010).

Es necesario diferenciar entre escasez que es la situación en la que el déficit de agua es crónico y es debido a causas meteorológicas (sequías, cambio climático, etc...), el estrés hídrico donde es la presión demográfica y la contaminación, la causante del problema de escasez.

1.2.2 USOS DEL AGUA EN MÉXICO

El paradigma actual del agua, es que es, ecológica y socialmente insostenible debido a que al principio del tercer milenio de nuestra era, las aguas dulces del mundo se han convertido en: un bien escaso, amenazado y en peligro. Ya que el agua es el mayor limitante para la producción de alimentos y para la generación de la biomasa vegetal. Es así como el agua sustenta los ecosistemas

y la producción primaria y es la mayor limitante para la producción de alimentos. En México, el agua constituye un elemento que determina el buen funcionamiento de los sistemas productivos e influye en la calidad de vida de sus habitantes. Durante mucho tiempo el agua fue considerada como un recurso indefinidamente renovable y gratuito y no se concebía como problema el que fuera un medio para transportar los desechos.

Los recursos naturales, tales como el agua y sus cuencas, se distribuyen sobre espacios concretos; por lo tanto, son susceptibles de ser representados en mapas, una vez inventariados y clasificados. Por lo que se debe de ver a la cuenca, desde una perspectiva de sistema compuesto de subsistemas: físico, biótico y socio-económico (Gustavo León Duarte, 1998). Debido a que las cuencas hidrológicas tienen las siguientes funciones como: la captación y almacenamiento de agua, proveen de hábitat para la flora y fauna y espacio para interacciones, captura de CO₂, y regulan ciclos biogeoquímicos y donde suministran recursos naturales para el desarrollo de actividades productivas.

De esta manera los usos del agua en México el 77% se utiliza en la agricultura, 14% para abastecimiento público, 5% para la generación de energía eléctrica por medio de plantas termoeléctricas e hidroeléctricas y 4% para la industria autoabastecida (figura 2). El sector industrial compite por el uso del agua con otros sectores productivos, particularmente con el agrícola, y en algunas regiones esto se convierte en un factor de conflicto social y político. En el uso industrial, sólo se consume 10% del agua total, pero la contaminación que genera es tres veces mayor que la que produce 100 millones de habitantes. La actividad con mayor volumen de descarga es la acuicultura, con 67.6 m³/s (39.6%), seguida por la industria azucarera 45.9 m³/s (27%), la petrolera 11.4 m³/s (6.6%), los servicios 10.3 m³/s (6%) y la química 6.9 m³/s (4%) (CONAGUA, 2011).

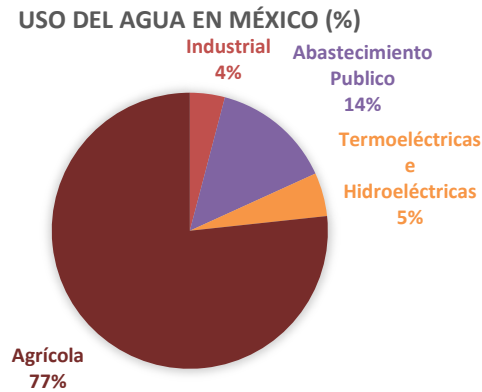


Figura 2. Usos del agua en México (CONAGUA, 2011).

Los usos del agua en México se dividen en consuntivos y no consuntivos. Los consuntivos son aquéllos en los que el agua es transportada a su lugar de uso y la totalidad, o parte de ella, no regresa al cuerpo de agua. En los usos consuntivos una porción del agua se evapora o transpira, o es incorporada a los productos o cosechas, utilizada para el consumo humano o del ganado, o retirada de otra forma del ambiente acuático inmediato, por lo que una parte no vuelve a la corriente o a las aguas subterráneas justo después de ser usada.

Los usos no consuntivos son aquéllos en los que el agua se utiliza en el mismo cuerpo de agua o con un desvío mínimo, por lo que regresa al entorno inmediatamente después de haberse utilizado o aprovechado, aunque, en ocasiones, regrese con cambios en sus características físicas, químicas o biológicas. La generación de energía eléctrica es el principal uso no consuntivo, además del recreativo o turístico y la acuacultura

1.2.3 GRADO DE PRESION DEL AGUA EN MÉXICO

El grado de presión sobre los recursos hídricos representa la proporción del agua disponible que se extrae en una zona, ya sea para fines agrícolas, públicos, industriales o de otros tipos, respecto al agua renovable (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2012). El porcentaje que representa el agua empleada en usos consuntivos respecto a la disponibilidad es un indicador del grado de presión que se ejerce sobre el recurso hídrico en un país, cuenca o región (SEMARNAT, CONAGUA, 2013).

A nivel nacional, México experimenta un grado de presión del 17.38%, se considera que si el porcentaje es mayor al 40% se ejerce una fuerte presión sobre el recurso, no obstante, este valor está influido de manera muy significativa por la alta disponibilidad de agua en el sur del país, ya que en regiones como la Frontera Sur, Golfo Centro, Península de Yucatán y Pacífico Sur se extrae menos del 8% del agua disponible. En contraste, las regiones de Baja California, Noroeste, Pacífico Norte, Río Bravo, Cuencas Centrales del Norte, Balsas y Lerma-Santiago-Pacífico, registran grados de presión superiores al 40%.

Las consecuencias del uso del agua para el aprovechamiento y manejo de los ecosistemas de la tierra han sido drásticas como la, interferencia de los flujos de más del 60% de los grandes ríos del mundo, la desaparición de especies de plantas y animales (sepultados en los vasos de las más de 40 mil grandes presas construidas en el mundo), la construcción de obras hidráulicas como presas, canales y abrevaderos, los desequilibrios provocados en el sistema climático (cambios de temperatura y mayor frecuencia de fenómenos meteorológicos extremos), afectan de diversas formas los cuerpos de agua y los ecosistemas acuáticos. Producen cambios abruptos en el flujo de las corrientes superficiales de agua; reducen zonas naturalmente inundables, eliminando la flora y la fauna características de esos ecosistemas; ya que actúan como barreras en los procesos de migración y desove de especies animales y transforman la calidad de agua.

1.2.4 HISTORIA DE MANEJO DE CUENCAS EN MÉXICO

La historia del manejo de los recursos naturales en México ha seguido rumbos cambiantes, bajo enfoques y propósitos diferentes utilizando para ello distintas unidades de gestión (Simonian, 1999). Una de estas unidades, cuya utilización reciente remota a varias décadas es la cuenca hidrográfica. Al sintetizar la historia de las organizaciones de cuenca. La primera fase de las organizaciones de cuenca puede situarse a inicios del siglo XX y estuvo caracterizada por un manejo completamente centralizado del agua a través de delegaciones o instancias regionales de las administraciones centrales; el interés principal consistía en la necesidad de controlar y extender el área agrícola irrigada. Para ello, el gobierno no solo se encargó de tomar las medidas hidrológicas necesarias para calibrar las presas sino que realizó las obras e incluso administro los nuevos distritos irrigados. La segunda fase, ubicada alrededor de los años 40's se basó en crear

organizaciones de grandes cuencas con el objetivo de establecer políticas de desarrollo, con un enfoque de gestión integral de los recursos hídricos. La idea era impulsar y coordinar programas ambiciosos de desarrollo (incluido el industrial) en una región mediante la gestión del agua. Para ello, más que basarse en un conjunto de Estados, se eligió una división que los descartaba deliberadamente. Sin embargo, la ausencia de los centros estatales y de la participación de los usuarios en la toma de decisiones reforzó la visión tecnócrata y fue una de las principales causas de su fracaso (Simonian, 1999).

Durante el sexenio de 2001-2006, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) planteó que “para lograr el manejo integral de los recursos naturales en el territorio mexicano, se adoptara un enfoque integral de cuencas”, para lo cual se requiere que el sector del medio ambiente a nivel federal se organice de manera compatible con este concepto, mediante una estructura administrativa por cuencas hidrográficas. Por lo cual para lograr la gestión de los recursos hídricos, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) dividió al país en 13 regiones hidrológicas donde actúan 15 consejos de cuenca, las cuales funcionan como espacios de discusión y concertación para la toma de decisiones a nivel regional en los temas relacionados principalmente con la distribución del agua. En este nivel existe un énfasis sobre la corrección de los problemas relacionados con el agua (tratamiento y distribución) y sobre estrategias de largo plazo relativas a un enfoque preventivo (protección de fuentes del recurso y prevención de su contaminación). Por lo que en México se aplicó la unidad de gestión considerando microcuencas o sub-cuencas, donde se aplica la atención en tres ejes:

1. El desarrollo del capital humano con enfoque de género
2. La conservación
3. La rehabilitación de los recursos naturales y la diversificación productiva.

De tal manera que se logra crear una participación y sinergia entre las comunidades y las instituciones de la unidad de territorio. (E. Mollard, 2005)

En el plano internacional, las discusiones y los censos versan sobre la necesidad de un manejo integral de los recursos naturales en cuencas hidrográficas. Incluso organismos internacionales como la Comisión Económica para América Latina (CEPAL) ha formulado recomendaciones para reformas institucionales básicas para la instauración de organismos de cuenca. Del mismo modo la organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) ha expresado en diferentes

momentos su aprobación al uso de manejo integral de cuencas como unos de los instrumentos que deberían ser utilizados en la gestión del agua.

Durante el IV Foro Mundial del Agua realizado en México (2006) se hace explícita la necesidad de adoptar un enfoque a nivel de cuencas para el manejo integrado de los recursos hídricos y finalmente la FAO (2006), publica los resultados de un trabajo colectivo mundial para sistematizar los resultados de la gestión de cuencas y analizar las tendencias hacia el futuro. Entre sus principales contribuciones esta la conformación de un nuevo enfoque como el manejo conjunto de cuencas que busca sustituir en el futuro el manejo integrado de cuencas. En este nuevo enfoque se enfatizan los objetivos de sustentabilidad para la conservación y manejo del capital natural como una base necesaria para alcanzar objetivos de desarrollo humano (las dimensiones social y económica de la sustentabilidad).

México, como otros muchos países, enfrenta un proceso irreparable de degradación de sus cuencas. Esto es un reflejo de varios factores complejos asociados a un crecimiento fuerte de la población rural, a una sobreexplotación de recursos naturales y mal uso de la tierra, un proceso de continua deforestación, un clima de creciente inestabilidad y hasta la forma en que se está construyendo la infraestructura. Por lo que la materialización de las acciones de manejo de cuencas hidrográficas, directas o indirectas, se recurre a conceptos, herramientas y métodos, en los ámbitos del estudio, diagnóstico, planificación, intervención y evaluación de las acciones. Todo ello orientado a lograr cambios en los patrones de uso, manejo, mejoramiento y conservación de los recursos (naturales o contruidos) y de las condiciones socio-ambientales que facilitan o permiten estos cambios. (Umaña, 2007)

1.2.5 CONCEPTO DE CUENCA HIDROGRÁFICA EN MÉXICO

En la Ley de Aguas Nacionales, la cuenca se define como una “unidad del territorio, diferenciada de otras unidades, en donde el agua ocurre de distintas formas y se almacena o fluye hasta un punto de salida que puede ser el mar o algún cuerpo receptor interior”. La cuenca hidrográfica es una unidad morfográfica superficial, delimitada por divisorias (“parteguas”) desde las cuales escurren aguas superficiales. Al interior, las cuencas se pueden delimitar o subdividir en subcuencas o cuencas de orden inferior, asimismo se pueden diferenciar zonas caracterizadas por una función primordial (cabecera-captación y transporte-emisión) o por su nivel altitudinal (cuenca

alta, media y baja) (Instituto Nacional de Ecología, 2005). La delimitación de cuencas implica una demarcación de áreas de drenaje superficial donde las precipitaciones (principalmente las pluviales) que caen sobre éstas tienden a ser drenadas hacia un mismo punto de salida (INEGI, 2007).

El manejo integral de cuencas consiste en la delimitación de la cuenca hidrográfica, por lo que en México unieron esfuerzos tres dependencias gubernamentales, el INEGI, el INECC, y la CONAGUA, y establecieron de manera conjunta criterios topográficos e hidrológicos comunes para la delimitación de las cuencas de México. Como resultado se distinguieron 1471 cuencas (exorreicas, endorreicas y arreicas). La gran heterogeneidad y diversidad geográfica del territorio nacional determinó el amplio rango de tamaños de las cuencas, donde aproximadamente 55 % de ellas (807) tienen menos de 50 km² mientras que solo 16 cuencas (1.09 % del país) tiene extensiones mayores de 20 000 km² (CONAGUA, 2014).

Dentro de la cuenca, sus recursos naturales y sus habitantes poseen condiciones físicas, biológicas, económicas, sociales y culturales que les confieren características que son particulares a cada una. Físicamente representa una fuente natural de captación y concentración de agua superficial y por lo tanto tiene una connotación esencialmente volumétrica e hidrológica, es una fuente de vida para el hombre aunque también de riesgo cuando ocurren fenómenos naturales extremos como sequías o inundaciones o el agua se contamina (CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe), 1994).

Es necesario tomar en cuenta el tamaño de la cuenca para su manejo integral de recurso hídrico debido a que tiene una influencia de efecto acumulativo. En cuencas grandes, las fuentes de contaminación y las externalidades que se originen, pueden ser de origen diverso (agricultura, ganadería, ciudades, industria), dispersas en el territorio y actuar de manera diferente en función del tiempo de respuesta de cada efluente. En cuencas de menor tamaño, las fuentes de contaminantes pueden ser más fácilmente localizados y los tiempos de respuestas más cortos. Esta dimensión nos revela la necesidad de integrar a la toma de decisiones a los actores locales para mejorar su desarrollo local y gestión ambiental, por lo que se deben de obtener conocimiento sistemático de las condiciones biofísicas, sociales y económicas para entender el comportamiento que se genera dentro de la unidad de manejo y la participación activa de la sociedad organizada

para llevar a cabo un excelente seguimiento de las acciones para el buen manejo de los recursos (Helena Cotler Ávalos, 2011).

1.2.6 ADMINISTRACIÓN DE LAS CUENCAS EN MÉXICO

Es de gran prioridad para México el cuidado y preservación de sus cuencas hidrológicas ya que los ríos y arroyos de México constituyen una red hidrográfica de 633 mil kilómetros de longitud. Por los cauces de los 50 ríos principales fluye el 87% del escurrimiento superficial de la república y sus cuencas cubren el 65% de la superficie territorial continental del país.

Por la superficie que abarcan, destacan las cuencas de los ríos Bravo y Balsas, y por su longitud, destacan los ríos Bravo y Grijalva-Usumacinta. Los ríos Lerma, Nazas y Aguanaval pertenecen a la vertiente interior. Dos tercios del escurrimiento superficial se dan en los cauces de siete ríos: Grijalva-Usumacinta, Papaloapan, Coatzacoalcos, Balsas, Pánuco, Santiago y Tonalá, a la vez que sus cuencas representan el 22% de la superficie de nuestro país (SEMARNAT, 2008).

De acuerdo a los trabajos realizados por la Conagua (Comisión Nacional del Agua), el INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) y el INE (Instituto Nacional de Ecología), se han identificado 1,471 cuencas hidrográficas en el país, las cuales se han agrupado y/o subdividido en cuencas hidrológicas para fines de publicación de la disponibilidad de aguas superficiales. Para el 31 de diciembre de 2009 se tenían publicadas las disponibilidades de 722 cuencas hidrológicas, en tanto que para el 31 de diciembre de 2010 se habían añadido otras nueve cuencas.

Las cuencas del país se encuentran organizadas en 37 regiones hidrológicas (figura 3), que a su vez se agrupan en las 13 regiones hidrológico-administrativas (figura 4), las cuales están formadas por agrupaciones de cuencas, consideradas las unidades básicas de gestión de los recursos hídricos, sus límites respetan los municipales, para facilitar la administración e integración de la información socioeconómica. La CONAGUA, órgano administrativo, normativo, técnico y consultivo encargado de la gestión del agua en México, desempeña sus funciones a través de estos 13 organismos de cuenca, cuyo ámbito de competencia son las regiones hidrológico-administrativas (CONAGUA, 2015). Esta regionalización fue definida en los años 60's por la entonces Dirección de Hidrología de la Secretaría de Recursos Hidráulicos.



Figura 3. Regiones Hidrológicas de México (CONAGUA, 2014)

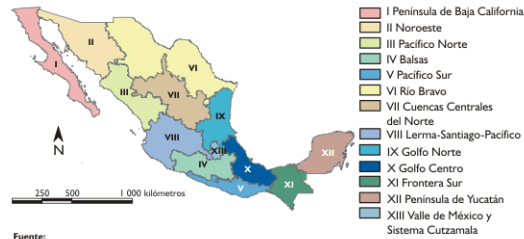


Figura 3. Regiones Hidrológico Administrativas (CONAGUA, 2014).

1.2.7 LA GESTIÓN Y PLANEACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO

La unidad de gestión del recurso hídrico es la cuenca hidrográfica, para lograr una buena administración de los recursos hídricos. Por lo cual para un buen manejo de la cuenca, así como de sus recursos tiene que armonizarse con las competencias de las dependencias ambientales y el dominio público para gestionar los recursos con las competencias de otras dependencias gubernamentales o no gubernamentales, en un amplio repertorio de políticas territoriales, tales como agricultura, ordenamiento territorial, turismo, industria, medio ambiente u otras. Además esta unidad de gestión se debe ejercer en el ámbito más amplio y complejo del territorio hidrográfico, lo que todavía da mayor vigencia al mantenimiento del principio de unidad de la cuenca.

La planificación hidrográfica es necesaria, debido al uso del agua, el aprovechamiento absoluto de los recursos hídricos, como generador de actividad económica, dirigiéndose a la búsqueda de recursos con la calidad adecuada para cada uso y los límites máximos permisibles de emisiones contaminantes, pasando a su vez al objetivo más exigente de armonizar la protección de los ecosistemas hídricos con la satisfacción de reparar las demandas que exige la racionalidad y viabilidad económica, dando entrada a una participación activa de la sociedad. En la medida en

que los objetivos de la gestión del agua sean la protección al medio ambiente, la reducción de la pobreza y la equidad se estará avanzando hacia la sustentabilidad. El concepto de manejo integrado de cuenca es el desarrollo coordinado del manejo de agua, suelo y recursos naturales asociados para maximizar el beneficio económico y social equitativo sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas. Es por esto que el manejo de cuencas debe hacerse bajo una visión común de varias instituciones federales, municipales y organizaciones civiles, debido a que el manejo debe efectuarse con una visión a largo plazo que trascienda periodos gubernamentales.

El propósito de la gestión integral de los recursos hídricos es garantizar el mantenimiento de sus características ecológicas y su uso racional. En sentido amplio de la gestión sustentable del agua puede ser entendida como: El estado de condición (vinculado al uso y estilo) del sistema hidrológico en el momento de producción, renovación y movilización de agua u otros elementos de la naturaleza, minimizando la generación de procesos de degradación del sistema. La gestión de los recursos hídricos se utiliza en el uso del agua disponible y su retorno, por lo que las medidas que contribuyan a hacerla más racional también favorecerán la desaparición del déficit, sobreexplotación y de la contaminación. La gestión integrada de los recursos hídricos puede definirse como un proceso sistemático para el desarrollo sostenible, la asignación y el control del uso de los recursos hídricos en el contexto de objetivos sociales, económicos y medioambientales (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

La gestión de recursos hídricos es un tema político. Por eso, la gestión de cuencas debe tener una "voz" muy fuerte en la toma de decisiones a nivel nacional. Esto implica garantizar líneas directas de comunicación con los ministerios y las comisiones gubernamentales que se dedican a la gestión de los recursos naturales. Los vínculos con los altos mandos del gobierno le otorgan a la gestión de cuencas un lugar firme en los programas de planificación y desarrollo económico. El respaldo desde los niveles superiores es clave al momento de establecer un marco legal y las instituciones y estructuras de gestión que hacen falta para lograr sistemas robustos de gestión de cuencas.

La formulación, planificación y gestión de políticas puede considerarse como una serie de pasos secuenciales en la gestión de cuencas. El primer paso es definir objetivos generales de políticas (a dónde queremos llegar). Los pasos siguientes son especificar los problemas de la gestión del agua a resolver (identificar problemas), hacer una lista de estrategias potenciales (cómo llegar a donde queremos), evaluar cada una de ellas, seleccionar una estrategia o combinación de estrategias, implementar la estrategia, evaluar los resultados, aprender de dichos resultados y revisar nuestro

plan para que funcione mejor en el futuro (figura 5).



Figura 4. Ciclo de gestión de la planificación e implementación, basado en el aprendizaje mediante la práctica (Global Water Partnership; International Network of Basin Organizations, 2009).

1.2.8 PRINCIPIOS PARA LA GESTIÓN DEL AGUA

La gestión del recurso hídrico se basa en los siguientes principios:

1. El agua dulce es un recurso finito y vulnerable, esencial para mantenerla vida, el desarrollo y el medio ambiente.
2. El desarrollo y gestión del recurso hídrico debe fundamentarse en una propuesta participativa, involucrando a usuarios, planificadores y tomadores de decisiones en todo nivel.
3. El agua tiene un valor económico en todos sus usos competitivos. Debe ser reconocida como un bien económico y además como un bien social (Global Water Partnership, 2005).

Las leyes y las políticas para establecer el marco para la gestión del agua deben de contar con los siguientes puntos:

- Identifican claramente las funciones, la estructura y el financiamiento de los organismos de cuenca y la gestión de cuencas;
- Especifican roles y jurisdicciones en materia de gestión;
- Garantizan equidad y responsabilidad en la toma de decisiones;
- Evitan la fragmentación y la superposición de responsabilidades;
- Especifican procesos de regulación y aplicación en lo relativo a compartir el agua, mitigar su contaminación, proteger los ecosistemas o luchar contra peligros naturales, y con respecto a determinar derechos sobre el agua (Global Water Partnership, 2005).

La gestión del agua funciona dentro de un marco tridimensional. Los tres componentes del marco, por lo general elaborados a nivel nacional, son el entorno facilitador, las instituciones y la gestión (figura 6).

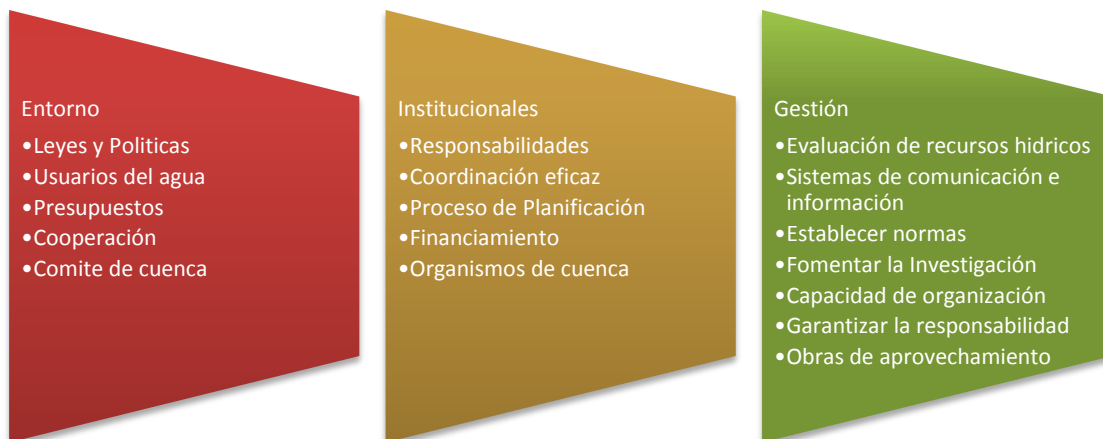


Figura 5. Componentes de la gestión del agua.

Es por esto que en la figura 7, se explica la metodología para la gestión del agua.



Figura 6. Metodología para la gestión del agua (Alliance for water stewardship, 2012).

Aplicando esta metodología para la gestión del agua (figura 7), se realizarían planes integrales de manejo de cuenca, en donde se necesita la participación de todos los usuarios y de la unidad de territorio para el control, planeación y manejo del recurso hídrico, de acuerdo con los intereses y opiniones de todos los participantes, para no generar conflictos y un desequilibrio en el medio ambiente de la cuenca.

1.2.9 GESTIÓN INTEGRADA DEL RECURSO HÍDRICO (GIRH)

El enfoque de la Gestión Integral del Recurso Hídrico (GIRH) ayuda a administrar y desarrollar los recursos en forma sostenible y equilibrada, teniendo en cuenta los intereses sociales, económicos y ambientales; esto significa que todos los usos diferentes del agua deben ser considerados en conjunto. La distribución del agua y las decisiones de gestión consideran los efectos de cada uno de los usos sobre los otros y las necesidades del medio ambiente. Son capaces de tomar en cuenta de forma global, las metas sociales y económicas, incluyendo la búsqueda del desarrollo sostenible.

El enfoque integrado coordina la gestión de recursos hídricos en todos los sectores y grupos de interés, y a diferentes escalas, desde la local a la internacional. Pone énfasis en la participación en los procesos nacionales de formulación de leyes y políticas, estableciendo una buena

governabilidad y creando acuerdos normativos e institucionales efectivos que permitan tomar decisiones más equitativas y sostenibles. Toda una gama de herramientas, tales como evaluaciones sociales y ambientales, instrumentos económicos, y sistemas de información y monitoreo, respaldan este proceso. Los gobiernos nacionales establecen las políticas para el uso y protección de los recursos hídricos en un país. Si bien la implementación de dichas políticas es eficaz en muchas escalas, allí donde se implementan políticas a escala de cuenca, existe la oportunidad de generar soluciones para "toda la cuenca" y resolver controversias aguas arriba, aguas abajo (para un río) y de región a región (para un lago o el agua subterránea). El enfoque de "toda la cuenca" permite la evaluación de un impacto a nivel de sistema. La relación que existe entre la gestión de los recursos hídricos dentro de un país y la gestión del agua en cuencas se vuelve, de esta manera, dinámica y más sensible a las circunstancias cambiantes, sean estas ambientales, sociales o económicas.

Global Water Partnership define a la Gestión Integral de Recursos Hídricos (GIRH); como un proceso que promueve el desarrollo y gestión coordinados del agua, la tierra y los recursos asociados, para maximizar el bienestar económico y social de manera equitativa sin comprometer la sostenibilidad de ecosistemas vitales a largo plazo. A nivel de cuencas hidrográficas o lacustres y de acuíferos. En el cual su enfoque a nivel nacional no se contrapone con el enfoque a nivel de cuenca; de hecho, se complementan. Un marco nacional integral para GIRH es esencial para la gestión de cuencas nacionales y transfronterizas.

Dentro de los límites de una cuenca, integrar los usos del suelo y la gestión del agua no es una tarea sencilla. Esto se debe a que la gestión del suelo, que incluye la planificación, la silvicultura, la industria, la agricultura y el medio ambiente, generalmente está regulada por políticas no relacionadas con las normas del agua y está administrada por muchos sectores diferentes de una administración. La intención fundamental de la gestión sostenible del agua se engloba en los cuatro principios de la gestión, los principios tienen como finalidad constituir las áreas más amplias en la gestión sostenible del agua y proporcionar una idea general de los ámbitos de enfoque e intención en la gestión sostenible del agua:

1. Se debe lograr una gobernabilidad del agua de forma equitativa y transparente para todos los usuarios del agua dentro del ámbito de influencia definido.

2. Los gestores sostenibles del agua se esforzarán por lograr y mantener un balance hídrico sostenible, y ayudar a asegurar la disponibilidad adecuada para todos los usuarios todo el tiempo dentro del ámbito de influencia definido.
3. Se contribuirán a conservar un estatus de buena calidad del agua en términos de las características químicas, físicas y biológicas para mantener los ecosistemas y asegurar una calidad de agua adecuada para todos los usuarios dentro del ámbito de influencia definido.
4. Los gestores sostenibles del agua identificarán las áreas hídricas importantes en sus sitios y dentro del ámbito de influencia definida y se esforzarán por proteger, manejar y restaurar dichas áreas tal como sea necesario.

El principio de áreas hídricas importantes se enfoca en los aspectos espaciales del agua, en el sitio y dentro de la cuenca, y se dirige a las formas de uso del suelo como un componente ligado a los sistemas de agua, ya sea con propósitos culturales o por los servicios del ecosistema.

Las áreas hídricas importantes se definen como áreas relacionadas con el agua que se consideran particularmente importantes por los actores locales debido a los servicios a nivel de ecosistema que proveen, incluyendo su valor cultural, espiritual, recreativo, económico o de biodiversidad (Global Water Partnership; International Network of Basin Organizations, 2009).

Las características de la gestión integral de los recursos hídricos son:

- Maneja el recurso hídrico a nivel de cuenca, sub-cuencas, micro-cuencas y acuíferos como unidades independientes su gestión y desarrollo
- Establece objetivos a corto y largo plazo mediante la planeación estratégica y producción de planes ambientales para hacer cumplir las políticas hídricas.
- Se orienta a establecer políticas hídricas como una política paralela de manera que se tome en cuenta el agua como limitante para desarrollo de propuestas y actividades de gobierno así como en las industrias y universidades.
- Integrar al subsidiado y usuario del recurso hídrico participar en las políticas hídricas.

1.2.10 MANEJO INTEGRAL DE CUENCA HIDROGRÁFICA

El manejo integral de una cuenca es un instrumento que facilita las decisiones y acciones para cumplir o alcanzar los objetivos propuestos por las comunidades que alberga cada unidad hidrográfica. Permite considerar a la cuenca como unidad de planeación, atención y gestión ambiental, por lo que es una visión global del territorio. “El manejo de cuencas es el proceso complejo que le da orden a un conjunto de acciones dentro de la cuenca hidrológica superficial (Hidrográfica) o Cuenca Hidrológica Subterránea, encaminado a lograr un desarrollo social y económico sostenibles en el tiempo, además de la protección del medioambiente”.

Una cuenca hidrográfica se define como la unidad del territorio, normalmente delimitada por un parteaguas o divisoria de las aguas, en donde ocurre el agua en distintas formas y ésta se almacena o fluye hasta un punto de salida que puede ser el mar u otro cuerpo receptor interior, a través de una red hidrográfica de cauces que convergen en uno principal. Al interior de las cuencas se pueden delimitar sub-cuencas o micro-cuencas. La salida de una cuenca identifica el punto hacia el cual la escorrentía fluye de forma natural (Cotler, 2004). La cuenca y sus sub-cuencas contienen particulares recursos que se han conformado, sobre su geología, en función de su ubicación geográfica, por la acción de los fenómenos naturales y de los seres vivos; quienes, salvo la energía solar, el agua, el calor terrestre y los minerales han generado todos los otros recursos renovables y no renovables, encontrados y usados por la especie humana.

En la cuenca hidrográfica se encuentran los recursos naturales, la infraestructura que el hombre ha creado, allí el hombre desarrolla sus actividades económicas y sociales generando diferentes efectos favorables y no favorables para el bienestar humano. No existe ningún punto de la tierra que no pertenezca a una cuenca hidrográfica.

Por lo que los retos del manejo integrado de cuencas son:

- Pérdida de cubierta vegetal.
- Crecimiento urbano
- Contaminación del agua
- Erosión del suelo.
- Consideración de los efectos del cambio climático
- Sequía

- Inundaciones
- Incendios forestales.

La elección de áreas prioritarias o de micro-cuencas debe buscar mejorar el funcionamiento eco-hidrológico de la cuenca y abatir la pobreza rural. El manejo integral de una cuenca tiene como fin la conservación y/o restauración del ciclo hidrológico natural de la cuenca (World Vision, 2000).

El análisis ambiental en un contexto de cuencas permite: Entender las interrelaciones entre los recursos y condiciones naturales (relieve-suelo-clima-vegetación). Y las formas en las cuales la población se organiza para apropiarse de los recursos y su impacto en la cantidad, calidad y temporalidad del agua, en la determinación de fuentes contaminantes, y sus impactos en la dinámica eco-hidrológica de la cuenca. El tamaño y la jerarquía de las cuencas (escala espacial) nos ayudan a comprender los orígenes y las causas de los problemas, la determinación de áreas prioritarias de atención y el conocimiento de la diversidad de los actores que están involucrados en la problemática específica de cada cuenca.

Los componentes a considerar para un manejo integrado de cuencas como unidades de gestión y planeación son (figura 8):

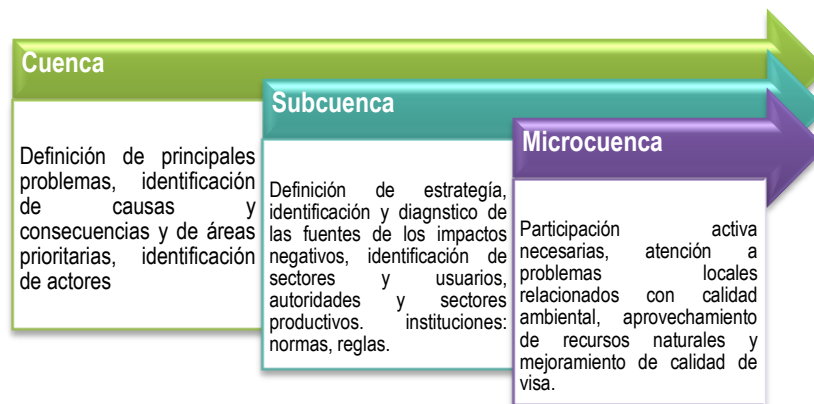


Figura 7. Componentes de la jerarquía hidrográfica (Helena Cotler Ávalos, 2009).

Los administradores de la planeación de cuencas tienen un enfoque dirigido, a quién dirigirlo y a qué nivel. Una manera simple y efectiva de descubrir hacia dónde dirigir la acción inicialmente es identificar los puntos de partida:

- A nivel de políticas (procesos nacionales e internacionales para desarrollar políticas, tratados y leyes del agua).

- A nivel de implementación (plan de gestión a escala provincial o de cuenca).
- A nivel local (plan de sub-cuenca, plan local de gestión de acuíferos, plan local de asignación de agua en distritos de usuarios del agua, plan del gobierno local).

Las etapas del manejo integral de cuencas con los objetivos de conservación, buen manejo, prevención y control son (figura 9):

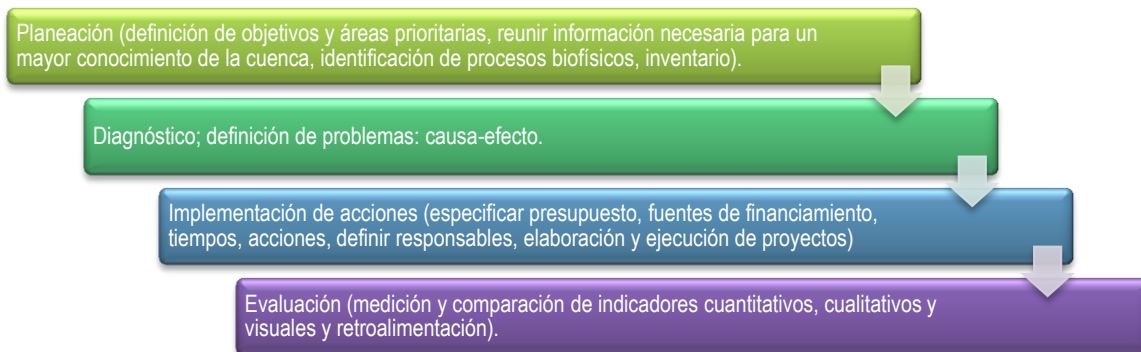


Figura 8. Etapas del manejo integral de cuencas hidrográficas.

Sin embargo, es importante reconocer que los puntos de partida dependerán de la naturaleza de la cuenca en cuestión, en particular:

Si la cuenca está dentro de un país o varios países se debe de tomar en cuenta lo siguiente:

- La escala de planificación y gestión (transfronteriza, nacional, local);
- El grado de desarrollo del organismo de gestión de cuenca;
- El grado de desarrollo dentro de la cuenca, en relación con la economía o la infraestructura.

Es por esto que se logra combatir de mejor manera la problemática de la cuenca y su manejo como unidades pequeñas de territorios más apropiados para conducir los procesos de manejo, aprovechamiento, planeación y administración del agua.

De tal manera que para un buen manejo de cuenca es necesario tener delimitada la unidad de territorio en micro-cuenca la cual se define como: un territorio delimitado por partes altas (parte aguas) cuyas aguas superficiales drenan a través de un mismo curso de agua, con una superficie menor a 5,000 has (50 km²) y una población integrada (de manera actual o potencial). En los esquemas normales de jerarquización de cuencas, se suele hablar de cuencas para referirse a

aquellas áreas que drenan por un curso de agua que desemboca en cuerpos de agua (océanos, mares o lagos) (Monroy, 2007). Se habla de sub-cuencas para referirse a los territorios que drenan por cursos de agua que desembocan en el curso principal de una cuenca, o sea la cuenca se subdivide en sub-cuencas que corresponden a los cursos de agua que terminan en el curso principal (Barrios, 2008).

De tal manera que se logra concluir que el manejo integral de cuencas es un conjunto de esfuerzos a identificar y aplicar opciones técnicas, socioeconómicas y legales, que establecen una solución a la problemática causada por el deterioro y mal uso de los recursos naturales renovables, para lograr un mejor desarrollo de la sociedad inserta en ella y de la calidad de vida de su población.

1.2 11 SISTEMA DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA

El sistema de una cuenca hidrográfica está integrado por los subsistemas siguientes:

- a) Biológico, que integran esencialmente la flora y la fauna, y los elementos cultivados por el hombre.
- b) Físico, integrado por el suelo, subsuelo, geología, recursos hídricos y clima (temperatura, radiación, evaporación, etc.).
- c) Económico, integrado por todas las actividades productivas que realiza el hombre, en agricultura, recursos naturales, ganadería, industria; servicios (camino, carreteras, energía, asentamientos y ciudades)
- d) Social, integrado por los elementos demográficos, institucionales, tenencia de la tierra, salud, educación, vivienda, culturales, organizacionales, políticos, etc.

Los elementos que integran los subsistemas variarán de acuerdo al medio en el que se ubique la cuenca y al nivel de intervención del factor humano. Es por estos factores que en otros países se ha reconocido a las cuencas como los territorios más apropiados para conducir los procesos de manejo, aprovechamiento, planeación y administración del agua.

La regionalización con criterio ecológico ha surgido como respuesta a: la presión de las actividades antropogénicas ejercidas sobre los ecosistemas naturales, los territorios dedicados a actividades productivas han ido en aumento, provocando intensos efectos ambientales negativos. La regionalización ecológica consiste en delimitar espacios geográficos relativamente homogéneos en función del medio físico y biológico, de tal manera que se pueda establecer una adecuada vinculación con el uso y apropiación del territorio por parte de la sociedad. Así, la clasificación ecológica del territorio trata de delinear y clasificar áreas ecológicamente distintivas de la superficie de la Tierra. El ordenamiento comunitario debe atender la provisión sostenida de bienes y servicios de las cuencas a los habitantes de las mismas, incluyendo: agua para consumo e irrigación, productos forestales, producción agrícola y pecuaria, recreación y turismo y mantenimiento de la diversidad biológica (SEMARNAT, 2010).

1.2.12 LA PROBLEMÁTICA DE LAS CUENCAS HIDROGRÁFICAS

La Problemática del manejo de cuencas hidrográficas se presenta en:

- Los límites políticos (municipales, estatales)
- Estructura organizacional variable. (Comisariados ejidales–municipios–estados)
- La necesidad de acuerdos intercomunitarios (número de habitantes en una cuenca, comunicación a través de autoridades locales, pero en cuencas grandes la estructura organizacional adoptada para tratar los problemas ambientales es mucho más formal y compleja)
- Visión fragmentada del sector ambiental
- La posición de considerar el grado de marginación como un criterio para la priorización de cuencas
- Pobreza
- La presencia de zonas donde se produce mucha riqueza (industrias, comercios, agricultura tecnificada) y que generan efectos negativos sobre la dinámica de la cuenca.

Dichos factores de la problemática de las cuencas hidrográficas se logran englobar en tres áreas:

•Socioeconómicos: entre otros, destaca la pérdida de cobertura arbórea o deforestación; el deterioro de tierras; la ruptura del vínculo hidrológico-forestal; la marginación de poblaciones

(especialmente de aquellas que viven en ambientes rurales, o de quienes ocupan laderas y montañas); la pérdida de productividad de los ecosistemas naturales y de los ecosistemas intervenidos; la vulnerabilidad ante riesgos naturales y la vulnerabilidad alimentaria.

- Político-institucionales: insuficientes políticas, programas y proyectos participativos en materia de uso, conservación y manejo integral de recursos naturales renovables; reducida participación comunitaria —urbana y rural— en procesos de gestión socio-ambiental; escasa capacidad para generar información básica orientada al manejo de recursos naturales (en el caso que nos ocupa, información sobre cuencas hidrográficas); inadecuada e insuficiente gestión de riesgos; problemas de coordinación entre las diversas iniciativas que se implementan; duplicidad de esfuerzos.

- Ambientales: erosión genética; disminución de la resiliencia de los ecosistemas naturales; pérdida de biodiversidad; contaminación de cursos de agua; contaminación atmosférica; erosión de suelos (Umaña, 2007).

1.2.13 BENEFICIOS DE LA GESTIÓN INTEGRAL DE LOS RECURSOS HÍDRICOS (GIRH)

El manejo apropiado de una cuenca hidrográfica y la GIRH brinda beneficios de bienes y servicios, los que pueden ser aprovechados por la comunidad nacional o local, donde se puede colaborar con diferentes sectores, al aumentar el conocimiento entre usuarios de las necesidades de los ecosistemas y de los beneficios que estos les generarían, si se realiza una buena planeación. Frecuentemente estos beneficios son sub-valorados y no se incorporan en el planeamiento y la toma de decisiones. Los ecosistemas pueden beneficiarse de la aplicación de una propuesta integrada para la gestión del agua, al dar una voz a las necesidades medioambientales en el debate de la distribución del agua.

a) Beneficios ambientales

En el marco para la GIRH se obtienen los siguientes beneficios al medio ambiente:

- Protección de zonas superiores de captación (reforestación, buen manejo de la tierra, control de la erosión del suelo)
- Control de la contaminación y flujos ambientales (reducción de fuentes fijas, incentivos para fuentes difusas, protección de aguas subterráneas).

- Provee una alternativa para la perspectiva de competencia de sub-sectores que puede reunir a los interesados para desarrollar un punto de vista compartido y una acción conjunta.

b) Beneficios para la agricultura

- Impulsa a los planificadores a ver más allá de la economía del sector y a tomar en cuenta las implicaciones de las decisiones de gestión del agua en el empleo, el medio ambiente y la igualdad social.
- Al reunir a todos los sectores y a todos los interesados en el proceso de toma de decisiones, la GIRH es capaz de reflejar el “valor” combinado del agua para la sociedad como un todo, en la toma de decisiones difíciles que se relacionan con la distribución del agua. Esto puede significar que la contribución de la producción de alimentos, en la salud, la reducción de la pobreza y en la igualdad de género.

c) Beneficios del suministro de agua y del saneamiento.

Se conduce a garantizar el agua para las personas pobres y sin acceso a ella. La implementación de políticas basadas en la GIRH debe significar una mayor garantía en los suministros domésticos de agua y menores costos de tratamiento, debido a que la contaminación es combatida de una manera más efectiva. El reconocer los derechos de las personas y, particularmente, de las mujeres y de los pobres, en la repartición equitativa del recurso hídrico para uso doméstico y para usos productivos en el hogar, conduce a la necesidad de asegurar la representación apropiada de estos grupos en las instancias que toman decisiones con respecto a la distribución del recurso hídrico.

El enfoque en la gestión integrada y en el uso eficiente, debe ser un estímulo para el sector que promueva el reciclaje, la reutilización y la reducción de desechos. Las multas elevadas por contaminación, respaldadas por una puesta en vigor rígida, ha generado mejoras impresionantes en las eficiencias de uso de agua en el ámbito industrial en los países industrializados. Como consecuencia, se han producido beneficios para el suministro de agua de uso doméstico y para el medio ambiente.

La introducción de la GIRH va a mejorar la posibilidad de soluciones de saneamiento sostenibles que buscan minimizar las fuentes de generación de desechos y la reducción de la cantidad de desechos producidos y resolver los problemas de saneamiento lo más cerca posible del lugar en

donde se generan (Global Water Partnership, 2005). La Gestión Integral de Recursos Hídricos y la planeación integrada, hace que el agua, la tierra y los otros recursos sean utilizados de manera sostenible. Debido a que se busca aumentar la productividad hídrica (es decir, más cultivo por gota) dentro de las limitaciones impuestas por el contexto económico, social y ecológico de una región o país en particular.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Proponer alternativas para un óptimo uso de los recursos hídricos disponibles en la sub-cuenca del Río San Juan, Querétaro.

1.3.2 OBJETIVOS PARTICULARES

- Caracterizar la zona de estudio, para conocer las condiciones de la sub-cuenca.
- Determinar los contaminantes inorgánicos.
- Dar medidas o técnicas para disminuir los contaminantes inorgánicos.
- Modelar el cauce principal del río San Juan.
- Obtener tres diferentes tipos de biodiesel, derivados de productos grasos y evaluar sus efluentes obtenidos en el proceso de purificación (lavado)
- Conocer los diferentes parámetros de calidad de agua alterados por este proceso industrial.
- Dar un tratamiento al efluente obtenido en la producción de biodiesel.

1.4 CARACTERIZACIÓN DE LA SUB-CUENCA SAN JUAN DEL RÍO CASO DE ESTUDIO

1.4.1 UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La ciudad de San Juan del Río se ubica dentro de la sub-cuenca del río San Juan, que forma parte de la cuenca del río Moctezuma, la cual a su vez pertenece a la Región Hidrológica 26, conocida como Pánuco, que forma parte de la Región Administrativa IX Golfo Norte. Los principales afluentes en suelo queretano de la cuenca del río Moctezuma son los ríos Extoraz, San Juan, y los arroyos Seco y Galindo. Esta cuenca es de gran importancia para la entidad, no sólo por su extensión, sino porque sus aguas se emplean en el distrito de riego San Juan del Río, que abarca porciones de los municipios de Pedro Escobedo, Tequisquiapan y Amealco, así como el que le da su nombre.

El río Pánuco es un río mexicano que nace en la Altiplanicie Mexicana y forma parte del sistema hidrológico conocido como Tula-Moctezuma-Pánuco. Pánuco es el nombre que recibe en su curso bajo, desde Veracruz y Tamaulipas, donde finalmente desemboca cerca de la ciudad de Tampico. Es innavigable en la mayor parte de su longitud y también se trata de una de las cuencas más contaminadas de México, por la actividad industrial y petrolera que se desarrolla en sus orillas.

La cuenca del río panuco es una de las regiones hidrológicas más importantes del país, tanto por la superficie que ocupa 84,956 km², que la sitúa en cuarto lugar en la república mexicana, como por el volumen de sus escurrimientos que le confiere el quinto lugar a nivel nacional con 73,549 mm³ al año. Pertenece a la vertiente del Golfo de México y se localiza entre los 19° y 24 ° de latitud norte y los 97°45' y 101° 20' de longitud oeste.

Se encuentra limitada por las siguientes cuencas hidrológicas: al norte, la del río Soto la Marina y la región de El Salado; al oeste, la del Lerma; al sur, la del río Balsas y al este las de los ríos Tuxpan, Cazones y Tecolutla. La corriente principal de esta región, el río Pánuco, forma parte de una amplia red hidrográfica en la que, además, destacan los ríos Moctezuma y Tamesí. El Moctezuma principal afluente del Pánuco, tiene su origen en los ríos San Juan y Tula, que después de un recorrido de 174 km recibe tal denominación hasta la confluencia del río Tempoal. Después aquí hasta su desembocadura en el golfo de México, es conocido como río Pánuco.

Cubre parte de los siguientes estados: México, Hidalgo, Querétaro, Puebla, Veracruz, Guanajuato, San Luis Potosí, Tamaulipas y Nuevo León, así como el Distrito Federal, lugar donde el río, artificialmente tiene su origen; se integra con las sub-cuencas de sus afluentes, las del Río

Moctezuma, son las de los ríos: Extoras, San Juan Tula, Amajaque. Las subcuencas, se conforman con las microcuencas de los afluentes del río de la cuenca (Consejo del Sistema Veracruzano del Agua, 2002).

Por lo cual la zona de estudio de la sub-cuenca San Juan del Río se encuentre en la Región hidrológica número 26 con las siguientes características como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Características de la cuenca hidrológica del Pánuco (CONAGUA, SEMARNAT, 2012).

Características de la región hidrológica, 2010					
Nombre de región hidrológica	Extensión territorial continental (km ²)	Precipitación normal anual 1971-2000 (mm)	Escorrentamiento natural medio superficial interno (hm ³ /año)	Escorrentamiento natural medio superficial total (hm ³ /año)	Número de cuencas hidrológicas
26. Pánuco	96,989	892	20,330	20,330	77

Por lo cual el área de estudio donde se realizara la caracterización del agua para su propuesta de manejo es una sub-cuenca que se encuentra dentro de la cuenca del Panuco, llamada Sub-cuenca de San Juan del Río, el cual abarca los estados de Querétaro, Hidalgo y Estado de México. Dicha sub-cuenca en estudio (figura 10), en una superficie de 147,073.00 has que comprende los Municipios de San Juan del Río (34%), Pedro Escobedo (20%), Amealco de Bonfil (15%), Tequisquiapan (9%), Huimilpan (6%), El Marqués (6%), Colón (6%) y Querétaro (2%), y donde se asientan 423 localidades que albergan a una población de 285,158 habitantes que representan el 18% de la población del estado (Gabriel Vázquez Sánchez, 2010).

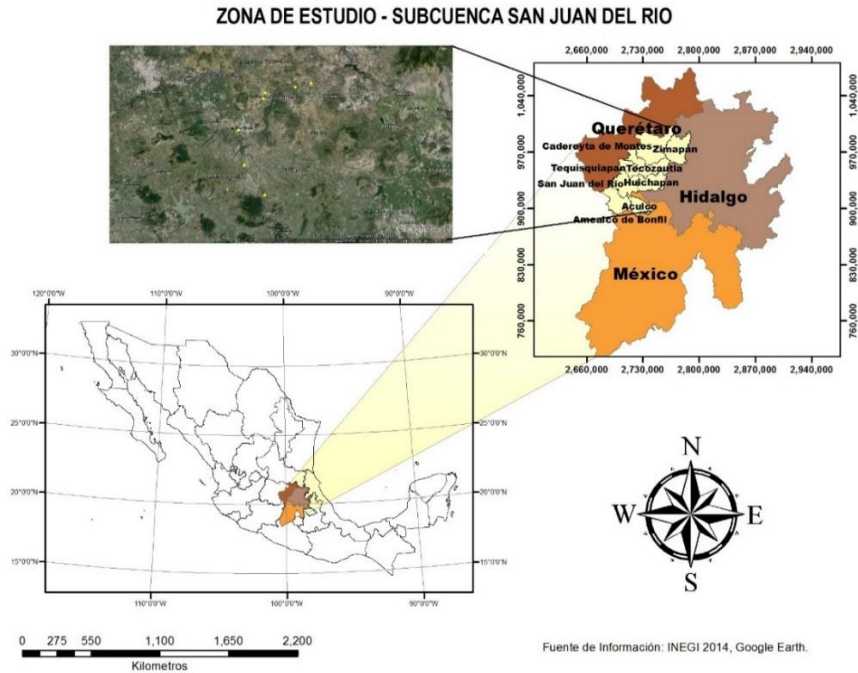


Figura 9. Localización de la zona de estudio.

La cuenca hidrográfica, definida en este proyecto es de tipo arreica, las cuencas de este tipo se caracterizan por presentar un drenaje superficial que se infiltra antes de encontrar un cuerpo colector.

El incremento en la demanda de agua para cubrir las crecientes necesidades humanas ha derivado en una problemática muy compleja en cuanto al uso y explotación del agua superficial y subterránea. Desde el punto de vista técnico, implica un reto; y desde el punto de vista social, económico y político, enfrenta grandes dificultades. Los volúmenes concesionados o asignados a los usuarios, se inscriben en el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA), agrupándose, para fines prácticos, en usos consuntivos (agrícola, abastecimiento público, industria autoabastecida y termoeléctricas) y no consuntivos (hidroeléctricas). En el ámbito nacional, el 63 % del agua para uso consuntivo proviene de fuentes superficiales (ríos, arroyos y lagos), y el resto de aguas subterráneas.

Uno de los retos más importantes para las administraciones de los distintos niveles es la necesidad de garantizar el derecho de todo ser humano a la vida, equilibrando entre el acceso al agua y el creciente costo económico que implica hacerla llegar a todos los individuos, independientemente de en dónde se encuentren. (Vázquez, 2011)

Es decir que la problemática del agua es originada por:

- a) Un déficit de conocimientos sobre el manejo sustentable de los cuerpos de agua;
- b) La medición deficiente de las condiciones actuales de los acuíferos y la falta de instrumentos adecuados de medición;
- c) La ausencia de políticas que favorezcan el cuidado de los cuerpos de agua
- d) Los inadecuados mecanismos de regulación de las concesiones para la agricultura, que no favorecen el ahorro del agua subterránea ni su uso eficiente
- e) La deficiente regulación del deterioro de la calidad de los cuerpos de agua
- f) Una normatividad inadecuada para la conservación de los ecosistemas acuáticos.

Los problemas mencionados se reflejan en las estadísticas presentadas por la CONAGUA (2007) mostrando que en tan sólo 56 años la disponibilidad per cápita en México haya cambiado de 18,035 m³/hab/año a 4,689 m³/hab/año. Ello muestra que aunque el agua suele considerarse como un recurso renovable, la gestión inadecuada y los problemas ya mencionados han provocado que se convierta en un bien escaso (García, 2013).

1.4.2 PROBLEMÁTICA DE LA SUB-CUENCA SAN JUAN DEL RÍO

El crecimiento del municipio de San Juan del Río, y en particular del área urbana, ha provocado cambios en el uso de suelo. Por otra parte, la dispersión en el crecimiento ha generado la aparición de predios vacíos que, sumados, conforman un área considerable, afectando la dotación de los servicios que requiere la ciudadanía e impactando negativamente su calidad de vida, lo que se evidencia en la baja densidad de población de la mancha urbana. Asimismo, la geometría que se aprecia de la ciudad indica que el crecimiento ha sido desordenado, con ausencia de una adecuada planeación enfocada hacia la eficiencia de la dotación de servicios. En cuanto a las condiciones hidrológicas del municipio, se aprecia una disminución en la capacidad de almacenamiento y regulación de los vasos que afecta la disponibilidad del líquido y que provoca que la mayor parte del agua utilizada provenga de fuentes subterráneas, incrementando la demanda sobre el acuífero, acelerando su abatimiento y encareciendo la extracción, que tiende hacia el agotamiento (Vázquez, 2011).

La contaminación de los cuerpos de agua es producto de las descargas de aguas residuales sin tratamiento, ya sea de tipo doméstico, industrial, agrícola, pecuario o minero. La sobreexplotación

de los acuíferos ha ocasionado también que la calidad del agua se haya deteriorado, sobre todo por intrusión salina y migración de agua fósil (las que de manera natural, después de siglos, contienen sales y minerales nocivos para la salud humana). La pérdida de ecosistemas y su biodiversidad constituyen una amenaza global que requiere a cada unidad de planeación ambiental asumir medidas para detener el deterioro y asegurar los servicios ambientales que sustenten su desarrollo.

El Valle de San Juan del Río constituye un importante polo de desarrollo para el Estado de Querétaro, cuyo crecimiento exponencial ha rebasado la capacidad de sus ecosistemas para proveer los insumos que su modelo de desarrollo requiere (Gabriel Vázquez Sánchez, 2010).

A continuación se enlistan la problemática presente en la Sub-cuenca San Juan del Río

- I. La Contaminación por descargas de aguas contaminadas de origen urbano e industrial
- II. Sobreexplotación del acuífero
- III. Falta de tratamiento de aguas residuales industriales
- IV. Contaminación por agroquímicos
- V. Contaminación por residuos peligrosos (biológicos infecciosos, aceites otras sustancias peligrosas)
- VI. Alto consumo de agua en el sector industrial, doméstico y agrícola (falta de eficiencia en el uso)
- VII. Falta de tratamiento de aguas residuales urbanas (habitacional, comercio y otros usos excepto industrial)
- VIII. Pérdidas den la red de distribución
- IX. Falta de aprovechamiento de agua de lluvia
- X. Contaminación de pozos
- XI. Contaminación por lixiviados provenientes de tiraderos
- XII. Contaminación de cuerpos de agua superficiales por residuos sólidos urbanos.
- XIII. Falta de recarga de los mantos acuíferos
- XIV. Azolve de presas, bordos y cuencas (San Juan del Río H. Ayuntamiento, 2013).

Es debido a estos factores que el uso racional del recurso agua, en la zona estudio es un reto fundamental e inminente, con el cual se debe producir la máxima riqueza con el volumen almacenado, además de dejar escurrir el gasto básico racional. Por otra parte, el monitoreo de la

calidad de los acuíferos es escaso y poco confiable. La eliminación de la vegetación disminuye la cantidad de agua de lluvia que se filtra para recargar los acuíferos, lo que ocasiona una mayor escorrentía superficial que, a su vez, arrastra el suelo fértil y lo deposita en lagos, ríos, lagunas y humedales, provocando su azolvamiento y alterando la calidad del agua, la morfología del cauce y los hábitats acuáticos. Cuando debido a lluvias torrenciales estas escorrentías son excesivas se producen inundaciones que seguramente podrían haberse amortiguado si existiese la vegetación original (Carabias, 2005).

Por lo tanto para conocer toda la morfología de la cuenca, queda definida por tres tipos de parámetros: Parámetros de forma, Parámetros de relieve y Parámetros relativos a la red hidrográfica, por lo que para caracterizar la cuenca y lograr comprender el comportamiento, forma, pendiente de la cuencas etc. Para una propuesta de manejo de cuenca necesitamos conocer los siguientes parámetros: área de la cuenca, perímetro, forma, curva hipsométrica etc. Las cuales se presentan a continuación.

1.5 DETERMINACIÓN DE PARAMETROS GEO-MORFOLOGICOS DE LA SUB-CUENCA SAN JUAN DEL RÍO.

Una de las herramientas más importantes en el análisis hídrico es la geo-morfometría de cuencas ya que nos permite establecer parámetros de evaluación del funcionamiento del sistema hidrológico de una región. Dicha herramienta puede servir también como análisis espacial ayudando en el manejo y planeación de los recursos naturales al permitirnos, en el marco de una unidad bien definida del paisaje, conocer diversos componentes como el tamaño de la cuenca, la red de drenaje, la pendiente media, el escurrimiento, etc. Dichos componentes pueden ser obtenidos y modelados mediante el uso de sistemas de información geográfica. Y, convenientemente combinados con la geomorfología, puede obtenerse un diagnóstico hidrológico útil para la planeación y gestión ambiental.

El objetivo de esta etapa es obtener y analizar los parámetros morfo-métricos de las sub-cuenca San Juan del Río. Este tipo de estudios puede ayudar a establecer las bases hidrológicas del análisis ambiental con miras a la planeación y ordenamiento.

Para la determinación de los parámetros geomorfológicos se aplicó un sistema de información geográfico llamado ArcGis versión 10 el cual es un sistema de información geográfica que está

diseñado para capturar, almacenar, visualizar, comunicar, transformar y archivar la información georreferenciada, es decir, la información con una ubicación de espacio específico. ArcGIS reemplazar el papel tradicionalmente desempeñado por la cartografía, e igualmente es capaz de manejar imágenes de información de los satélites, así como datos de los registros oficiales de datos estadísticos, climáticos etc., asociados a una localización espacial (Goodchild, 2005).

Los parámetros obtenidos fueron: el área de la cuenca, el orden de corrientes por cuenca, la densidad de drenaje, pendiente media del cauce principal, el tiempo de concentración. Otros parámetros y elementos fueron obtenidos como paso previo a la obtención de los ya mencionados pero que no son analizados debido a que están contenidos en los anteriores: red de drenaje, curvas de nivel, delimitación de las cuencas, ancho y largo de la cuenca.

Utilizando un modelo digital de elevación (MDE) el cual es una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, que permite caracterizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo. Estos valores están contenidos en un archivo de tipo raster con estructura regular, el cual se genera utilizando equipo de cómputo y software especializados. En los modelos digitales de elevación existen dos cualidades esenciales que son la exactitud y la resolución horizontal o grado de detalle digital de representación en formato digital (INEGI, 2015).

1.5.1 ÁREA DE LA CUENCA

Utilizando una herramienta de ArcGis para la obtención del área de la Sub-Cuenca San Juan del Río se calculó un área de 3,870.81 km² por lo tanto se logra clasificar como una cuenca “Grande”, conforme la siguiente tabla de tamaños de cuenca.

Tabla 2. Clasificación del tamaño de la cuenca.

Área (km²)	Descripción
<25	Muy pequeña
25 a 250	Pequeña
250 a 500	Intermedia-pequeña
500 a 2,500	Intermedia-grande
2,500 a 5,000	Grande
>5,000	Muy grande

1.5.2 FORMA DE LA CUENCA

También conocido por el nombre de Coeficiente de Gravelius o Compacidad, este coeficiente relaciona el perímetro de la cuenca con el perímetro de una cuenca teórica circular de igual área; estima por tanto la relación entre el ancho promedio del área de captación y la longitud de la cuenca.

Donde:

Cg = coeficiente de Gravelius

P = Perímetro de la cuenca en km

A = Superficie de la cuenca en km²

Los datos obtenidos de la Sub-Cuenca San Juan del Río son:

Perímetro, P= 556.037 km

Área, A= 3,870.81 km²

Y se sustituyen los datos en la fórmula siguiente (ec. 1) :

$$Cg = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} \dots Ec. 1$$

$$Cg = \frac{556.037 \text{ km}}{2\sqrt{\pi(3870.81 \text{ km}^2)}} = 2.5$$

Obteniendo este resultado el coeficiente de Gravelius se logra clasificar con la tabla 3 obteniendo así la forma de la cuenca:

Tabla 3. Clasificación de la forma de la cuenca.

Coeficiente de Gravelius (Cg)	Forma
1.00-1.25	Redonda
1.25-1.50	Ovalada
1.50-1.75	Oblonga

Por lo tanto clasificándola forma de la cuenca se logra englobar con una forma Oblonga de tal manera que la cuenca tiene la siguiente forma, como se muestra en la figura 11. Con el valor del coeficiente de compacidad de 2.5 podemos concluir que si Cg>1, la cuenca es alargada y/o simétrica. De esta manera la cuenca no tiende a ser circular; por lo tanto no es propensa a

presentar crecidas súbitas, cuando se presentan lluvias intensas simultáneamente en toda o en gran parte de su superficie.

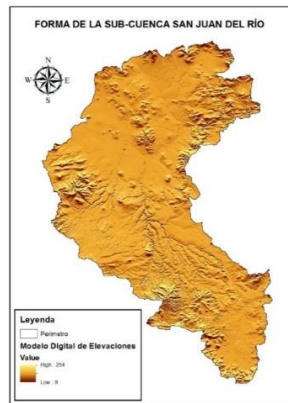


Figura 10. Forma (oblonga) de la Sub-Cuenca San Juan del Río.

1.5.3 RELACIÓN DE ELONGACIÓN

Es un parámetro que compara la cuenca con el círculo (Re). Para obtener el valor de Re se aplica la fórmula de la ecuación 2 :

$$Re = 1.128 \frac{\sqrt{A}}{Le} \quad \dots Ec. 2$$

Donde:

A = Área de la cuenca, en km^2 .

Le = Dimensión más grande desde la salida hasta la divisoria en línea recta y paralela al cauce principal de área A , en km .

Aplicando la formula entendemos que:

$$A = 3870.81 \text{ km}^2$$

$$Le = 102.403 \text{ km}$$

Sustituyendo valores:

$$Re = 1.128 \frac{\sqrt{3870.81 \text{ km}^2}}{102.403 \text{ km}} = 0.8$$

Por lo tanto si $Re < 0.8$ obtenemos un cuenca alargada. Confirmando de esta manera la forma de la cuenca presente en la figura 11.

1.5.4 RED DE HIDROGRÁFICA

Se le llama red hidrográfica al drenaje natural, permanente o temporal, por el que fluyen las aguas de los escurrimientos superficiales. La red de drenaje de una cuenca, se refiere a las trayectorias o al arreglo que guardan entre sí, los cauces de las corrientes naturales dentro de ella. Es otra característica importante en el estudio de una cuenca, ya que manifiesta la eficiencia del sistema de drenaje en el escurrimiento resultante, es decir, la rapidez con que desaloja la cantidad de agua que recibe. La forma de drenaje, proporciona también indicios de las condiciones del suelo y de la superficie de la cuenca (Global Water Partnership South America, 2011). En la figura 12, la zona de estudio cuenta con un patrón de drenaje dentrítico, que nos indica que son suelos homogéneos, rocas sedimentarias blandas y tobas volcánicas.

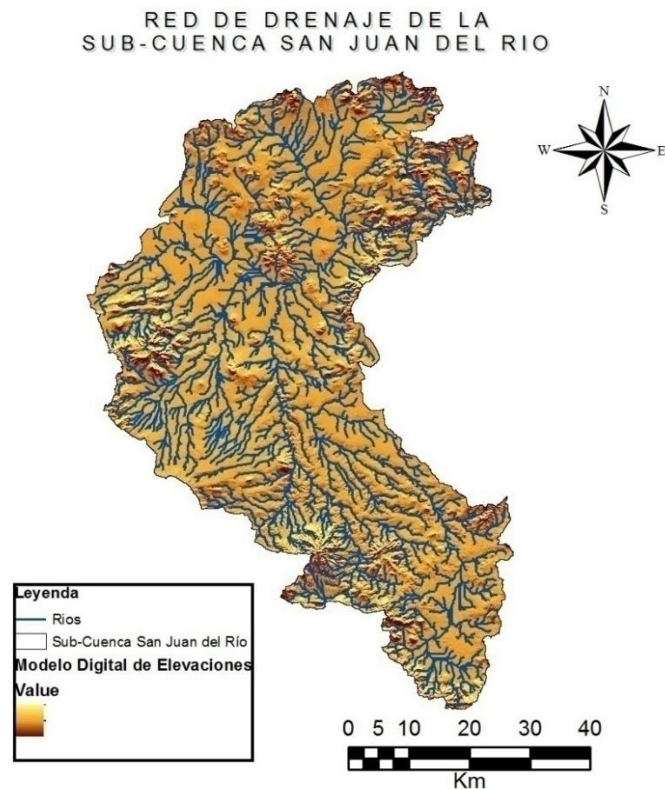


Figura 11. Red de drenaje dentrítico.

1.5.5 DENSIDAD DE DRENAJE

La densidad de drenaje (Dd) está definida, para una cuenca dada, como la longitud media de curso por unidad de superficie presenta en la ecuación 3:

$$Dd = \frac{\sum Li}{A} \dots Ec. 3$$

Obteniendo como datos:

Densidad de Drenaje, Dd

Área, A= 3870.81 km²

Sumatoria de las longitudes de los cauces, $\sum Li = 3526.28$ km

$$Dd = \frac{\sum Li}{A} = \frac{3526.28 \text{ km}}{3870.81 \text{ km}^2} = 0.91 \text{ km/km}^2$$

La densidad de drenaje varía inversamente con la extensión de la cuenca. Con el fin de catalogar una cuenca bien o mal drenada, analizando su densidad de drenaje, se puede considerar que valores de Dd próximos a 0.5 km/km² o mayores indican la eficiencia de la red de drenaje. Clasificando la Dd como en la tabla 4. Debido a esta clasificación la sub-cuenca de San Juan del Río tiene una densidad de drenaje baja.

Tabla 4. Clases de densidad de drenaje (Instituto Nacional de Ecología , 2004).

Rango de densidad (km/km^2)	Clases
1-1.8	Baja
1.9-3.6	Moderada
3.7-5.6	Alta

1.5.6 DENSIDAD DE CORRIENTE

La densidad de corriente (Dc) (ecuación 4), es la relación entre el número total de corrientes en la cuenca y su área total.

Dc= Densidad de corriente

Nc= Suma de las corrientes

A= Superficie de la cuenca

$$D_c = \frac{Nc}{A} \dots Ec. 4$$

Datos obtenidos en la zona de estudio

Nc= 5,694 No. De corrientes

A= 3870.81 km²

$$D_c = \frac{5,694}{3,870.81} = 1.47 \text{ corrientes/km}^2$$

La zona de estudio tiene un gradiente de altitud de Sur a Norte, así que de manera general, los ríos y arroyos fluyen de Sur a Norte. Por la propia configuración de los terrenos, la zona Sur presenta numerosos arroyos que conducen agua sólo durante la época de lluvias.

1.5.7 PENDIENTE MEDIA DE LA CUENCA

Se refiere al grado de inclinación del terreno expresado en porcentaje; los rangos de pendientes son variables dentro de una región o cuenca hidrográfica. La pendiente media de la cuenca se calculó con el método cartográfico con la ayuda de un Sistema de Información Geográfica (SIG) Arc/Info, a partir de información de curvas de nivel, mediante el comando de "slope" (pendiente) obteniendo un valor de pendiente media de la cuenca de 10.88 %. Clasificando la zona de estudio tenemos una cuenca con una pendiente casi plana.

Tabla 5. Clasificación de la cuenca utilizando la pendiente media (Instituto Nacional de Ecología , 2004).

Rango	Clasificación
0-3	Muy plano
3-7	Plano
7-12	Casi plano
12-25	Ondulado
25-50	Muy ondulado
50-75	Escarpado
>75	Muy escarpado

1.5.8 CURVA HIPSOMÉTRICA

Se define como curva hipsométrica a la representación gráfica del relieve medio de la cuenca, construida llevando en el eje de las abscisas, longitudes proporcionales a las superficies proyectadas en la cuenca, en km^2 , comprendidas entre curvas de nivel consecutivas hasta alcanzar la superficie total, llevando al eje de las ordenadas la cota de las curvas de nivel.

Por lo cual dependiendo de la forma de la curva hipsométrica se clasifica a la cuenca en tres tipos (figura 13):

Tipo A: Cuenca geológicamente nueva (meseta)

Tipo B: Cuenca geológicamente madura (pie de montaña).

Tipo C: Cuenca erosionada (valle).

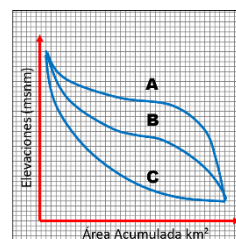


Figura 12. Clasificación de curva Hipsométrica según su forma.

La función hipsométrica es una forma conveniente y objetiva de describir la relación entre la propiedad altimétrica de la cuenca en un plano y su elevación. Es posible convertir la curva hipsométrica en función adimensional usando en lugar de valores totales en los ejes, valores relativos: dividiendo la altura y el área por sus respectivos valores máximos.

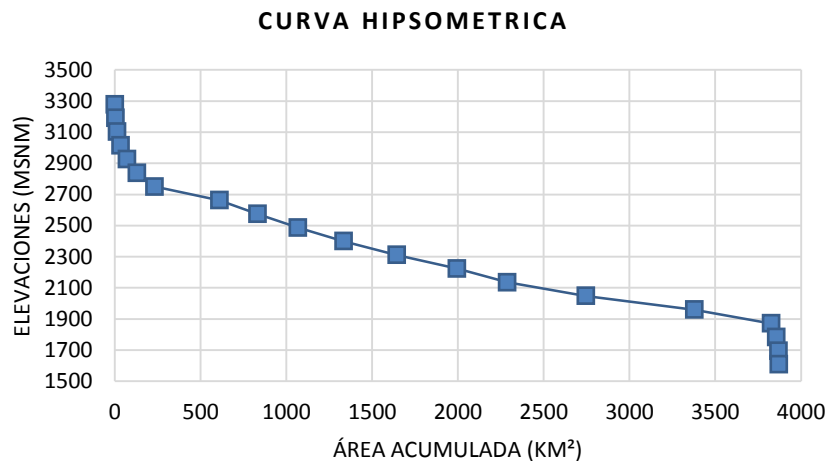
Así que para obtener la curva hipsométrica en la zona de estudio obtuvimos la siguiente tabla de valores:

Tabla 6. Valores para la obtención de la curva hipsométrica

Cotas (elevación)		Promedio de Elevaciones (msnm)	Área entre curva de nivel (Km^2)	Área acumulada	VOL ($\text{Km}^2 \cdot \text{msnm}$)
Mínima	Máxima				
3235.00	3322.00	3278.50	0.77	0.77	2540.64
3147.00	3234.00	3190.50	4.20	4.97	13389.28
3058.75	3146.00	3102.38	8.98	13.95	27863.08
2971.00	3058.00	3014.50	20.32	34.27	61243.79
2883.00	2970.00	2926.50	37.26	71.53	109047.24
2795.00	2882.00	2838.50	57.35	128.89	162800.46
2707.00	2794.00	2750.50	103.12	232.01	283642.56
2619.00	2706.25	2662.63	377.68	609.69	1005630.86
2531.00	2618.00	2574.50	223.47	833.17	575333.81
2443.33	2530.00	2486.67	233.77	1066.93	581295.24
2355.29	2443.00	2399.15	266.59	1333.52	639592.86

2267.33	2355.00	2311.17	309.72	1643.24	715807.09
2179.57	2267.17	2223.37	350.43	1993.67	779140.00
2092.00	2179.00	2135.50	294.14	2287.82	628140.24
2004.00	2091.38	2047.69	458.36	2746.18	938581.24
1916.00	2003.50	1959.75	632.01	3378.19	1238585.52
1828.00	1915.00	1871.50	448.23	3826.42	838869.93
1740.00	1827.00	1783.50	30.13	3856.55	53735.25
1652.00	1739.00	1695.50	12.11	3868.66	20526.23
1564.00	1651.86	1607.93	2.24	3870.90	3601.47
		Suma	3870.90		8679366.81

Grificando los valores de elevación promedio vs área acumulada obtenemos:



Gráfica 1. Curva hipsométrica de la zona de la subcuenca San Juan del Río.

Por lo tanto se logra concluir que en la zona de estudio tenemos una curva hipsométrica tipo B, lo que significa que es, geológicamente madura (pie de montaña), es decir que se encuentra en su fase de madurez o etapa de equilibrio, donde las formas de relieve ya no serían tan acusadas, sino más redondeadas, de modo que sólo los puntos más altos serían testigos de la primitiva altiplanicie, Además, los ríos que se establecen adoptan una disposición subsecuente, perpendiculares a los ríos principales discurriendo por las zonas más débiles o fracturadas, no dependiendo únicamente de la litología.

1.5.9 ELEVACIÓN MEDIA DE LA CUENCA

Representa a la elevación que en promedio tienen los puntos de la superficie de la cuenca. Su conocimiento permite estimar algunas características de precipitación o temperatura en la cuenca.

La cual se calcula de la siguiente manera de la ecuación 5:

$$h^- = \frac{(\text{VOL (Km}^2 \cdot \text{msnm)})}{A} = \frac{\text{equidistancia de curvas de nivel}}{\text{área}} \quad \dots \text{Ec. 5}$$

Por lo cual obtuvimos los siguientes resultados

$$h^- = \frac{8,679,366.81 \text{ km}^2 \cdot \text{msnm}}{3,870.90 \text{ msnm}} = 2,242.21 \text{ km}^2$$

1.5.10 ELEVACIÓN MEDIANA DE LA CUENCA

La elevación mediana se obtiene con la curva hipsométrica, señalando la mitad del área acumulada y proyectando a que elevación se proyecta, por lo cual en la zona de estudio obtenemos una elevación mediana de 2290 msnm, como se muestra en la figura 14.

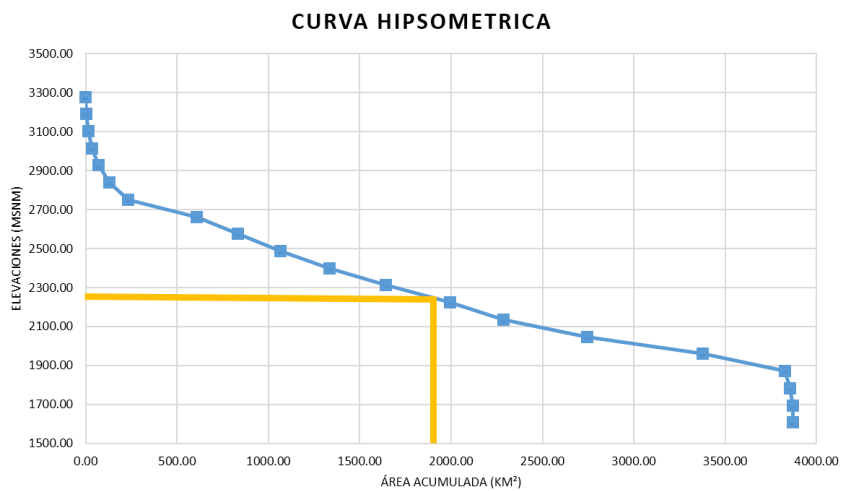


Figura 13. Elevación mediana

1.5.11 PENDIENTE DEL CAUCE PRINCIPAL

Se obtiene con la siguiente formula (ecuación 6):

$$S = \frac{H}{L} \dots Ec. 6$$

Donde S= la pendiente del cauce principal

H= Diferencia de elevaciones

L= Largo del Cauce Principal (m)

Sustituyendo valores obtenemos para la cuenca en estudio:

$$S = \frac{H}{L} = \frac{3,322 - ,1564}{143,300.645} = 0.0122 \times 100 = 1.22 \%$$

Con el valor obtenido de la pendiente del cauce principal de 0.0122 lo multiplicamos por 100 para obtener su porcentaje teniendo por lo que el resultado final es de 1.22 y se clasifica como en la siguiente tabla 6.

Tabla 7. Clasificación de la pendiente del cauce principal

Pendiente (%)	Tipo de Terreno
2	Llano
5	Suave
10	Accidentado Medio
15	Accidentado
25	Fuertemente Accidentado
50	Escarpado
>50	Muy escarpado

Con el valor obtenido de la pendiente de cauce principal en la zona de estudio se clasifica en el tipo de terreno "llano" lo cual, es un espacio geográfico con poca o ninguna variación en la altitud de la superficie o terreno con respecto al nivel del mar. Se formaron por acumulación de sedimentos traídos por el viento, los ríos y el mar, que depositaron en zonas bajas aprovechadas, por ejemplo, para la práctica de la agricultura.

1.5.12 PERFIL DEL CAUCE PRINCIPAL

A continuación se presenta de manera gráfica el comportamiento del cauce principal, es decir, se representan los kilómetros del cauce con sus elevaciones correspondientes (figura 15).

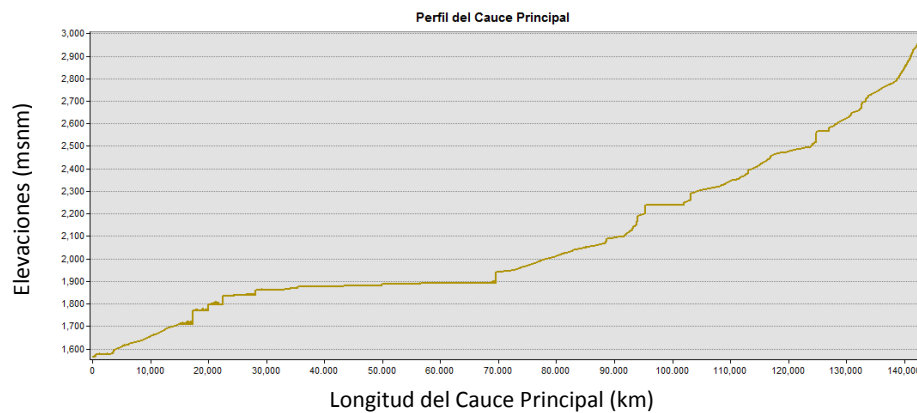


Figura 14. Representación del cauce principal (Elevaciones vs Longitud del cauce).

A continuación (figura 16), se presenta en imagen el cauce principal de la zona de estudio.



Figura 15. Mapa de cauce principal

1.6 TIEMPO DE CONCENTRACIÓN

El tiempo de concentración (T_c), se define como el tiempo que requiere un volumen unitario de agua para viajar desde el punto hidráulicamente más alejado de la cuenca al punto de interés o salida. Por lo cual existen varias y diferentes formas para calcularlo, de tal manera que se

utilizaron dos tipos diferentes de fórmulas; Kirpich y California Highways and Public Works, los cuales se presentan a continuación:

1.6.1 FÓRMULA DE KIRPICH

Válida para $T_c < 40$ horas,

$$T_c = 0.39 \left(\frac{L^2}{S} \right) \dots Ec. 7$$

T_c = tiempo de concentración, en hr.

L = longitud del cauce principal, en km.

S = pendiente del cauce principal (en porcentaje).

Aplicando la fórmula obtenemos el siguiente tiempo de concentración, para la zona de estudio:

T_c = tiempo de concentración, en hr.

$L = 143.30$ km

$S = 1.22$ %

Sustituyendo en la fórmula

$$T_c = 0.39 \left(\frac{(143.30 \text{ km})^2}{1.22} \right)^{0.385} = 16.52 \text{ hR.}$$

1.6.2 FÓRMULA DE CALIFORNIA HIGHWAYS AND PUBLIC WORKS

Para confirmar el resultado obtenido con la fórmula de Kirpich, utilizamos la fórmula de California Highways and Public Works, que es la siguiente:

$$T_c = \left(\frac{0.8708 * L^3}{H} \right)^{0.385} \dots Ec. 8$$

Donde:

t_c = Tiempo de concentración, en hr.

L = Longitud del cauce principal, en km.

H = Desnivel, en m

Sustituyendo datos obtenemos que:

$L = 143.30$ km.

$H = (3322 - 1564) = 1758$ m

Aplicando la fórmula de California Highways and public Works tenemos como resultado:

$$T_c = \left(\frac{0.8708 * 143.30^3}{1758} \right)^{0.385} = 16.51 \text{ hrs.}$$

Comparando valores del tiempo de concentración obtenido con las diferentes fórmulas podemos concluir que el tiempo de concentración promedio es de 16.515 hr.

1.7 CLIMA

La zona de estudio presenta 2 tipos de climas de acuerdo con los criterios de Koppen (modificados por García 1973): los climas secos (BS1kw) y semisecos (BS1hw) en el norte, con precipitaciones de entre 250-500 mm, y los templados subhúmedos en la parte sur de la cuenca (figura 17), que son estables ya que su régimen térmico medio anual varía de 12° a 18 °C y sus precipitaciones más abundantes se registran en verano. El grado de humedad aumenta conforme se avanza hacia el sur, y la precipitación anual oscila entre 600 y 860 mm. La escasez de agua es uno de los principales problemas que afectan a las regiones áridas.

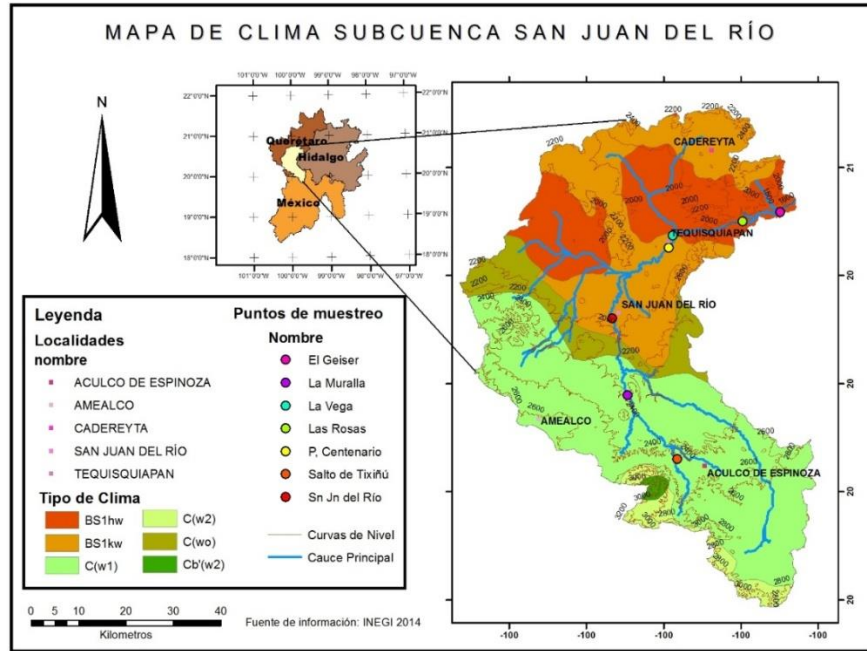


Figura 16. Mapa de Clima Sub-Cuenca San Juan del Río.

La subdivisión y descripción de los climas presentes en la Sub-Cuenca San Juan del Río se representan en la siguiente tabla 8:

Tabla 8. Clasificación de los climas presentes en la zona de estudio.

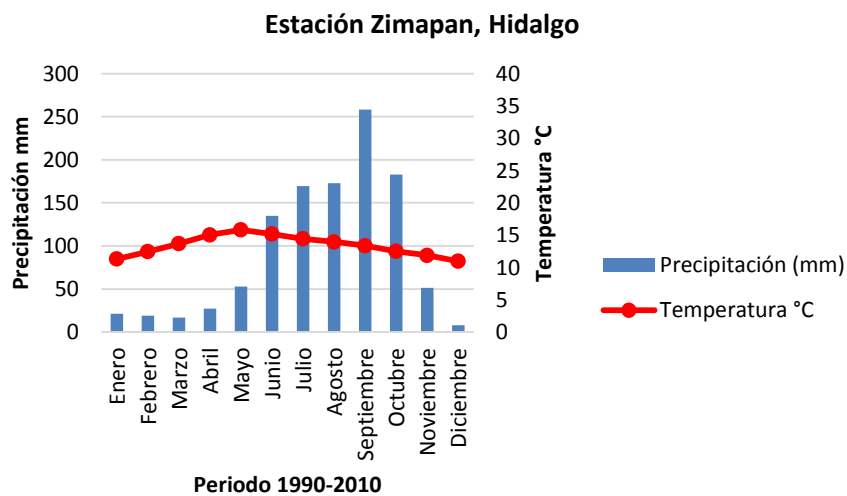
Tipo de Clima	Descripción
BS1KW	Semiárido, templado, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C, temperatura del mes más caliente menor de 22°C.
BS1HW	Semiárido, semicálido, temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C.
C(WO)	Templado, subhúmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente bajo 22°C.
C(W1)	Templado, subhúmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente bajo 22°C.
C(W2)	Templado, subhúmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente bajo 22°C.
CB'(W2)	Semifrío, subhúmedo con verano fresco largo, temperatura media anual entre 5°C y 12°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C, temperatura del mes más caliente bajo 22°C.

Para comprender de mejor forma el tipo de clima presente en la zona de estudio se realizaron climogramas, con los datos meteorológicos en los tres principales municipios que abarca la subcuenca en la zonas alta (Aculco), media (San Juan del Río) y baja (Zimapan).

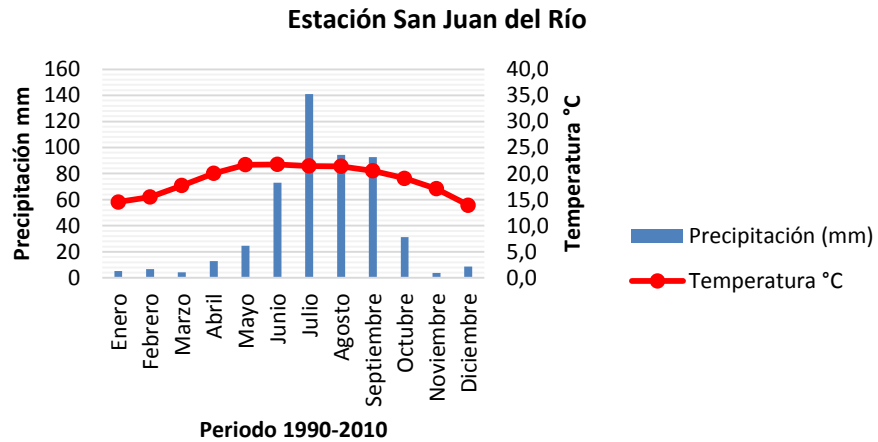
1.7.1 CLIMOGRAMAS

Un climograma, es un gráfico en el que se representan simultáneamente los valores de temperatura media mensual, mediante una línea, y los de precipitaciones mensuales medias, mediante barras verticales, para los doce meses del año (Ciencia, 2004). Se seleccionaron los valores de precipitación y temperatura máxima y mínima para obtener un promedio y colocarlos en manera de graficas de las estaciones meteorológicas al inicio de la cuenca (zona sur), a la mitad (zona media) y al final (zona norte) para tener un conocimiento más preciso de los tipos de clima con que cuenta la subcuenca hidrográfica, los cuales son las estaciones: Aculco en el estado de México, San Juan del Río en Querétaro, y Zimapán en el estado de Hidalgo, respectivamente, debido a que la zona de estudio se encuentre en tres diferentes estado de México por lo cual se decidió a realizar unos climogramas para determinar correctamente el clima de la zona de estudio.

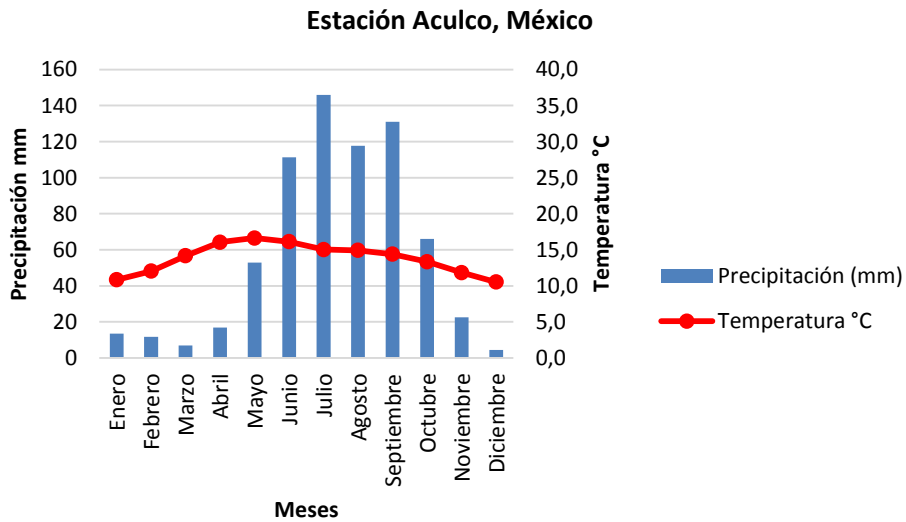
A continuación se presentan los climogramas obtenidos para cada estación con datos obtenidos de CONAGUA [58]:



Gráfica 2. Climograma de la estación de Zimapán, en el estado de Hidalgo, parte norte de la cuenca.



Gráfica 3. Climograma de la estación de San Juan del Río en el estado de Querétaro, parte media de la cuenca.



Gráfica 4. Climograma de la estación Aculco en el estado de México, parte sur de la cuenca.

De tal manera que se concluye que los climas con los que cuenta en la zona de estudio, semiárido, templado y semifrío, confirmando los tipos de climas que se determinaron en el mapa de climas, el cual fue realizado utilizando un sistema de información geográfica.

1.8 VEGETACIÓN Y USO DE SUELO

La sub-cuenca San Juan del Río cuenta con agricultura de riego eventual y riego temporal como por ejemplo: cebada, avena forrajera, cebolla, ajo, lenteja, zanahoria, lechuga, y los del ciclo primavera-verano, maíz, sorgo, frijol, chile, tomate, jitomate, brócoli, lechuga, calabacita, pepino, y otras hortalizas. En perennes se establecen principalmente los cultivos de alfalfa, y durazno, también cuenta con bosque de encino, bosque pino encino, matorral crasicaule, matorral subtropical, pastizal y pastizal inducido. Como se muestra en la figura 18, de vegetación de la zona de estudio.

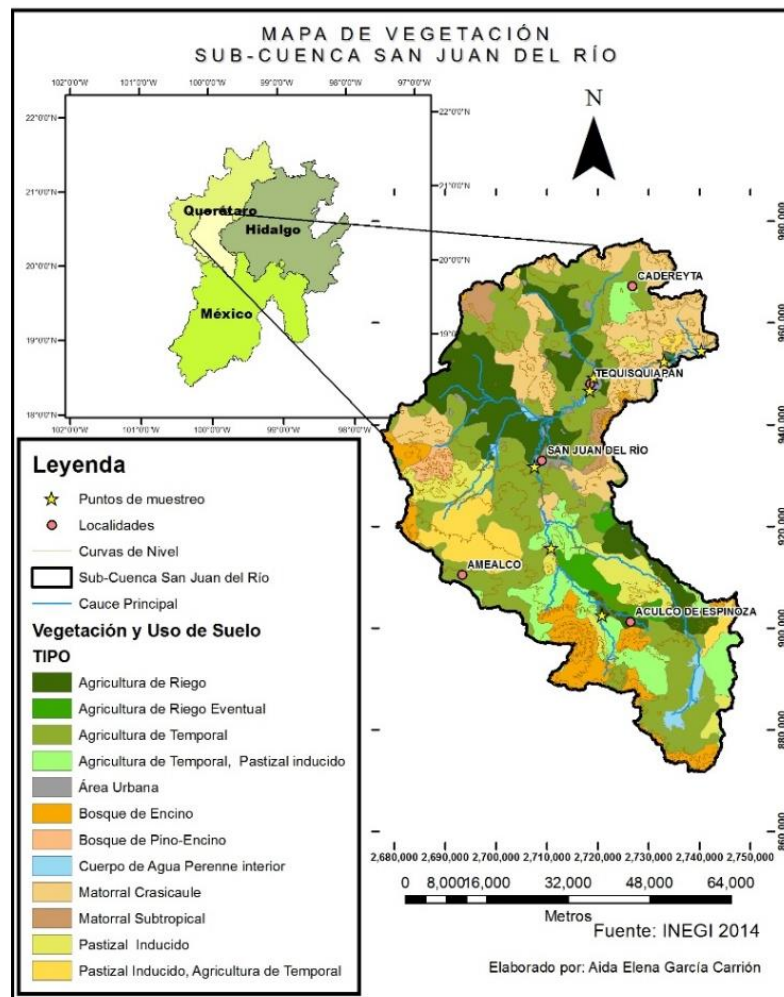


Figura 17. Vegetación de la zona de estudio.

Es así que en la zona de estudio, históricamente han cambiado grandes extensiones de áreas antes cubiertas con ecosistemas naturales por parcelas agrícolas, potreros, y más recientemente por zonas urbanas, industriales y comerciales.

Es importante diferenciar lo que es la flora; que es el conjunto de especies y variedades de plantas de un territorio dado. Y la vegetación que es el conjunto que resulta de la disposición en el espacio de los diferentes tipos de vegetales presentes en una porción del territorio.

La vegetación juega un papel indiscutible en la regulación del ciclo hidrológico. Es de vital importancia en la tasa de evapotranspiración, la interceptación de la lluvia y en el control de la cantidad de escorrentía, pérdida de suelo (protección del suelo) y la tasa de infiltración. La vegetación es el principal factor (y a veces el único) que puede manipularse por medio de estrategias de manejo.

1.9 EDAFOLOGÍA

La zona de estudio de la sub-cuenca San Juan del Río cuenta con los siguientes tipos de suelo que se describen a continuación en la tabla 9:

Tabla 9. Descripción de tipos de suelos en la sub-cuenca San Juan del Río (INEGI, 2004).

Tipo de suelo	Descripción
Cambisol	Del latín Cambiare: cambiar. Textualmente, suelo que cambia. Estos suelos son jóvenes, poco desarrollados y se pueden encontrar en cualquier tipo de vegetación o clima excepto en los de zonas áridas. Se caracterizan por presentar en el subsuelo una capa con terrones que presentan vestigios del tipo de roca subyacente y que además puede tener pequeñas acumulaciones de arcilla, carbonato de calcio, fierro o manganeso. Son muy abundantes, se destinan a muchos usos y sus rendimientos son variables pues dependen del clima donde se encuentre el suelo. Son de moderada a alta susceptibilidad a la erosión. Su símbolo es (B).
Feozem	Del griego phaea: pardo; y del ruso zemlja: tierra. Literalmente, tierra parda. Suelos que se pueden presentar en cualquier tipo de relieve y clima, excepto en regiones tropicales lluviosas o zonas muy desérticas. Es el cuarto tipo de suelo más abundante del país. Se caracteriza por tener una capa superficial oscura, suave, rica en materia orgánica y en nutrientes. Los feozems son de profundidad muy variable.

	<p>Cuando son profundos se encuentran generalmente en terrenos planos y se utilizan para la agricultura de riego o temporal, de granos, legumbres u hortalizas, con rendimientos altos. Pueden utilizarse para el pastoreo o la ganadería con resultados aceptables. Su simbología en la carta edafológica es (H).</p>
Litosol	<p>Del griego lithos, que significa piedra. Concretamente, suelo de piedra. Son los suelos más abundantes del país ocupan 22 de cada 100 hectáreas del suelo. Se encuentran en todos los climas y con muy diversos tipos de vegetación, en todas las sierras de México, barrancas, lomeríos y en algunos terrenos planos. Se caracterizan por su profundidad menos de 10 cm, limitada por la presencia de roca, tepetate o caliche endurecido. Su fertilidad natural y la susceptibilidad a la erosión son muy variable dependiendo de otros factores ambientales. El uso de estos suelos depende principalmente de la vegetación que los cubre. En matorrales o pastizales se puede llevar a cabo un pastoreo más o menos limitado y en algunos casos se destina a la agricultura, en especial al cultivo de maíz o el nopal, condicionando a la presencia de suficiente agua. Su símbolo es (I).</p>
Luvisol	<p>Del latín luvi, luo, el cual es lavar. Por lo cual es suelo con acumulación de arcilla. Son suelos que se encuentran en zonas templadas o tropicales lluviosas. La vegetación generalmente de bosque o selva se caracteriza por tener un enriquecimiento de arcilla en el subsuelo. Son frecuentemente rojos o amarillentos, aunque también presentan tonos pardos, que no llegan a ser oscuros. Se destinan principalmente a la agricultura con rendimientos moderados. En algunos cultivos de café y frutales en zonas tropicales, de aguacate en zonas templadas, donde registran rendimientos muy favorables, con pastizales cultivados o inducidos pueden dar buenas utilidades en la ganadería. Los aserraderos más importantes del país se encuentran en zonas de Luvisoles, sin embargo, debe tenerse en cuenta que son suelos con alta susceptibilidad a la erosión. En México 4 de 100 hectáreas está ocupada por luvisoles. El símbolo para su representación cartográfica es (L).</p>
Planosol	<p>Del latín planus: plano, llano. Indicador de suelos generalmente desarrollados en relieves planos que en alguna parte del año se inundan en su superficie. Son medianamente profundos en su mayoría, entre 50 y 100 cm, se encuentran principalmente en los climas templados y semiáridos de México. Su vegetación natural es de pastizal o matorral. Se caracteriza por presentar debajo de la capa más superficial, una capa infértil y relativamente delgada de un material claro, que las capas que lo cubren, como las capas que la subyacen. Debajo de esta capa se presenta un subsuelo muy arcilloso, o bien, roca o tepetate, todos impermeables. En el centro de México, como en la zona de estudio, se utilizan con rendimientos moderados en la ganadería de bovinos, ovinos y caprinos. Son muy susceptibles a la erosión, sobre todo en las capas superficiales. El símbolo para su representación cartográfica es (W).</p>
Vertisol	<p>Del latín vertere, volter. Literalmente, suelo que se revuelve o que se voltea. Son suelos de climas templados y cálidos, especialmente de zonas con una marcada estación seca y otra lluviosa. La vegetación natural va de pastizales y matorrales. Su color más común es el negro o gris oscuro en la zona centro a oriente del país. Su uso agrícola es muy extenso, variado y productivo. Son muy fértiles pero se</p>

produce la mayor parte de caña, cereales, hortalizas y algodón. Tienen baja susceptibilidad a la erosión y alto riesgo de salinización. Su símbolo es (V).

El siguiente mapa a continuación (Figura 19) muestra la organización de los diferentes tipos de suelos en la sub-cuenca San Juan del Río.

MAPA DE TIPO DE SUELO SUB-CUENCA SAN JUAN DEL RÍO

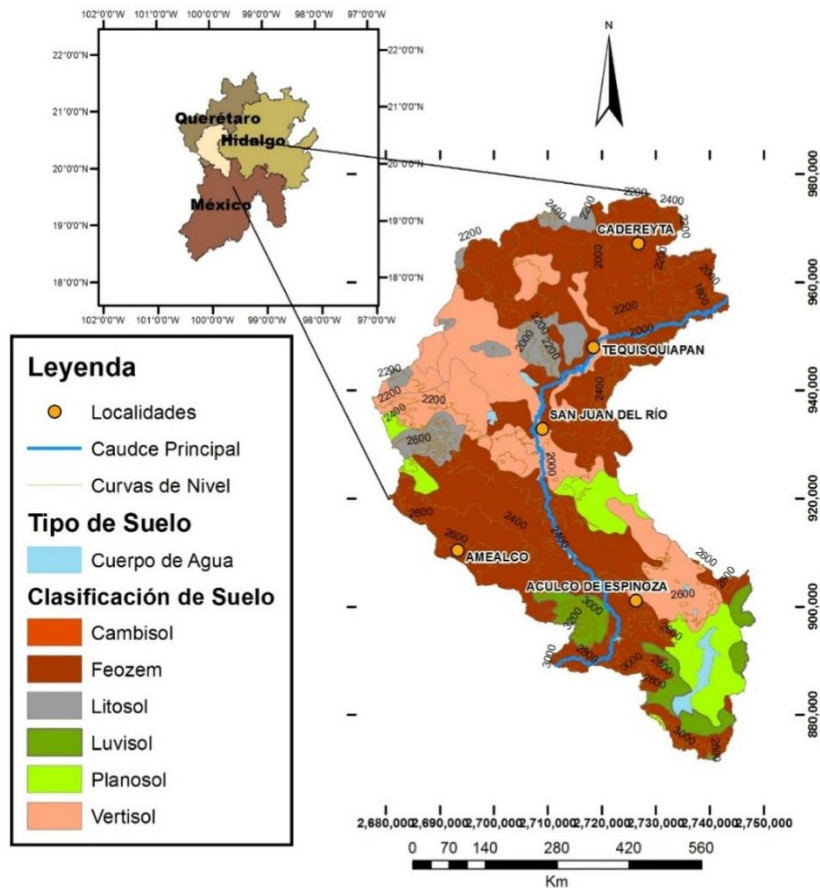


Figura 18. Clasificación del tipo de suelo en la Sub-cuenca San Juan del Río.

1.10 ESCORRENTÍA

La escorrentía superficial describe el flujo del agua, lluvia, nieve, u otras fuentes, sobre la tierra, y es un componente principal del ciclo del agua. A la escorrentía que ocurre en la superficie antes de alcanzar un canal se le llama fuente no puntual. Si una fuente no puntual contiene contaminantes artificiales, se le llama contaminación de fuente no puntual. Al área de tierra que produce el

drenaje de la escorrentía a un punto común se la conoce como línea divisoria de aguas. Cuando la escorrentía fluye a lo largo de la tierra, puede recoger contaminantes del suelo, como petróleo, pesticidas (en especial herbicidas e insecticidas), o fertilizantes.

La escorrentía superficial es la parte de la precipitación que se escapa de la infiltración y de la evapotranspiración y que, consecuentemente, circula por la superficie (arroyamiento en superficie). La escorrentía en sentido amplio es la circulación de agua producida en un cauce superficial, la distinción es importante porque la escorrentía consta de varios componentes, debido a que tiene distintas aportaciones; por lo que el caudal de una red de drenaje, en un momento dado procede de:

- Arroyamiento en superficie (escorrentía superficial)
- Precipitación sobre el propio cauce (a veces es más importante que la primera)
- Flujo hipodérmico. Es una parte de la precipitación que no circula en superficie pero tampoco se infiltra en el suelo, sino que circula pendiente abajo en el suelo a ligera profundidad.

El funcionamiento de la cuenca se asemeja al de un colector que recibe la precipitación pluvial y la convierte en escorrentía. Esta transformación se hace con pérdidas de agua, en función de las condiciones climatológicas y de las características físicas de la cuenca.

Para el cálculo de la escorrentía se realizó un modelo computacional, para calcular el coeficiente de escorrentía que se basa en la tabla 10 de Prevert donde se muestran los valores del coeficiente de escorrentía que se han obtenido a partir de parcelas experimentales.

Tabla 10. Tabla de Prevert (Sara Ibáñez Asensio, 2005).

Uso de suelo	Pendiente (%)	Textura de suelo (%)		
		Gruesa	Media	Fina
Bosque	0-5	0.10	0.30	0.40
	5-10	0.25	0.35	0.50
	10-30	0.30	0.40	0.60
	>30	0.32	0.42	0.63
Pastizal	0-5	0.15	0.35	0.45
	5-10	0.30	0.40	0.55
	10-30	0.35	0.45	0.65
	>30	0.37	0.47	0.68
Agricultura	0-5	0.30	0.50	0.60
	5-10	0.40	0.66	0.70

	10-30	0.50	0.70	0.80
	>30	0.53	0.74	0.84

En el cual utilizando la herramienta computacional de ArcMap, realizamos, la pendiente (slope), la reclasificación de la vegetación, reclasificación de la pendiente, mapa de textura del suelo esto nos sirve para calcular la escorrentía en los periodos secos y de lluvia de año 2013 y 2014 (DISC, 2014).

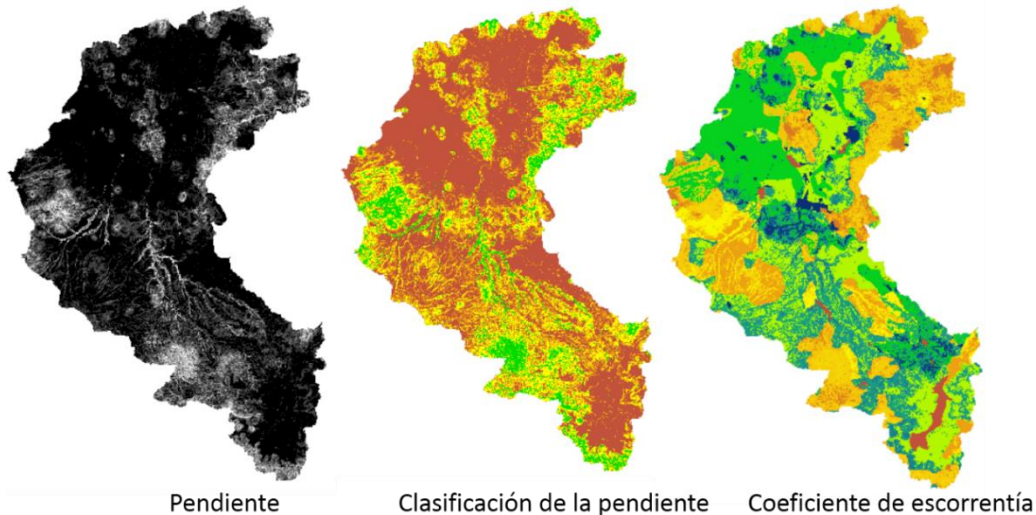


Figura 19. Mapas necesarios para la obtención del cálculo de escorrentía. (NASA, 2014)

La figura 20 muestra los diferentes mapas procesados para obtener un mapa final con valores de clasificación de pendientes, textura del suelo y tipo de vegetación, teniendo como resultado un mapa con coeficientes de escorrentía con sus respectivos valores. Posteriormente se pasó a procesar datos de intensidad de lluvia obtenidos de Tropical Rainfall Measuring Mission, por lo que se realizó un cálculo del volumen medio escurrido.

La escorrentía es la parte de la precipitación que llega a la red hidrográfica de la cuenca y escurre por ella dando lugar a los caudales líquidos. Para poder estimar la escorrentía, se recurre al método racional modificado, el cual consiste en la siguiente fórmula (ecuación 9):

$$VM = C * A * PM \dots Ec. 9$$

Siendo:

C: coeficiente de escurrimiento (%)

A: área en (Km²)

PM: Precipitación Media (m)

El cálculo del volumen medio escurrido involucra efectuar la operación algebraica anterior a nivel de “capas de información geográfica” obteniendo como resultado mapa de escorrentía para la sub-cuenca San Juan del Río en periodo de seco (junio 2013 y 2014) y otro de lluvias (meses junio y noviembre). Obteniendo como resultados una escorrentía de 869,000.0 mm/mes en el periodo de lluvias y una escorrentía de 67,263.5 mm/mes en los meses de periodo seco.

El principal mecanismo de generación de escurrimiento en ambientes semi-áridos como el presente en la zona de estudio, ocurre cuando la intensidad de la lluvia excede la tasa de infiltración. Los ambientes semi-áridos se caracterizan por una distribución heterogénea de la cobertura vegetal. La escorrentía y la erosión están controlados por: variaciones espaciales de las características de la superficie del suelo y la conectividad de zonas productoras de escurrimiento.

1.11 CONCLUSIÓN DE LA CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA

Los ríos crean una red de agua en el paisaje y están estrechamente relacionados con cada sección de la cuenca, constituyendo una entidad ecológica. La persistencia de los ríos depende de los procesos que operan en todas las secciones de la cuenca. Por lo cual la funcionalidad ecológica y las interacciones eco-hidrológicas determinan la configuración espacial y las características estructurales de la vegetación y los procesos de escorrentía y erosión, como en la zona de estudio que es un área árida y semiárida, los procesos ecológicos e hidrológicos están fuertemente ligados.

Por lo que la caracterización de la sub-cuenca San Juan del Río, se logra concluir que tiene una área de 3,870.81 km² por lo tanto se clasifica como una cuenca “Grande”, y con una forma Oblonga y alargada, además de contar con un drenaje detrítico y una densidad de drenaje baja, una pendiente media de la cuenca de 10.88% es decir que es una cuenca de tipo casi plana, contiene una curva hipsométrica tipo B, que es, geológicamente madura (pie de montaña) es decir que se encuentra en su fase de madurez o etapa de equilibrio, una elevación mediana de 2290

msnm en donde la pendiente del cauce principal se clasifica en un llano, y un tiempo de concentración de 16.51 hrs., la sub-cuenca cuenta en la parte norte con un clima seco y en la parte sur con un clima templado, su vegetación y uso de suelo son zonas de agricultura y pastizales, con tipos de suelo de: cambizo, fosen, latoso, lubios, plano sol, y vertido, y una escorrentía en periodo seco de 67,263.5 mm/mes, y en periodo de lluvias de 869,000.0 mm/mes.

Con estas características de la cuenca se concluye además, que los ecosistemas ribereños son de los más ricos en especies vegetales y animales debido al ecotono formado entre ecosistemas terrestres y acuáticos. Los ríos juegan un papel relevante en el paisaje, y representan un sistema fluvial continuo desde una perspectiva hidrológica. La influencia de la cuenca en estos ecosistemas ribereños se hace evidente al considerar el escurrimiento que proviene de distintos usos del suelo. Este escurrimiento es la principal causa del transporte de materia orgánica, nutrimentos y pesticidas a la red hidrológica.

La condición de un río puede ser utilizada como un indicador de funcionalidad desde una perspectiva hidro-ecológica. Debido a que los ríos juegan un papel relevante en la re-distribución de nutrimentos a lo largo de la cuenca. Un río implica que las comunidades bióticas que en él se establecen y los procesos que se generan evolucionan y responden de acuerdo al grupo de influencias ambientales y perturbaciones de origen humano. Es por estas razones por lo que se decidió a tomar mediciones de plomo como contaminante de riesgo en la zona de estudio, debido a que es un metal pesado y las aguas del río se utilizan para el riego, y es de vital importancia conocer el comportamiento de este metal en la zona de estudio.

2. DETERMINACIÓN DE COMPUESTOS INORGÁNICOS Y SU REMEDIACIÓN EN LA ZONA DE ESTUDIO.

Uno de los posibles problemas de contaminación en la sub-cuenca San Juan del Río, es la contaminación por metales pesados, debido al desarrollo industrial y automotriz que se realiza en la zona, en este trabajo de investigación se decidió, tomar las mediciones de plomo a lo largo del cauce principal de dicha cuenca en siete puntos de muestreo.

2.1 CONTAMINACIÓN POR METALES PESADOS

La corteza terrestre es la fuente principal de todos los elementos traza naturales en todo lo que se compone por la biosfera, litosfera, hidrosfera y atmosfera. A lo largo de los años, las rocas han estado continuamente sujetas a varios procesos físicos y químicos (meteorización) que dan como resultado la formación de capas de suelo y sedimentos. Estos se pueden convertir en contaminantes si su distribución en el ambiente se altera mediante actividades humanas. En general esto puede ocurrir durante la extracción minera, el refinamiento de productos mineros o por la liberación al ambiente de efluentes industriales y emisiones vehiculares. Además, la inadecuada disposición de residuos metálicos también ha ocasionado la contaminación del suelo, agua superficial y subterránea y de ambientes acuáticos. (INECC, 2014)

Las actividades humanas y el desarrollo tecnológico han contribuido notablemente al aumento de los niveles naturales del plomo en las aguas, sedimentos, flora y fauna, tanto marina como continental. Por lo cual el plomo puede acumularse en los sedimentos de ríos y lagos, o bien ser arrastrado hacia el mar en donde también puede precipitarse y depositarse en los sedimentos marinos que se constituyen en un sumidero en el cual el plomo está relativamente inaccesible. Ya que los suelos retienen por lo general el plomo depositado en ellos, se reduce el potencial de contaminación de los acuíferos (INE, 2014).

Es de gran interés prestar atención al grupo de contaminantes formados por los metales pesados o “elementos tóxicos” como lo llama la INECC (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático) que son aquellos elementos químicos que presentan una densidad superior a 5g/cm^3 , no son biodegradables, se acumulan en el ambiente, son altamente reactivos, persistentes y tóxicos, incluso a bajas concentraciones, por lo que se les considera un gran peligro para la estabilidad del

medio ambiente y la salud humana. Los cuales, de acuerdo a la lista de contaminantes prioritarios de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA), incluyen a los siguientes elementos: Arsénico, cromo, cobalto, níquel, cobre, zinc, plata, cadmio, mercurio, titanio, selenio y plomo (INECC, 2014).

Es importante reconocer que los contaminantes básicos que se encuentran en la hidrosfera pueden clasificarse en 5 grupos: radioactividad, contaminantes orgánicos, metales pesados, ácidos y nutrientes. La presente Tesis de Maestría en Tecnología y Gestión del agua está centrada principalmente en un contaminante químico el cual es el plomo, que se encuentra dentro de la contaminación por metales pesados donde su origen de contaminación, es además de encontrarse de manera natural, es en la agricultura, drenajes urbanos y domésticos, así como desechos de industrias y minerías por lo que elevando la concentración de esta componente en el agua puede producir efectos tóxicos en la salud humana y en los ecosistemas acuáticos (Radojevic M., 2006). Es por esto que estrictamente, los metales pesados están constituidos por elementos de transición y post-transición incluyendo algunos metaloides como el arsénico y selenio. Por otro lado, estos elementos se presentan en diferente estado de oxidación en agua, aire y suelo y presentan diversos grados de reactividad, carga iónica y solubilidad en agua.

2.1.1 PLOMO - METAL PESADO

El elemento plomo con el símbolo Pb, es un elemento de la tabla periódica y metal pesado que se encuentra de forma natural en la corteza terrestre de manera abundante, el cual es absorbido por el agua, suelo y acumulado en los animales y vegetales, pudiéndose transmitir al ser humano a través del consumo de pescado, marisco, carne y vegetales, si contienen elevadas concentraciones de plomo, debido a que por años se ha utilizado y se sigue utilizando en la industria para diversas finalidades, por lo que tiene una amplia distribución en el ambiente.

La exposición al plomo y la consecuente intoxicación constituyen un problema de salud pública a nivel mundial, principalmente en los países en desarrollo. Este es uno de los cuatro metales con mayor efecto dañino en la salud humana a la que afecta a través de dos vías: la inhalación y la ingestión. La mayor parte de Pb procede de sus numerosas aplicaciones industriales en productos

como fundición primaria y secundaria de metales, tuberías, loza vidriada, producción de pinturas y carburantes, elaboración de latas soldadas con plomo, la industria electrónica y de computo, uso de gasolina con plomo; liberándose al medio ambiente y depositándose en la superficie terrestre y acuática. De esta forma contamina los cultivos, y se acumula en los organismos animales que ingieren plancton con plomo. Por lo tanto en el último eslabón de la cadena trófica, los seres humanos se exponen, cuando se alimentan de los vegetales y carnes que contienen plomo. Los cereales y derivados representan el grupo de mayor exposición a plomo por su consumo elevado, más que por su concentración del metal (Fundación Vasca para la Seguridad Agroalimentaria, 2013).

El plomo entra al sistema acuático, vía escurrimiento de la atmósfera. El plomo en los ríos podría ser insoluble si está adherido a partículas orgánicas o inorgánicas, o soluble a la forma de quelatos o complejos inorgánicos. Las aguas superficiales no contaminadas no sobrepasan de 0.1 mg/l. La vida acuática puede perturbarse a partir de 0.1 mg/l. Pudiendo los efectos tóxicos manifestarse en los peces a partir de un 1 mg/L. No obstante, la acción tóxica es variable según las especies y el grado de mineralización del agua (Pezo D., 1992).

En la tabla 11 se presentan los compuestos inorgánicos más importantes del Plomo y los considerados los más tóxicos.

Tabla 11. Compuestos del plomo (Ministerio de Salud Digesa, s.f.).

Nombre	Fórmula
Arseniato de plomo	$Pb_3(AsO_4)_2$, $PbHAsO_4$, $Pb_6OH(AsO_4)_3$
Carbonato de plomo	$PbCO_3$
Cromato de plomo	$PbCrO_4$
Cloruro de plomo	$PbCl$
Dióxido de plomo	PbO_2
Fosfato de plomo	$Pb_3(PO_4)_2$
Monóxido de plomo	PbO_a
Sesquióxido de plomo	Pb_2O_3
Silicato de plomo	$PbSiO_3$
Sulfato de plomo	$PbSO_4$
Sulfuro de plomo	PbS
Tetraóxido de plomo	Pb_3O_4

2.1.2 CONTAMINACIÓN POR PLOMO

En sentido general, se pueden considerar como principales fuentes de contaminación del medio hídrico, las aguas residuales urbanas, las industriales, las agrícolas y ganaderas. Y también existe una gran variedad de fuentes antropogénicas emisoras de plomo como por ejemplo: extracción de minerales, procesos de fundición, industria metalúrgica, gestión de residuos, corrosión metálica, agricultura y ganadería, industria forestal y maderera, quema de combustibles fósiles (Doménech X., 2006).

Para la mayoría de los organismos la exposición a metales pesados, por encima de una concentración umbral puede ser extremadamente tóxica. Los de mayor importancia toxicológica y ecotoxicológica son: Hg, As, Cr, Pb, Cd, Ni y Zn (Castañé, 2003). lista en donde se encuentra el plomo (Pb), el cual puede ser liberados al medio ambiente en cantidades suficientes como para constituir un riesgo para la salud humana. Estos elementos se enlazan fácilmente con el material particulado o sedimentos, y de esta forma son relativamente menos tóxicos, pero cambios en el tiempo o en las condiciones del medio u otros factores medioambientales pueden provocar la movilización de los mismos, aumentando su disponibilidad y toxicidad (Berkowitz B., 2008).

Es necesario resaltar el alto grado de persistencia en el medio ambiente, y su tendencia a la bioacumulación en la cadena trófica y, en ciertos casos, a su elevada toxicidad incluso a bajas concentraciones, el plomo es considerado uno de los contaminantes ambientales más peligrosos y por lo tanto, constituyen un riesgo importante para los seres vivos. En este sentido, se emplean ciertos términos que permiten describir la conducta de dicho contaminante en relación con los sistemas biológicos acuáticos: cadena trófica, nivel trófico, bioacumulación, biomagnificación, bioconcentración y biodisponibilidad (Sánchez, 2010), y se definen como:

- Cadena Trófica: Secuencia alimenticia, en la que se presenta un flujo de materia (energía), iniciando con los productores primarios hasta los descomponedores (Odum, 1985)
- Nivel trófico: Posición en la que se encuentra un determinado organismo en la cadena trófica, dicha posición está clasificado mediante la manera por la cual obtiene su energía (R.L., 1942).
- Bioacumulación: Captación de un químico por un organismo desde el medio biótico (alimento) y/o abiótico concentrándolo en el organismo (Rand, 1995).

- Bioconcentración: Acumulación de los contaminantes en el organismo a partir del agua y por la ingestión de alimento llevándose a cabo un aumento de las concentraciones, siendo este último la principal vía para la captación de contaminantes en todos los organismos (Hall, 2003).
- Biomagnificación: Transferencia de un químico xenobiótico (es todo compuesto químico que no forme parte de la composición de los organismos vivos) desde el alimento a un organismo, resultando en una alta concentración dentro del organismo comparada con la fuente de origen con lo cual, se da un incremento en la concentración entre los niveles tróficos.
- Biodisponibilidad: Grado de absorción de una sustancia por un organismo vivo, normalmente expresada como una fracción de la cantidad total de la sustancia disponible en el ambiente al que está expuesto (Nordberg M. Templeton D. M., 2009).
- Metales traza: Denominados así por encontrarse en bajas concentraciones (0.05 y 50 μM) en el agua de mar (Romero-Bañuelos, 2003).

2.1.3 DISTRIBUCIÓN DE METALES PESADOS (PLOMO) EN ECOSISTEMAS ACUÁTICOS

Aunque la concentración de plomo procedente de fuentes naturales, como la meteorización química de las rocas, se encuentre en estado estacionario a escalas cortas de tiempo, no se logra observar de la misma manera las emisiones antropogénicas, la cual es causante del aumento continuo de la concentración ambiental. La distribución de los metales pesados, así como su concentración y accesibilidad a la atmósfera, hidrosfera, litosfera y biosfera es muy variable, y depende tanto de factores de origen natural como antropogénico, incluyendo aportaciones atmosféricas o de los ríos, erosión de suelos, actividades biológicas, drenaje de aguas y descargas de aguas residuales urbanas e industriales [Carman y col., 2007].

Los sistemas acuáticos pueden considerarse como un conjunto de compartimentos interrelacionados entre sí, en el que se desarrollan procesos físicos, químicos, geológicos y biológicos. Además, es de destacar las importantes interacciones que este medio tiene con la atmósfera (mediante intercambio de gases, deposición de partículas atmosféricas, etc.), con la litosfera (aportes por meteorización y lixiviación de rocas, etc.) y con la hidrosfera (aportes fluviales, etc.), la figura 21 muestra los procesos físico y químicos que puede sufrir el plomo en el agua.



Figura 20. Principales interacciones y flujos de metales pesados entre compartimentos del medio acuático.

2.2 EL PLOMO SOBRE LA SALUD HUMANA

Las fuentes de exposición humana varían de un país a otro y de una región a otra en el mismo país (ej. zonas urbanas y rurales), lo cual está relacionado con las actividades y consumo de productos que involucran al plomo.

2.2.1 INGESTIÓN DEL PLOMO

La ingestión de plomo más importante puede provenir de alimentos contaminados como resultado de:

- a) movilización del plomo desde fuentes naturales
- b) depósito de partículas suspendidas en el aire en cultivos agrícolas o en alimentos preparados en la vía pública en áreas de gran tráfico vehicular
- c) la cosecha, procesamiento, transporte, empaquetado, preparación y almacenamiento de alimentos (INE, 2014).

La ingestión de polvo contaminado con plomo es una fuente importante de exposición para los niños. También puede ingerirse plomo con el agua de consumo humano cuando se corroen las tuberías de plomo o soldadas con este metal debido a la acidez del agua; en este caso la forma

física y química del plomo puede influir en su biodisponibilidad. El plomo es un contaminante químico que se transmite al ser humano a través del consumo de alimentos de origen animal y vegetal con alto contenido del metal pesado. Está presente en el medio ambiente y se deposita en el suelo y agua, acumulándose en los cultivos, y organismos terrestres y acuáticos. El plomo es bioacumulable y potencialmente tóxico para el riñón, hígado, cerebro y huesos, siendo el sistema nervioso central el más dañado. También es un disruptor endocrino, influyendo en alteraciones del sistema reproductor.

La principal vía de transmisión y exposición de la población general al plomo es por consumo directo de alimentos de origen animal y vegetal con altas concentraciones de dicho metal pesado. Cabe destacar que en el caso de niños la ingesta de plomo a través de la tierra y polvo inhalado puede contribuir a la exposición total del contaminante.

Los alimentos que pueden estar contaminados con plomo son los siguientes: Alimentos de origen animal: Vísceras de animales (riñón, hígado, etc.) y productos derivados, dado la acumulación del metal, aunque su consumo es poco significativo en la población general. Carne, productos cárnicos y despojos de carne de caza, como resultado de la utilización de munición de plomo. Leche y derivados lácteos, debido a que el plomo se transfiere a la leche si el ganado lo ha ingerido a dosis altas. Pescado y marisco, principalmente crustáceos y moluscos bivalvos, por consumo del animal entero. También alimentos de origen vegetal: Hortalizas, legumbres y tubérculos, principalmente patata, por su acumulación en las raíces, más que en tallo u hojas. Cereales (principalmente trigo) y derivados. A pesar de que el contenido de plomo no es excesivo, debido al consumo elevado de derivados como pan y bollería, la exposición a Plomo es mayor.

2.3 CARACTERIZACIÓN DE PLOMO EN LA SUB-CUENCA SAN JUAN DEL RÍO

Debido a que en México, el agua para el consumo humano se rige según la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 de salud ambiental, el cual establece el agua para consumo humano que señala los límites permisibles de calidad y tratamientos a que se debe de someter el agua para su potabilización y también con la NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de agua residuales en aguas y bienes

nacionales, donde señala los valores de límite máximos permisibles para la concentración de plomo en las aguas, por lo cual las concentraciones determinadas por estas normas son de 0.05 mg/L; y también de 0.1 mg/L respectivamente, debido a que son criterios ecológicos establecen concentraciones límites para agua marina y para el agua de consumo pecuario.

Es por esta razón que se realizó una caracterización del contenido de plomo en la zona de estudio de la sub-cuenca San Juan del Río, por espectroscopia de absorción atómica. Las tomas de muestras de agua se realizaron en los años 2013 y 2014 en temporadas de lluvias y periodo seco de cada año, en el caudal principal de la sub-cuenca, los puntos de muestra se presentan en la figura 22 y la localización de los puntos de muestreo se presenta en la tabla 12.

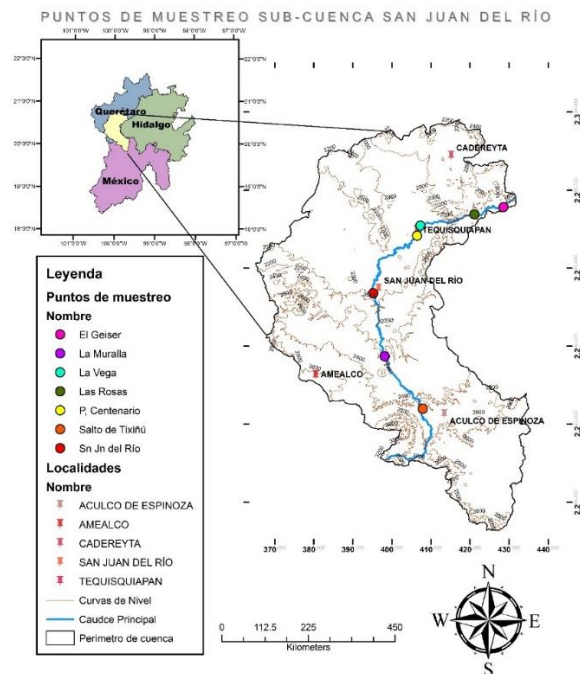


Figura 21. Representación de los puntos de muestreo en la zona de estudio.

Tabla 12. Descripción de los puntos de muestreo en la sub-cuenca San Juan del Río.

Estación	Nombre	Longitud °	Latitud°	msnm
1	Salto de Tixiñú	-99.88067	20.11044	2402
2	La Muralla	-99.9748	20.23139	2094
3	Sn Jn del Río	-100.00381	20.37717	1916
4	P. Centenario	-99.89708	20.51111	1894
5	La Vega	-99.88908	20.53458	1873
6	Las Rosas	-99.756273	20.56125	1786
7	El Geiser	-99.68519	20.57853	1642

A continuación en la Figura 23, se presentan fotográficamente las condiciones del sitio en el año 2014 en época de secas



Figura 22. Representación fotográfica de los puntos de muestra.

2.3.1 TOMA DE MUESTRA

La toma de muestra se realizó por la mañana alrededor de las 9:00 hrs. iniciando en la estación uno El Salto de Tixiñú, conforme el recorrido de las estaciones hasta las 17:00 hrs., guardando muestra del agua del cauce principal en botes de plástico de 100 ml, en la zona media del ancho del río y a una profundidad media para lograr obtener una muestra representativa. Los sitios con monitoreo de calidad del agua están ubicados en zonas con un alta influencia antropogénica.

Los puntos de muestra seleccionados para la medición de plomo en la sub-cuenca de San Juan del Río, fueron determinadas las concentraciones de dicho contaminante mediante la espectroscopia de absorción atómica, la cual es una técnica capaz de determinar y detectar cuantitativamente la

mayoría de los elementos de la tabla periódica, debido a que es un método instrumental de la química analítica que determina la gran variedad de elementos como analitos en estado fundamenta. Sus campos de aplicación son muy diversos. Ya que este método se logra aplicar para la determinación de ciertos metales como: cadmio, plomo, cromo, cobalto, oro arsénico y níquel etc., esta técnica se emplea en el análisis de agua, análisis de suelos, bioquímica, toxicología, medicina, industria farmacéutica, industria alimenticia, y petroquímica, etc.

2.4 ESPECTROSCOPIA DE ABSORCION ATÓMICA

2.4.1 DESCRIPCIÓN DE ESPECTROSCOPIA DE ABSORCIÓN ATÓMICA

La espectrometría atómica es un método instrumental que se basa en la absorción, emisión y fluorescencia de radiación electromagnética por partículas atómicas. Se emplean principalmente radiaciones del espectro ultravioleta (UV) y rayos X (Samaniego, 2009). Este método consiste en la medición de las especies atómicas por su absorción a una longitud de onda particular. La especie atómica se logra atomizar de la muestra, siendo los distintos procedimientos utilizados para llegar al estado fundamental del átomo lo que diferencia las técnicas y accesorios utilizados. La técnica de atomización más usada es la de absorción atómica con flama o llama, que nebuliza la muestra y luego se disemina en forma de aerosol dentro de una llama de aire acetileno u óxido nitroso-acetileno.

La Espectroscopia es la medición e interpretación de la radiación electromagnética absorbida, dispersada o emitida por átomos, moléculas u otras especies químicas. Estos fenómenos están asociados con cambios en los estados de energía de las diferentes especies. Por consiguiente, dado que cada especie posee estados energéticos característicos, la espectroscopia puede utilizarse para identificarlas y cuantificarlas.

El instrumento empleado para la medición del espectrómetro de absorción atómica; es un equipo el cual está compuesto por una lámpara del tipo cátodo hueco, un quemador o mechero, compuesto a su vez por un nebulizados de la muestra, y dispositivos de selección de longitudes de

onda (monocromador tipo rejilla de difracción), transducción y amplificación (tubo fotomultiplicador) y lectura de señal (Figura 24) (Sayas, 2011) .

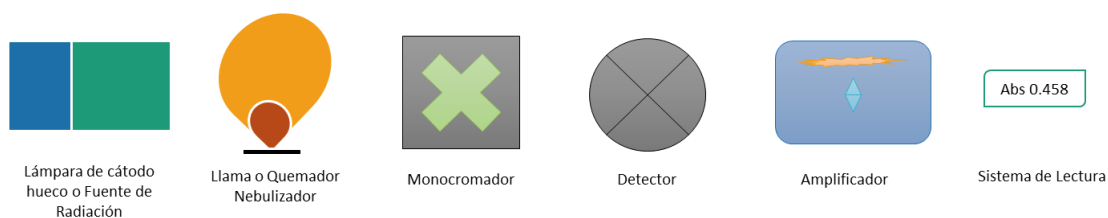


Figura 23. Representación de los componentes del espectrofotómetro de absorción atómica

La espectroscopia constituye la base del análisis espectro químico, en el que la interacción de la radiación electromagnética con la materia se utiliza para obtener información cuantitativa acerca de la composición de una muestra. Dentro del análisis espectro químico, la espectroscopia atómica estudia la absorción y emisión de la radiación por especies atómicas, iónicas y moleculares libres. Estas especies son generadas y examinadas en un medio gaseoso de alta energía, que constituye una fuente de vaporización-atomización-ionización-excitación (Altamirano, 2009).

2.4.2 ANÁLISIS DE LA MUESTRA

El análisis de las muestras tomadas fue analizada por un equipo de espectroscopia de absorción atómica (figura 25), para obtener la concentración de plomo, dicha medición se realizó en el laboratorio de ciencias químicas, de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, (UASLP).



Figura 24. Equipo de espectroscopia de absorción atómica.

2.4.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LAS MEDICIONES DE PLOMO EN LA ZONA DE ESTUDIO

Utilizando el método de espectroscopia de absorción atómica, se obtuvieron los siguientes valores de concentración de plomo para los periodos secos y lluviosos de 2013 y 2014, se presentan en las tablas 12, 13, 14, 15:

Tabla 13. Resultados de concentración de plomo en la sub-cuenca San Juan del Río, en el periodo seco, 2013

Muestras Febrero 2013 SECO	Concentración (ppm) (mg/L)	NOM 127	NOM-001	Desviación Estándar % RSD
Salto de Tixiñú	0.001	CUMPLE	CUMPLE	22
La Muralla	0.002	CUMPLE	CUMPLE	4.8
Sn Jn del Río	0.004	CUMPLE	CUMPLE	7.2
Presa Centenario	0.027	NO CUMPLE	CUMPLE	0.8
La Vega	0.036	NO CUMPLE	CUMPLE	3
Las Rosas	0.021	NO CUMPLE	CUMPLE	0
El Geiser	0.030	NO CUMPLE	CUMPLE	0.5

Tabla 14. Resultados de concentración de plomo en la sub-cuenca San Juan del Río, en el periodo de lluvia, 2013

Muestras Junio 2013 LLUVIAS	Concentración (ppm) (mg/L)	NOM 127	NOM-001	Desviación Estándar % RSD
Salto de Tixiñú	0.010	CUMPLE	CUMPLE	0.2
La Muralla	0.006	CUMPLE	CUMPLE	4.8
Sn Jn del Río	0.012	NO CUMPLE	CUMPLE	6.8
Presa Centenario	0.025	NO CUMPLE	CUMPLE	0.9
La Vega	0.029	NO CUMPLE	CUMPLE	2
Las Rosas	0.032	NO CUMPLE	CUMPLE	0.3
El Geiser	0.044	NO CUMPLE	CUMPLE	0.1

Tabla 15. Resultados de concentración de plomo en la sub-cuenca San Juan del Río, en el periodo post-lluvias, 2013

Muestras Noviembre 2013 POST-LLUVIAS	Concentración (ppm) (mg/L)	NOM 127	NOM-001	Desviación Estándar % RSD
Salto de Tixiñú	0	CUMPLE	CUMPLE	4.4
La Muralla	0.002	CUMPLE	CUMPLE	10.3
Sn Jn del Río	0.001	CUMPLE	CUMPLE	35.7
Presa Centenario	0.004	CUMPLE	CUMPLE	0.6
La Vega	0.011	NO CUMPLE	CUMPLE	6.5
Las Rosas	0.006	CUMPLE	CUMPLE	1.9
El Geiser	0.008	CUMPLE	CUMPLE	9.2

Tabla 16. Resultados de concentración de plomo en la sub-cuenca San Juan del Río, en el periodo seco 2014

Muestras Febrero 2014 SECAS	Concentración (ppm) (mg/L)	NOM 127	NOM-001	Desviación Estándar % RSD
Salto de Tixiñú	0.002	CUMPLE	CUMPLE	17.5
La Muralla	0	CUMPLE	CUMPLE	0
Sn Jn del Río	0.002	CUMPLE	CUMPLE	0.9
Presa Centenario	0.015	NO CUMPLE	CUMPLE	0.7
La Vega	0.023	NO CUMPLE	CUMPLE	0.9
Las Rosas	0.025	NO CUMPLE	CUMPLE	0.5
El Geiser	0.023	NO CUMPLE	CUMPLE	0.6

Como se muestra en las tablas de resultados anteriores de la concentración de plomo en la sub-cuenca San Juan del Río, se logra cumplir en todos los puntos de muestreo con la NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de agua residuales en aguas y bienes nacionales, donde señala los valores de limite máximos permisibles para la concentración de plomo en las aguas, por lo cual cumple con el limite máximo permisible ya que no es mayor a la concentracion de 0.1 mg/L que marca la norma, sin embargo comparando con la NOM-127-SSA1-1994 de salud ambiental, el cual establece el agua para consumo humano que señala los límites permisibles de calidad y tratamientos a que se debe de someter el agua para su potabilización, y debido a que este cauce principal es utilizado para riego se logra observar que en el periodo seco del 2013 y 2014 en los puntos de “Presa Centenario”, “La Vega”, “Las Rosas” y “El Geiser”, no se logra cumplir el parámetro de concentración de plomo el cual marca dicha norma una concentración de 0.05 mg/L, además se tuvieron resultados en el periodo de lluvias del 2013, no cumplen con la norma los puntos de muestreo de “San Juan del Río”, Presa Centenario”, La Vega, Las Rosas” y “El Geiser”, tampoco cumplen con dicha norma el punto de muestreo “La Vega” en el periodo de post-lluvias del 2013.

Por lo que para cumplir con la NOM-127-SSA1-1994 es necesario aplicar algún método de tratamiento del efluente del cauce principal en la sub-cuenca San Juan del Río por lo que en este trabajo de tesis se propone un tratamiento químico, basado en un proceso de adsorción con carbón activado.

2.5 PROPUESTA TRATAMIENTO DEL CAUCE PRINCIPAL DE LA SUB-CUENCA SAN JUAN DEL RÍO

La importancia del control de la contaminación por metales pesados ha aumentado perceptiblemente en las últimas décadas debido a su alta toxicidad e impacto en la salud humana y el ambiente como se mencionó en la sección anterior. Ante ello, se hacen enormes esfuerzos en la disminución de la concentración de metales pesados en las aguas residuales de los efluentes industriales en razón de obligaciones con la normatividad para satisfacer los niveles rigurosamente bajos permitidos en las descargas de aguas residuales, tal como se ha fijado por los controles de contaminación y las autoridades reguladoras de cada país (G. Jyotsna, 2005). Uno de los metales, entre la lista de aquellos potencialmente tóxicos, es el plomo, debido a su alta toxicidad y características de bioacumulación, cancerígeno, mutagénico y no biodegradable. La presencia del plomo en el agua potable incluso a bajas concentraciones puede causar enfermedades tales como anemia, hepatitis y síndrome nefrótico, la Agencia de Protección Ambiental (EPA) lo ha clasificado entre las 20 sustancias químicas más peligrosas para la salud humana; asimismo, estableció el límite máximo permisible de plomo en agua potable de 0.001 ppm.

Las industrias que participan en el procesamiento de baterías ácidas de plomo, pulpa de papel, petroquímicas, refinerías, impresión, pigmentos, material fotográfico, fabricación de explosivos, cerámica, vidrio, pintura, la galvanoplastia, el recubrimiento de metales, son la mayor fuente de contaminación con plomo (Ministerio de Salud Digesa, s.f.). Existen distintas alternativas para tratar el problema del plomo en los efluentes acuosos como son el ajuste del pH con hidróxidos, la coagulación sedimentación, la ósmosis inversa, el intercambio iónico y, por supuesto, la remoción con adsorbentes, siendo esta una práctica muy extendida, ya sea como estrategia de control o como parte de un conjunto de actividades de remediación del daño ambiental causado por tal sustancia. De tal manera que se seleccionó como propuesta para el tratamiento del efluente de la zona de estudio un método de adsorción mediante carbón activado.

El estudio de la capacidad de adsorción del carbón activado, frente a numerosos adsorbibles orgánicos e inorgánicos, presentes en medio acuoso, tiene gran interés científico y tecnológico. En primer lugar, el carbón activado es un sólido poroso versátil, relativamente estable, con alta área superficial y con una estructura de microporos que no constituyen marcadas barreras de difusión aún bajo condiciones granulares compactas (P. Suhas, 2007); en segundo lugar, el carbón activado

es un material renovable en la medida en que se obtiene a partir de materias primas vegetales (residuos agrícolas, madera, algas, semillas, cortezas), hulla, lignitos, turba y residuos poliméricos (cauchos, plásticos, textiles); finalmente, las estructuras tipo grafeno del carbón activado poseen grupos funcionales, que en virtud del método de activación o del tratamiento químico (oxidativo o reductivo) confieren al adsorbente características fisicoquímicas excepcionales que luego afectan los mecanismos de adsorción (J. Díaz, 2007). Es por esto que debido a su gran capacidad de adsorción los carbones activados se utilizan con mayor frecuencia en los procesos de purificación y protección del medio ambiente, especialmente en la eliminación de contaminantes de gases y líquidos.

La adsorción del ion plomo sobre materiales carbonosos se estudia con el propósito de conocer los factores que influyen en tal proceso y poder mejorar tanto las condiciones como los adsorbentes para obtener las mayores cantidades de retención (Macias-Garcia, 2004). La adsorción de iones desde soluciones acuosas sobre carbón activado se debe a las interacciones entre los iones en solución y los grupos funcionales presentes en la superficie del carbón; la concentración de estos grupos en la superficie depende del pH de la solución. El proceso de adsorción se relaciona, principalmente, con dos factores: el primero, las interacciones electrostáticas entre los iones y la superficie del carbón activado y el segundo, las interacciones químicas específicas entre los iones y los complejos superficiales. Ya que la adsorción es un proceso flexible en el diseño y operación además de que produce un efluente tratado de calidad, tiene como ventaja que es un proceso reversible, es decir que los adsorbentes pueden regenerarse por procesos de desorción adecuados (Fenglian Fu, 2011).

2.6 METODOLOGIA PROPUESTA DE ADSORCIÓN MEDIANTE CARBON ACTIVADO COMO TRATAMIENTO DE REMOCIÓN DE PLOMO

En este trabajo de estudio se propone como tratamiento del efluente contaminado con iones de plomo en solución acuosa; en el cauce principal de la sub-cuenca San Juan del Río, utilizando carbón activado comercial, mediante experimentos en lotes (discontinuos) colocando una cantidad determinada de adsorbente en contacto con la disolución que contiene los iones Pb^{2+} ,

manteniéndola en suspensión mediante agitación el tiempo necesario para alcanzar el equilibrio. Los datos de equilibrio se ajustaron a los modelos de isothermas de Langmuir y Freundlich.

De esta manera el concepto de adsorción se entiende por la acumulación preferencial de una sustancia en una fase líquida o gaseosa sobre la superficie de un sólido. El cual en un proceso de adsorción involucra la separación de una sustancia en una fase fluida acumulando la sustancia en la superficie del adsorbente sólido. Los procesos de adsorción son empleados para purificar y separar sustancias. La adsorción física es causada principalmente por las fuerzas de Van der Waals y la fuerza electrostática entre moléculas del adsorbato y los átomos que componen la superficie del adsorbente. Por lo tanto los adsorbentes se caracterizan primeramente por propiedades de la superficie, tales como el área de superficie y la polaridad (García, 2014).

Una gran área de superficie específica es preferible para proporcionar gran capacidad de adsorción, pero la creación de una gran área de superficie interna en un volumen limitado inevitablemente da lugar a un gran número de cargas fraccionadas por los poros de tamaño entre las superficies de adsorción. El tamaño de micro-poro determina la accesibilidad de las moléculas de adsorbato a la superficie de adsorción por lo que la distribución de tamaño de poro de micro-poro es otra propiedad importante para la caracterización de la capacidad de adsorción de los adsorbentes (Suzuki M., 1990).

Según metodologías reportadas por Carmelita Lavado et. Al. (Carmencita Lavado Meza, 2010). Utilizando carbón activado a partir de astillas de eucalipto (*eucalyptus globulus* Labill) mediante activación química usando como agente activante ácido fosfórico, se obtienen máximas remociones a un pH de 5, a 25 ± 1 °C el proceso de adsorción se dio por interacción electrostática e intercambio iónico. En tanto que, los datos experimentales de las isothermas se ajustaron mejor al modelo propuesto por Langmuir, el cual representa una adsorción en monocapa. Reporta que se logrará adsorber un 99,9% de plomo contenido en efluente industrial lo que lo hace muy atractivo para su utilización en la remoción de plomo de efluentes industriales contaminados.

También se encontró la siguiente metodología propuesta por Grey Castellanos et.al. (Grey C. Castellanos Ortega, 2011), la cual dice que los iones Pb^{2+} en disolución acuosa se remueven sobre carbón activado (CA) a 25 ± 1 °C y a un pH de $4,0 \pm 0,1$. En experimentos por lotes para determinar el efecto de la concentración inicial ($20 - 1000$ mg/m³) y la cantidad de adsorbente (0,5-1,0 g)

sobre la capacidad de adsorción. Los datos de equilibrio se ajustan satisfactoriamente a la isoterma de Freundlich dando una capacidad máxima de adsorción de 37,5 m/g de CA, para una dosis de 5 g/m³.

2.6.1 MODELOS DE ISOTERMAS DE ADSORCIÓN

Las isotermas de adsorción es una método el cual nos brinda una panorámica del comportamiento de diversos materiales, donde se encuentra la relación de la cantidad adsorbida en función de la masa del material adsorbente. Los modelos de isotermas de adsorción más comunes son las isotermas de Langmuir y de Freundlich donde cada uno nos muestra un ajuste matemático y cuando experimentalmente existe un ajuste a uno de los modelos el resultado nos habla del tipo de material con el que se trabaja que figura el tipo de capas adheridas a la superficie del material.

Las isotermas de adsorción funcionan mediante la siguiente ecuación 10:

$$q_e = \frac{(C_o - C_e)V}{m} \dots Ec. 10$$

q_e = capacidad de adsorción en el equilibrio, mg/g (miligramos de adsorbato/gramos del adsorbente)

C_o = concentración inicial del adsorbato o contaminantes, mg/L

C_e = concentración en el equilibrio, mg/L

V = volumen de la solución en la isoterma, L

m = masa del adsorbente, g.

2.6.2 ISOTERMA DE LANGMUIR

La isoterma de adsorción de Langmuir se desarrolló suponiendo: un número fijo de sitios accesibles que están disponibles en la superficie del adsorbente, los cuales tienen la misma energía, y la adsorción es reversible. El equilibrio se alcanza cuando la tasa de adsorción de

moléculas sobre la superficie es la misma que la velocidad de desorción de moléculas de la superficie. La velocidad a la que procede la adsorción es proporcional a la fuerza motriz, que es la diferencia entre la cantidad adsorbida a una concentración particular y la cantidad que puede ser adsorbida a esa concentración. A la concentración equilibrio, esta diferencia es cero. Cuando todos los sitios activos estén ocupados por las moléculas adsorbidas se forma una monocapa, a esta característica se le conoce como que el material es homogéneo y solo se ajusta al modelo de Langmuir. La ecuación a la cual ocurre el ajuste es la siguiente ecuación 11:

$$q_A = \frac{Q_M b_A C_A}{1 + b_A C_A} \quad \text{Ec. 11}$$

Donde

q_A = Cantidad máxima de adsorbato removida por el adsorbente, mg adsorbato/ g de adsorbente

C_A = Concentración en el equilibrio del adsorbato, mg/L

Q_M = Máxima concentración en la fase adsorbente de adsorbato, mg adsorbato/ g de adsorbente

b_A = Constante de adsorción de Langmuir, L/mg

2.6.3 ISOTERMA DE FREUNDLICH

La isoterma de adsorción de Freundlich, originalmente fue propuesta como una ecuación empírica (ec. 12) y se utiliza para describir los datos de adsorbentes heterogéneos tales como el carbón activado:

$$q_A = K_A C_A^{1/n} \quad \text{Ec. 12}$$

Donde:

q_A = Cantidad máxima de adsorbato removida por el adsorbente, mg adsorbato/ g de adsorbente

C_A = Concentración en el equilibrio del adsorbato, mg/L

K_A = Parámetro de Freundlich de la capacidad de adsorción, (mg/g)(L/mg)^{1/n}

$1/n$ = Parámetro de Freundlich de la intensidad de adsorción, sin unidades

La ecuación de Freundlich se puede obtener utilizando la ecuación de Langmuir para describir la adsorción sobre sitios de libre energía conocida y considerando las siguientes dos generalidades: i) la energía de los sitios de adsorción siguen una distribución de Boltzmann; y ii) El cambio en la entropía del sitio se incrementa linealmente con el incremento en la entalpía del sitio.

2.7 CONCLUSIONES SOBRE LA RECOMENDACIÓN DE UTILIZAR LA ADSORCIÓN CON CARBÓN ACTIVADO

La presencia de metales pesados en aguas crudas y residuales representa un serio peligro para la salud humana. Entre los metales más tóxicos presentes en las aguas residuales se encuentran antimonio, arsénico, berilio, cadmio, cobalto, cobre, cromo, plata, níquel, mercurio, plomo, selenio y zinc. A diferencia de los compuestos orgánicos, los metales no se pueden biodegradar o destruir y por lo tanto, tienen que ser removidos de la solución. Por lo anterior es necesario investigar y desarrollar nuevos procesos y materiales que sean una alternativa adecuada a la solución de este problema. La adsorción es ahora reconocida como un método eficaz y económico para el tratamiento de aguas residuales de metales pesados. La adsorción utilizando carbón activado (AC) como adsorbentes es ampliamente utilizada en la eliminación de contaminantes de metales pesados. Su utilidad se deriva principalmente de sus grandes volúmenes de microporos y mesoporos y el alto resultado área de superficie. Siendo conveniente aplicar este método a grandes efluentes de aguas residuales contaminadas con metales pesados, por lo que es interesante conocer cómo se comportaría y en que sitio sería conveniente colocar dicho tratamiento en el cauce principal de la zona de estudio utilizando una modelación de ríos para comprender como se comporta el plomo (contaminante) en el río.

3. MODELACIÓN DEL CAUCE PRINCIPAL DE LA SUB-CUENCA SAN JUAN DEL RÍO.

3.1 GENERALIDADES DE LA MODELACIÓN

Un modelo hidrológico se puede definir como una representación matemática del flujo de agua, y sus características sobre una parte de la superficie y/o de la tierra del subsuelo. Hay una estrecha relación entre la modelización hidrológica, química y ecológica, ya que sobre el mismo río fluirán todo y cualquier constituyente afecta potencialmente a la cuenca y/o río. Por otra parte, en la hidrología está profundamente vinculado con las condiciones climáticas, troposférico y la biosfera, y como tal, sus modelos hidrológicos y atmosféricos, mientras que en la práctica, esta conexión se hace muy difícil, ya que los modelos atmosféricos funcionan con mucha mayor resolución espacial que los utilizados en modelización hidrológica (Maidment, 1993).

Un modelo puede ser considerado como una representación simplificada de la realidad auxiliado en la comprensión de los procesos que lo envuelven, el recurso de modelación es una herramienta de trabajo y toma de decisiones necesaria para el planeamiento ambiental, permitiendo hacer un análisis proyectando eventos posibles en el futuro. Los procesos ambientales contienen comportamientos lineales y no lineales, componentes estáticos y cinéticos en diferentes escalas de tiempo y espacio, es por esto que son tan complejos; es decir que aun teniendo una comprensión cuantitativa de los procesos existentes para su entendimiento e interpretación puede ser limitado por la posibilidad que exista dentro de los procesos físicos, ya que son un conjunto de ecuaciones matemáticas que se deben de resolver.

Es así que las limitaciones computacionales aun no son capaces en la forma en que las ecuaciones matemáticas convertidas en procesos numéricos descritos representen procesos complejos detallados, debido a que no se pueden representar de forma explícita, el conjunto de ecuaciones se pueden ver como una colección de entradas que conectan hipótesis y salidas del sistema. Es decir que el conjunto de ecuaciones que mejor aproximación tenga a comprender el comportamiento y conozca todos los parámetros existentes para explicar el proceso es el modelo determinado. Sin embargo es importante reconocer que un modelo ambiental, es solo una

representación de los procesos reales, y dicho proceso se puede representar de diferentes maneras siendo alguno más adecuado que otro para cada caso.

Por lo tanto podemos concluir que un modelo es un sistema de ecuaciones y procedimientos compuestos por varios parámetros, siendo así que un parámetro siempre tiene el mismo valor en diferentes valores de intervalos de tiempo, y que no significa que no varía temporalmente en el espacio; es por esto que los parámetros son valores reales y complejos, controlan la relación entre lo que entra y lo que sale del sistema, siendo estos valores manipulables se logra realizar una calibración de estos. De tal manera los valores son ajustados para que el modelo de una mejor respuesta en precisión y exactitud del sistema que se desea medir, los parámetros y/o valores del modelo pueden o no tener un significado físico, es por esto que es necesario una calibración del sistema (Maidment, 1993).

3.2 MODELACIÓN DEL CAUCE PRINCIPAL

La modelación de un río se puede utilizar para ayudar a los administradores y operadores del recurso hídrico de los ríos en la planificación y operar los sistemas fluviales. El funcionamiento de un sistema fluvial regulado implica información de almacenamiento, desvíos y control del agua del cauce para usos de riego, consumidores ya sea en áreas urbanas y rurales. Dicha información presenta grandes desafíos debido a que los sistemas de gestión y planificación del recurso hídrico tienen conflictos socio-económicos y ambientales. La modelación es una herramienta que proporciona información para la predicción y cuantificación de los componentes del agua (tales como la salinidad, suspendidos sedimentos y nutrientes) de las cuencas a un sistema fluvial y propagación a lo largo del sistema fluvial (Dushmanta Dutta, 2013). El uso de modelos matemáticos de simulación ha ido ganando importancia como herramienta para contribuir a la planificación y gestión integrada de los recursos hídricos.

La modelación de la calidad del agua se puede utilizar para comprender las fuentes de contaminación y para entender cómo la calidad de las aguas receptoras se puede mejorar. Un modelo puede ser utilizado para probar escenarios respondiendo a esta pregunta "¿qué pasa si?" para demostrar el efecto sobre la calidad del agua de un cauce debido a los cambios en las

captaciones y vertidos, o cambios en el volumen de flujo. Dichos modelos se puede utilizar para una variedad de propósitos diferentes, incluyendo el análisis de descargas contaminantes y la predicción a largo plazo la calidad de agua de los ríos. Debido a la necesidad y pertinencia de usar modelos de simulación de la calidad del agua que permitan determinar la capacidad asimilativa de sustancias biodegradables o acumulativas y la capacidad de dilución de sustancias no biodegradables.

3.3 SELECCIÓN DEL MODELO APROPIADO DE SIMULACIÓN

La selección de un modelo de calidad de agua implica observar las características de la corriente hídrica a estudiar, las capacidades de la entidad interesada en implementar el modelo y las propiedades del programa en sí; entonces, el modelo seleccionado será aquel cuyas propiedades se adapten mejor a las características de la corriente en cuestión y a las capacidades de la entidad interesada (Lozano G., 2003).

El modelo QUAL2K representa en forma adecuada los fenómenos de transporte de contaminantes, de transformación de materia orgánica carbonacea y nitrogenada y la capacidad de autopurificación en ríos (Holguin-Gonzalez J.E., 2013). De igual forma, este modelo tiene una representación matemática apropiada de los procesos físico-químicos y de las interacciones columna agua-sedimentos. Por tales razones, se justifica implementar el modelo QUAL2K para simular la calidad del agua del cauce principal de la sub-cuenca San Juan del Río.

3.4 MODELO DE SIMULACIÓN QUAL2K

El modelo QUAL2K es un software de modelación de calidad de agua para ríos de uso libre, desarrollado bajo una aplicación de Visual Basic que trabaja bajo Excel. El modelo incorpora parámetros de calidad de agua, parámetros hidráulicos, datos de elevación, ubicación geográfica, meteorología y procesos de reaeración. Permite la simulación de sistemas hídricos de tipo

dendrítico, es decir, aquellos donde la simulación se extiende no solo a la corriente principal, sino también a corrientes tributarias. Adicionalmente, este modelo presenta una aplicación que permite realizar una calibración objetiva, mediante la auto calibración del modelo usando la técnica de algoritmos genéticos (Chapra Steve C., 2003).

Ya que el QUAL2K, es un modelo de calidad del agua para ríos y corrientes, donde ve al río como una sección unidimensional y el canal está bien mezclado vertical y lateralmente, toma en cuenta la ramificación; su hidráulica en estado permanente, debido a que simula flujo constante y no uniforme, el balance de calor diurno y la temperatura son simulados en función de la meteorología en una escala de tiempo diurno y también simula cargas puntuales y no puntuales, así como extracciones (Agency, 2014).

Las características generales del modelo QUAL2K son:

- **Tipo de software e interfase gráfica.** Este modelo opera en ambiente Windows mediante el lenguaje Visual Basic. La interfase con el usuario se efectúa bajo el software Excel facilitando ampliamente la captura de datos y la generación y presentación de resultados tanto de bases de datos como de gráficas.
- **Segmentación del modelo.** No presenta limitaciones en la especificación del número y longitud de tramos que se pueden modelar. De esta forma múltiples vertimientos y extracciones pueden ser introducidas en cualquier tramo.
- **Dimensionalidad.** El modelo QUAL2K es un modelo unidimensional. Debido a que en la mayoría de los ríos las dimensiones de la longitud son mucho mayores a las profundidades y anchos, entonces es adecuado hacer una representación del sistema en una dimensión (en la dirección del flujo). Se parte del supuesto de que el río o canal se encuentra bien mezclado tanto vertical como horizontalmente.
- **Hidrodinámica.** Se simula el flujo en condiciones hidráulicas estables, es decir en condiciones de flujo permanente, simulando periodos de caudal y cargas constantes en el tiempo (tanto en la corriente principal como en los tributarios).
- **Modelación de sistemas hídricos de tipo dendrítico.** El modelo permite hacer simulaciones de la calidad del agua de sistemas hídricos de tipo dendrítico, es decir, aquellos donde la simulación se extiende no solo a la corriente principal, sino también a corrientes tributarias.

- **Variación diurna del calor.** El calor del volumen de agua y la temperatura son simulados como función de aspectos meteorológicos en una escala de variación diurna.
- **Cinética diurna de la calidad del agua.** Todas las variables de la calidad del agua son simuladas en escala de tiempo diurna. A pesar de ser un modelo de flujo permanente, el modelo tienen la opción de trabajo en la modalidad de un modelo cuasi-dinámico, mediante el cual se pueden analizar los efectos de las variaciones diurnas de los estándares meteorológicos sobre la calidad del agua, especialmente sobre OD y temperatura, así como estudiar variaciones diurnas de OD debidas al crecimiento algal y la respiración.
- **Entradas de masa y calor al sistema.** Se simulan vertimientos y extracciones tanto puntuales como dispersas.
- **Parámetros modelados.** El modelo simula los siguientes parámetros: conductividad, sólidos suspendidos inorgánicos, oxígeno disuelto, DBO rápida, DBO lenta, nitrógeno orgánico disuelto, nitrógeno amoniacal, nitratos, fósforo orgánico disuelto, fósforo inorgánico, fitoplancton (algas en la columna de agua), detritus, patógenos, alcalinidad, carbono orgánico total, algas de fondo, temperatura y caudal.
- **Especies de DBO carbonacea.** El modelo QUAL2Kw usa dos formas de DBO carbonacea para representar el carbono orgánico. Estas formas son: la DBO de lenta oxidación (materia orgánica degradable lentamente o DBOslow) y la DBO de rápida oxidación (materia orgánica degradable rápidamente o DBOfast). Adicionalmente se simula la materia orgánica particulada (Detritus). Este material de detritus está compuesto por partículas de carbón, nitrógeno y fósforo en una estequiometría fija.
- **Algas en el fondo (periphyton o plantas radiculadas fijas).** El modelo tiene un módulo completo de modelación de crecimiento de phytoplankton (plantas flotantes) y de periphyton y macrófitas (plantas radiculadas fijas) y simula explícitamente las formaciones de algas en el fondo. Los modelos de crecimiento son función de la disponibilidad de nutrientes (fósforo y nitrógeno en forma aprovechable para la generación de biomasa), de la temperatura, y de la intensidad de luz que penetra en el cuerpo de agua. Esta última a su vez es función de la radiación solar incidente y de la turbidez del agua.
- **Extinción de la luz.** La extinción de la luz al interior de la columna de agua se calcula como función de las algas, el detritus y los sólidos inorgánicos.
- **pH.** Inicialmente se simula la alcalinidad y el carbono inorgánico total.

- **Patógenos.** Se modela un patógeno genérico (coliformes fecales o coliformes totales). La remoción de patógenos está determinada como función de la temperatura, la luz y la sedimentación.
- **Interacciones Agua-Sedimento.** Los flujos en la interfase agua-sedimento de OD y nutrientes se simulan internamente en el modelo. De esta forma el flujo de demanda béntica (SOD) y de nutrientes son simulados como función de la sedimentación de materia orgánica particulada, reacciones dentro de los sedimentos, y de concentraciones de las formas solubles en la columna de agua (Gonzalez, 2014).

3.5 REPRESENTACIÓN DE UNA CORRIENTE SUPERFICIAL EN EL QUAL2K

La topología o esquematización de un modelo matemático de simulación corresponde a la representación de las características del sistema que se requiere modelar. En el caso de la modelación en corrientes superficiales dicha representación se refiere a las características hidrogeométricas y la definición de las fronteras del modelo (fronteras internas y externas). Las fronteras externas corresponden a las estaciones de monitoreo ubicadas aguas arriba y aguas abajo del tramo en estudio. Las fronteras internas corresponden a los ríos tributarios, las extracciones y los vertimientos para los cuales se dispone de información de caudales y calidad del agua. La corriente modelada se divide en una red de “cabeceras” (fronteras aguas arriba), “tramos” y “nodos o intersecciones”. En el momento de seleccionar los tramo entre las estaciones se debe tener en cuenta que las propiedades físicas e hidráulicas (sección transversal, pendiente de la corriente, rugosidad etc), químicas y biológicas permanecen constantes a lo largo de cada tramo (figura 26).

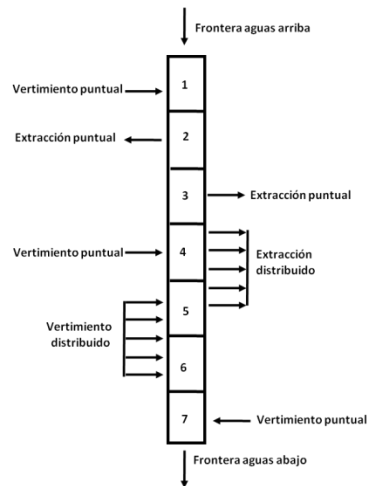


Figura 25. Esquematización general del modelo QUAL2K para un río con quebradas o ríos tributarios representados como vertimientos puntuales (*Chapra Steve, 2008*).

El modelo QUAL2K permite evaluar la capacidad asimilativa de agua residual de un sistema de corrientes mediante la simulación de varios constituyentes de calidad del agua en el sistema, utilizando una solución en diferencias finitas de las ecuaciones de advección y dispersión de masa y de reacción. Conceptualmente el tramo de un río se divide en una sucesión de pequeños subtramos o elementos computacionales, que operan como reactores completamente mezclados. Para cada elemento computacional se realiza un balance hidrológico en términos del caudal Q , un balance térmico en términos de la temperatura T , y un balance de masa en términos de concentración C de cada constituyente. En estos elementos puede haber ganancia o pérdida de masa debido a procesos de transporte (advección y dispersión), fuentes externas o sumideros (e.g. descarga de agua residual o tomas o extracciones de agua) o por fuentes internas y sumideros (e.g. demanda béntica o transformaciones bioquímicas). Las ecuaciones de balance resultante se resuelven para el caso de flujo permanente con un método clásico de diferencias finitas implícito. Los resultados finales se traducen en curvas que muestran la variación de los parámetros modelados a lo largo de la corriente.

3.6 INFORMACIÓN DE ENTRADA AL MODELO

El modelo QUAL2K emplea el software Excel como interface gráfica y de acceso de datos. El libro de Excel contiene varias hojas electrónicas desde donde se suministran los diferentes datos de

entrada del modelo y desde donde éste es ejecutado. Cada una de estas hojas electrónicas tiene un nombre que identifica el tipo de información que contiene: información general, información de la frontera aguas arriba (cabecera), descripción de los tramos del río, condiciones climatológicas (temperatura del aire, temperatura del punto de rocío, velocidad del viento, nubosidad y sombra), los valores de las tasas de reacción o constantes cinéticas de calibración del modelo, la información correspondiente a los tributarios y captaciones puntuales y distribuidas y la información de las estaciones aguas abajo de la cabecera.

En el modelo se usan colores en las celdas para identificar si la información debe ser ingresada por el usuario o si corresponden a resultados del programa:

- *Celdas azules:* corresponden a las variables de diseño y los valores de los parámetros que deben ser ingresados por el usuario.
- *Celdas amarillas:* son los datos medidos en campo que deben ser ingresados por el usuario. Estos datos posteriormente se muestran en las gráficas generadas por el modelo QUAL2K.
- *Celdas verdes:* corresponden a los resultados del modelo.
- *Celdas oscurecidas:* se usan para títulos y nomenclatura y no deben cambiarse.

Los datos requeridos por el modelo QUAL2K son mostrados en la tabla

Tabla 17. *Parámetros fisicoquímicos y biológicos del modelo QUAL2K.*

Parámetro	
Oxígeno disuelto	Patógenos
DBO (Demanda Biológica de Oxígeno)	Conductividad
Sólidos Suspendidos Inorgánicos	Algas del fondo
Nitrógeno orgánico disuelto	Fitoplancton
Nitrógeno Amoniacal	Detritus
Nitratos	Carbono orgánico total
Fósforo orgánico disuelto	Temperatura
Fósforo inorgánico	pH

3.7 INFORMACIÓN DE SALIDA DEL MODELO

Después de que el modelo QUAL2K ha efectuado los cálculos necesarios para poder realizar las corridas de simulación, se generan diferentes hojas electrónicas y gráficas con los resultados en el mismo libro de Excel. En las gráficas resultantes se pueden comparar las curvas correspondientes al perfil de concentraciones de los diferentes parámetros estimados por el modelo a lo largo del río, con los datos medidos en campo en las estaciones de monitoreo.

3.8 APLICANDO QUAL2K EN LA SUB-CUENCA SAN JUAN DEL RÍO

En este estudio se tuvieron en cuenta las características del cauce en su recorrido y la topografía de 46 secciones transversales analizadas, debido a que el largo del cauce principal es muy grande (143.30 km), se definieron siete tramos de modelación, los cuales fueron los puntos de muestreo. Estos tramos se presentan en la tabla 17:

Tabla 18. Posición geográfica de los tramos de la sub-cuenca San Juan del Río.

Tramo No.	Nombre	Longitud del Tramo (Km)	Latitud	Longitud	msnm
1	Salto de Tixiñi	32.25	-99.974800	20.23139	2094
2	La muralla	27.25	-100.00381	20.37717	1916
3	San Juan del Río	17.05	-99.897080	20.51111	1894
4	Presa Centenario	15.05	-99.889080	20.53458	1873
5	La Vega	12.65	-99.756273	20.561259	1786
6	Las Rosas	8.50	-99.685190	20.57853	1642

Con dichos elemento descritos en la tabla 17, y con el objetivo de identificar las características hidráulicas del cauce principal de la sub-cuenca, se cuenta con 6 puntos de muestreo los cuales fueron debidamente georeferenciados e identificados en el sitio. La esquematización del río corresponde a una red construida entre la abscisa 112.75 Km (Salto de Tixiñi) al inicio del tramo simulado y la abscisa 2.5 Km (Las Rosas) en la salida del tramo. La corriente modelada se divide en una red de “cabeceras” (fronteras aguas arriba), “tramos” y “nodos o intersecciones”. En el momento de seleccionar los tramos se debe tener en cuenta que las propiedades químicas y biológicas permanecen constantes a lo largo de cada tramo.

Tabla 19. Descripción de los tramos de modelación del cauce principal de la sub-cuenca San Juan del Río.

Tramo	Abscisa inicial (Km)	Abscisa final (Km)
1	112.75	102.75
2	102.75	92.75

3	92.75	82.75
4	82.75	72.75
5	72.75	62.75
6	62.75	52.75
7	52.75	42.75
8	42.75	32.75
9	32.75	22.75
10	22.75	12.75
11	12.75	2.75
12	2.75	0.00
Total		112.75

A manera de ejemplo en la figura 27, se presenta la hoja de ingreso de información (“reach”) en el modelo QUAL2K, para la definición de los segmentos o elementos de cálculo. La información que se debe suministrar en esta hoja de cálculo corresponde a la abscisa, la altura sobre el nivel del mar y la ubicación en coordenadas geográficas de cada estación.

Reach Number	Headwater Reach	Reach length (km)	Downstream Latitude	Downstream Longitude	Location Upstream (km)	Location Downstream (km)	Element Number	Elevation Upstream (m)	Elevation Downstream (m)
1	Yes	10.00	0.00	0.00	112.75	102.75	4	2402.000	2385.000
2		10.00	-99.97	20.23	102.75	92.75	4	2385.000	2368.000
3		10.00	0.00	0.00	92.75	82.75	4	2368.000	2351.000
4		10.00	-100.00	20.38	82.75	72.75	4	2351.000	2334.000
5		10.00	-99.90	20.51	72.75	62.75	4	2334.000	2317.000
6		10.00	0.00	0.00	62.75	52.75	4	2317.000	2300.000
7		10.00	0.00	0.00	52.75	42.75	4	2300.000	2283.000
8		10.00	-99.89	20.53	42.75	32.75	4	2283.000	2266.000
9		10.00	0.00	0.00	32.75	22.75	4	2266.000	2249.000
10		10.00	-99.76	20.56	22.75	12.75	4	2249.000	2232.000
11		10.00	0.00	0.00	12.75	2.75	4	2232.000	2215.000
12		2.75	-99.69	20.58	2.75	0.00	4	2215.000	2198.000

Figura 26. Hoja de ingreso de información de los tramos de modelación en el QUAL2K (“reach”)

3.8.1 DATOS DE ENTRADA AL MODELO DE SIMULACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

Durante la implementación de un modelo de simulación en una corriente superficial es necesario recolectar información sobre dos aspectos básicos:

- Información sobre calidad, cantidad y ubicación de los tributarios o vertimientos y de las captaciones de agua sobre la corriente que se está modelando.

- Las características hidráulicas de la corriente, que permitan conocer el caudal, la velocidad media de la corriente, los anchos y profundidades de las secciones transversales a lo largo del río y las pendientes de los tramos. Adicionalmente, es necesario conocer la frecuencia de permanencia de caudales.

Por lo cual los datos tomados utilizados en esta modelación fueron los siguientes presentes en la figura 28.

		FEBRERO											
TRAMO	Nombre	pH	NO ₂	NH ₃	NO ₃	PO ₄	Chl a	OD	°C	Cond	Alcal	ORP	Turb
			mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	µg/L	mg/L		µS/cm		mV	NTU
1	Salto de Tixiñú	8.37	0.0087	0.1	0.7	0.137	3.638	2.16	13.17	178	48.9185	-70.1	7
2	La Muralla	8.99	0.0199	0.1	0.7	0.17075	12.173	2.16	15.44	140	36.7547	-108.3	240
3	Sn Juan del Río	8.03	0.0880667	1.1	1.1	0.592	9.022	0.01	17.34	2116	669.2723	-145.5	40
4	P. Centenario	8.42	0.0583667	12.733333	0.4	7.305	409.123	1.24	17.17	3146	998.9753	-288.5	24
5	La Vega	8.51	0.0117667	14.766667	0.4	7.6545	147.908	0.36	17.97	3040	965.0447	-291.7	240
6	Las Rosas	8.45	0.097	6	0.4	6.723	17.885	3.12	16.51	3130	993.8537	-132.9	15
7	El Geiser	8.49	0.2854	1.7	1.5	6.5985	40.742	1.83	17.48	3284	1043.1491	-185	35
		JUNIO											
		pH	NO ₂	NH ₃	NO ₃	PO ₄	Chl a	OD	°C	Cond	Alcal	ORP	Turb
			mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	µg/L	mg/L		µS/cm		mV	NTU
1	Salto de Tixiñú	7.83	0.0092667	0.1333333	0.5	0.21775	14.859	6.3	17.17	93	21.71	-119.3	240
2	La Muralla	7.68	0.0155667	0.8333333	0.7	0.205	12.815	3.46	18.17	61.5	11.62685	-148.5	240
3	Sn Juan del Río	7.38	0.0271333	2.3333333	0.3	0.0375	15.303	0	20.19	64.2	12.49112	-220.9	15
4	P. Centenario	8.13	0.0303333	13.666667	0.3	4.87	165.521	4.03	18.94	814	252.5021	-170.1	240
5	La Vega	7.85	0.0058	22.266667	0.3	5.031	23.078	0	21.84	1466	461.2073	-396	240
6	Las Rosas	8.15	0.3745	8.0666667	1.8	6.273	11.539	3.16	22.28	1963	620.297	-207	240
7	El Geiser	8.16	0.4251	0.8333333	1.45	6.4455	18.439	5.4	22.41	3036	963.7643	-227.1	100
		NOVIEMBRE											
		pH	NO ₂	NH ₃	NO ₃	PO ₄	Chl a	OD	°C	Cond	Alcal	ORP	Turb
			mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	µg/L	mg/L		µS/cm		mV	NTU
1	Salto de Tixiñú	8.47	0.0032333	0.1	0.45	0.15175	12.684	3.4	15.43	103	24.911	-78	6
2	La Muralla	7.8	0.0053	0.4333333	0.1	0.19275	9.357	4.23	18.46	86	19.4693	-99.1	240
3	Sn Juan del Río	8.01	0.0054333	0.1666667	0.4	0.12625	13.707	1.7	17.42	152	40.5959	-128	40
4	P. Centenario	8.15	0.0719	9.3	0.4	4.504	23.571	2.6	18.01	878	272.9885	-294	24
5	La Vega	7.93	0.1869333	8.6333333	0.7	4.817	18.007	1.04	18.04	801	248.3408	-145	240
6	Las Rosas	8.19	0.0074	0.2666667	1.15	4.4	11.112	2.25	18.89	533	162.554	-146	15
7	El Geiser	8.52	0.0075667	0.2	0.7	5.118	20.224	2.3	19.87	743	229.775	-130	40

Figura 27. Datos de entrada para la simulación del modelo QUAL2K.

3.8.2 BASE DE DATOS PARA LA CALIBRACIÓN Y VERIFICACIÓN DEL MODELO

Para poder realizar la calibración y verificación de un modelo de simulación es necesario contar con un grupo de datos en las fronteras de este, que permita realizar las simulaciones o corridas, hasta lograr reproducir con precisión las series de datos observados en campo en diferentes estaciones, mediante el ajuste de los parámetros físicos y numéricos del modelo. Por esta razón, la recolección de datos del sistema (corriente superficial) resulta fundamental, ya que todos los resultados producidos por el modelo están basados en los datos de entrada de las fronteras. La utilidad de los modelos matemáticos está determinada en gran medida por su habilidad en reproducir con precisión series de datos observados, por ejemplo el nivel de calibración logrado,

pero más aún, por su capacidad predictiva. Se entiende ésta como la capacidad del modelo de describir otras series de tiempo sin que se requiera el ajuste de alguno de los parámetros calibrados, de esta forma se obtienen resultados precisos bajo condiciones hidrológicas y ambientales, diferentes a las observadas en la calibración del modelo, en el sistema modelado (Camacho L. A., 2002).

Teniendo en cuenta lo anterior, se realizaron modelaciones en con tres diferentes fechas de monitoreo, en febrero como periodo seco, junio periodo de lluvias y noviembre como periodo de post-lluvias, con valores fisicoquímicos los cuales fueron mencionado en la figura 28.

3.8.3 CONDICIONES SUMINISTRADAS AL MODELO QUAL2K PARA SU SIMULACIÓN

Durante el proceso de modelación es necesario introducir las condiciones del río (caudal y parámetros de calidad) en la frontera aguas arriba o cabecera del tramo en estudio. En el modelo QUAL2K esta información se suministra en la hoja "Headwater". Como ejemplo, en la figura 29 se muestra la hoja de ingreso de información en la cabecera del río de la sub-cuenca San Juan del Río.

Headwater label	Reach No	Flow Rate (m ³ /s)	Elevation (m)	Weir				Rating Curves				Manning Formula					
				Height (m)	Width (m)	adam	bdam	Velocity		Depth		Channel Slope	Manning n	Bot Width (m)	Side Slope		
								Coefficient	Exponent	Coefficient	Exponent						
Mainstem headwater	1	6678.500	2402.000	0.000	0.000	1.250	0.900	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.0170	10.00	0.00		
Water Quality Constituents	Units	12:00 a.m.	01:00 a.m.	02:00 a.m.	03:00 a.m.	04:00 a.m.	05:00 a.m.	06:00 a.m.	07:00 a.m.	08:00 a.m.	09:00 a.m.	10:00 a.m.	11:00 a.m.	12:00 p.m.	01:00 p.m.		
Temperature	C							13.17	15.44	17.34	17.17	17.97	16.51	16.51			
Conductivity	umhos							300.02	304.33	307.98	310.72	312.36	312.80	312.80			
Inorganic Solids	mg/D/L							8.85	7.93	7.05	6.28	5.67	5.26	5.26			
Dissolved Oxygen	mg/L							2.16	2.16	0.01	1.24	0.36	3.12	3.12			
CBODslow	mgO ₂ /L							2.68	2.68	2.68	2.68	2.68	2.68	2.68			
CBODfast	mgO ₂ /L																
Organic Nitrogen	ugN/L							1711.15	1723.98	1733.19	1738.15	1738.51	1734.25	1734.25			
NH4-Nitrogen	ugN/L																
NO3-Nitrogen	ugN/L							0.70	0.70	1.10	0.40	0.40	0.40	1.56			
Organic Phosphorus	ugP/L							57.89	52.65	46.86	40.93	35.24	30.20	30.20			
Inorganic Phosphorus (SRP)	ugP/L							30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00			
Phytoplankton	ugA/L																
Internal Nitrogen (INP)	ugN/L																
Internal Phosphorus (IPP)	ugP/L																

Figura 28. Información suministrada al modelo QUAL2K en la cabecera del cauce principal de la sub-cuenca San Juan del Río durante el monitoreo realizado en febrero del 2013.

Las condiciones en las estaciones de monitoreo aguas abajo, es suministrada en el modelo en las hojas "Hydraulics Data", "Temperature Data" y "WQ Data" (figura 30). Esta información es luego graficada para cada uno de los parámetros evaluados y permite comparar los datos medidos en campo con las curvas correspondientes al perfil de concentraciones de los diferentes parámetros estimados por el modelo a lo largo del río.

QUAL2K
Stream Water Quality Model
SanJuan (2/11/2013)
Water Quality Data:

Tributary No.	Distance km	DO (mgO ₂ /L) data	NO ₃ (ugN/L) data	Alk (mgCaCO ₃ /L) data	Constituent i data	pH data	Bot A
0	92.25	2.16	0.10	36.75		8.99	
0	67.25	0.01	1.10	669.27		8.03	
0	37.05	1.24	12.73	998.98		8.42	
0	35.05	0.36	14.77	965.04		8.51	
0	18.65	3.12	6.00	993.85		8.45	
0	8.50	1.83	1.70	1043.15		8.49	

Navigation: Rates | Light and Heat | Diffuse Sources | Point Sources | Hydraulics Data | Temperature Data | WQ Data | WQ Data

Figura 29. Información suministrada en las estaciones de monitoreo sobre el cauce principal del la sub-cuenca San Juan del Río ubicadas aguas abajo, realizado en febrero del 2013.

Para realizar la calibración y modelación de la calidad del agua de un río usando el software QUAL2K, primero que todo es necesario calibrar el componente hidráulico del modelo. El primer paso de la modelación en un río consiste en dividir el sector en estudio en varios tramos de características hidráulicas homogéneas, tomando como base la morfología de la cuenca. Una vez definidos los tramos de modelación con características hidráulicas similares, es necesario obtener las constantes hidrométricas del río en cada uno de los tramos. El objetivo es obtener los valores de los coeficientes y exponentes que mejor aproximen las series de datos de caudal - velocidad y caudal – profundidad (Gonzalez, 2014).

En un modelo de calidad del agua se deben especificar las tasas de reacción o transformación de los determinantes de calidad del agua y tasas de transferencia de masa hacia o desde la superficie del agua y el fondo del canal. La cinética de las reacciones son particulares para cada tipo de río y/o agua residual en las condiciones específicas que se presentan en el sistema físico modelado y las tasas de transferencia dependen en gran parte de la turbulencia propia de la corriente. Esto necesariamente obliga al modelador a calibrar los modelos que se aplican a un sistema físico particular utilizando parámetros de calibración (Camacho L. A., 2002). Una de las mayores utilidades de los modelos matemáticos de simulación está determinada por su capacidad predictiva, siendo esta la capacidad del modelo de describir otras series de tiempo sin que se requiera el ajuste de alguno de los parámetros calibrados.

Dada la complejidad de los modelos de calidad del agua como lo es el QUAL2K caracterizado por un gran número de parámetros, se requieren metodologías adecuadas y objetivas de calibración, que permitan determinar los procesos y parámetros dominantes correspondientes a partir de los datos observados (Holguin et al., 2013). El modelo QUAL2K está caracterizado por 18 parámetros de calibración fundamentales (sin considerar mecanismos de crecimiento de phytoplankton). Estos parámetros se ingresan en la hoja de calculo "Rates" (figura 31).

QUAL2K						
Stream Water Quality Model						
San Juan (2/11/2013)						
Water Column Rates						
Parameter	Value	Units	Symbol	Phytoplankton:		
Stoichiometry:						
Carbon	40gC	gC	μ	Max Growth rate	2.5/d	k_{gp}
Nitrogen	7.2gN	gN	μ	Temp correction	1.07	θ_{gp}
Phosphorus	1gP	gP	μ	Respiration rate	0.1/d	k_{rp}
Dry weight	100gD	gD	μ	Temp correction	1.07	θ_{rp}
Chlorophyll	1gA	gA	μ	Excretion rate	0/d	k_{ep}
				Temp correction	1.07	θ_{ep}
				Death rate	0/d	k_{dp}
Inorganic suspended solids:						
Settling velocity	1.304m/d	m/d	v_s	Temp correction	1	θ_{vs}
Oxygen:						
Reaeration model	Owens-Gibbs			External Nitrogen half sat constant	15gN/L	K_{EN}
User reaeration coefficient α	0		α	External Phosphorus half sat constant	2ugP/L	K_{EP}
User reaeration coefficient β	0		β	Inorganic carbon half sat constant	2.00E-05moles/L	K_{IC}
User reaeration coefficient γ	0		γ	Light model	Half saturation	
Temp correction	1.024		θ_r	Light constant	57.6angleys/d	K_{Lr}
Reaeration wind effect	None			Ammonia preference	25ugN/L	K_{AP}
O2 for carbon oxidation	2.65gO ₂ /gC	gC	f_{oc}	Subsistence quota for nitrogen	0mgN/mgA	q_{Np}
O2 for NH4 nitrification	4.57gO ₂ /gN	gN	f_{on}	Subsistence quota for phosphorus	0mgP/mgA	q_{Pp}
Oxygen inhib model CBOD oxidation	Exponential			Maximum uptake rate for nitrogen	0mgN/mgA/d	ρ_{Np}
Oxygen inhib parameter CBOD oxidation	0.60L/mgO2		K_{iN}	Maximum uptake rate for phosphorus	0mgP/mgA/d	ρ_{Pp}
Oxygen inhib model nitrification	Exponential			Internal nitrogen half sat constant	0mgN/mgA	K_{IN}
Oxygen inhib parameter nitrification	0.60L/mgO2		K_{iN}	Internal phosphorus half sat constant	0mgP/mgA	K_{IP}
Oxygen enhance model denitrification	Exponential			Settling velocity	0.15m/d	v_s
Oxygen enhance parameter denitrification	0.60L/mgO2		K_{iN}	Bottom Algae:		
Oxygen inhib model phyto resp	Exponential			Growth model	Zero-order	
Oxygen enhance model bot alg resp	Exponential			Max Growth rate	999.99mgA/m ² /d or /d	G_{max}
Oxygen enhance parameter bot alg resp	0.60L/mgO2		K_{iN}	Temp correction	1.07	θ_{gp}
Slow CBOD:				First-order model carrying capacity	1000mgA/m ²	d_{lim}
Hydrolysis rate	0.5/d		k_{hd}	Respiration rate	1/d	k_{rp}
Temp correction	1.047		θ_{hd}	Temp correction	1.07	θ_{rp}
Oxidation rate	2.5/d		k_{ox}	Excretion rate	0.5/d	k_{ep}
Temp correction	1.047		θ_{ox}	Temp correction	1.05	θ_{ep}
Fast CBOD:				Death rate	0.09/d	k_{dp}
Oxidation rate	2.5/d		k_{ox}	Temp correction	1.07	θ_{ep}
Temp correction	1.047		θ_{ox}	External nitrogen half sat constant	0.052ugN/L	K_{EN}
Nitrate:				External phosphorus half sat constant	86.379ugP/L	K_{EP}
Denitrification	0/d		k_{dn}	Inorganic carbon half sat constant	1.00E-05moles/L	K_{IC}
Temp correction	1.07		θ_{dn}	Light model	Half saturation	
Settling velocity	0m/d		v_s	Light constant	76.319angleys/d	K_{Lr}
Ammonium:				Ammonia preference	99.982ugN/L	K_{AP}
Nitrification	1.649/d		k_{ni}	Subsistence quota for nitrogen	2.524mgN/mgA	q_{Np}
Temp correction	1.07		θ_{ni}	Subsistence quota for phosphorus	0.002mgP/mgA	q_{Pp}
Nitrate:				Maximum uptake rate for nitrogen	149.913mgN/mgA/d	ρ_{Np}
Denitrification	0/d		k_{dn}	Maximum uptake rate for phosphorus	5.009mgP/mgA/d	ρ_{Pp}
Temp correction	1.07		θ_{dn}	Internal nitrogen half sat constant	0.384mgN/mgA	K_{IN}
Settling velocity	0m/d		v_s	Internal phosphorus half sat constant	0.102mgP/mgA	K_{IP}
Debris (POM):						
Sed denitrification transfer coeff	0m/d		f_{dn}	Dissolution rate	2.179/d	k_{sd}
Temp correction	1.07		θ_{dn}	Temp correction	1.07	θ_{sd}
Organic P:				Fraction of dissolution to fast CBOD	1.00	f_{f}
Hydrolysis	0/d		k_{hd}	Settling velocity	0.236m/d	v_s
Temp correction	1.07		θ_{hd}	Pathogens:		
Settling velocity	1.999m/d		v_s	Decay rate	0.8/d	k_{dp}
Inorganic P:				Temp correction	1.07	θ_{dp}
Settling velocity	0m/d		v_s	Settling velocity	1m/d	v_s
Inorganic P sorption coefficient	0.07L/mgD		K_{sp}	Light efficiency factor	1.00	η_{ph}
Sed P oxygen attenuation half sat constant	1.831mgO ₂ /L		K_{iN}	pH:		
				Partial pressure of carbon dioxide	347ppm	P_{CO2}
				Constituent i		
				First-order reaction rate	0/d	k_{di}
				Temp correction	1	θ_{di}
				Settling velocity	0.8m/d	v_{si}
				Constituent j		
				First-order reaction rate	0/d	k_{dj}
				Temp correction	1	θ_{dj}
				Settling velocity	0m/d	v_{sj}
				Constituent k		
				First-order reaction rate	0/d	k_{dk}
				Temp correction	1	θ_{dk}
				Settling velocity	0m/d	v_{sk}

Figura 30. Hoja electrónica "Rates" para el ingreso de los parámetros de calibración en el modelo QUAL2K.

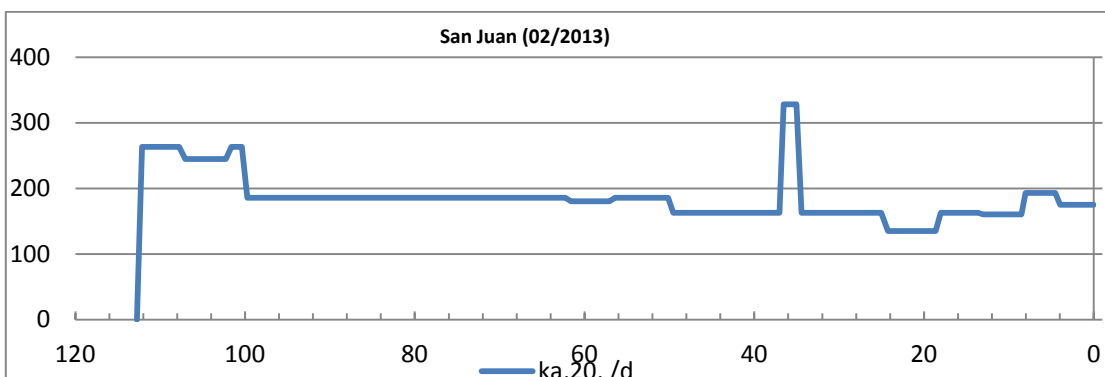
Aplicando la modelación del cauce del río principal en la sub-cuenca San Juan del Río, obtenemos las siguientes graficas como resultado.

3.9 MODELACIÓN DEL CAUCE PRINCIPAL DE LA SUB-CUENCA SAN JUAN DEL RÍO

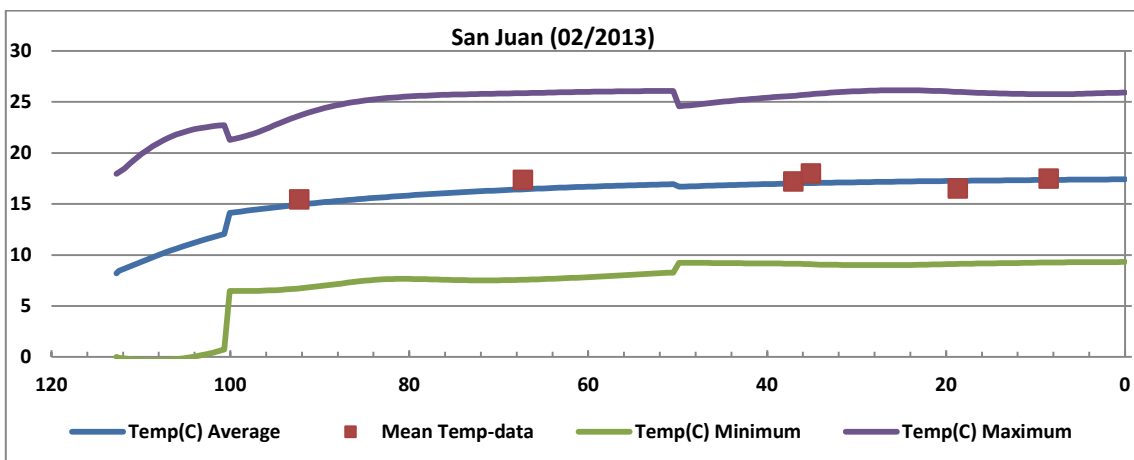
El análisis de la calidad del agua se realizará con el Modelo River and Stream Water Quality Model (QUAL2K), desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés). Este Modelo, ayuda a describir los procesos de autodepuración presentes en los ríos tomando en cuenta las condiciones hidráulicas y ambientales.

En las gráficas 5, 6, 7 se pueden observar los resultados de este modelo. El análisis permite observar que en forma general los resultados de la calibración y verificación del modelo de simulación muestran un buen ajuste entre los valores calculados por el modelo y los medidos en campo de las variables determinantes de la calidad del agua en la mayoría de las estaciones, en los sectores evaluados.

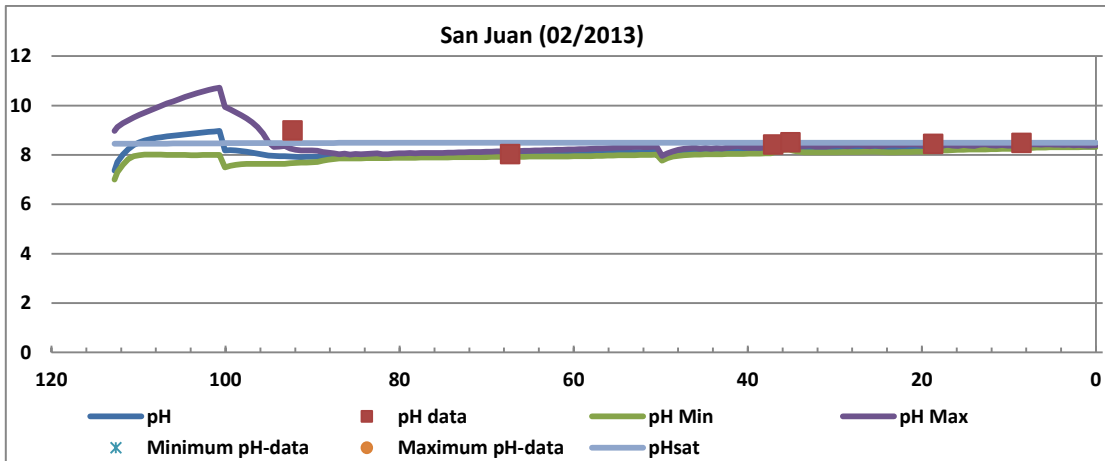
a) Reaereación



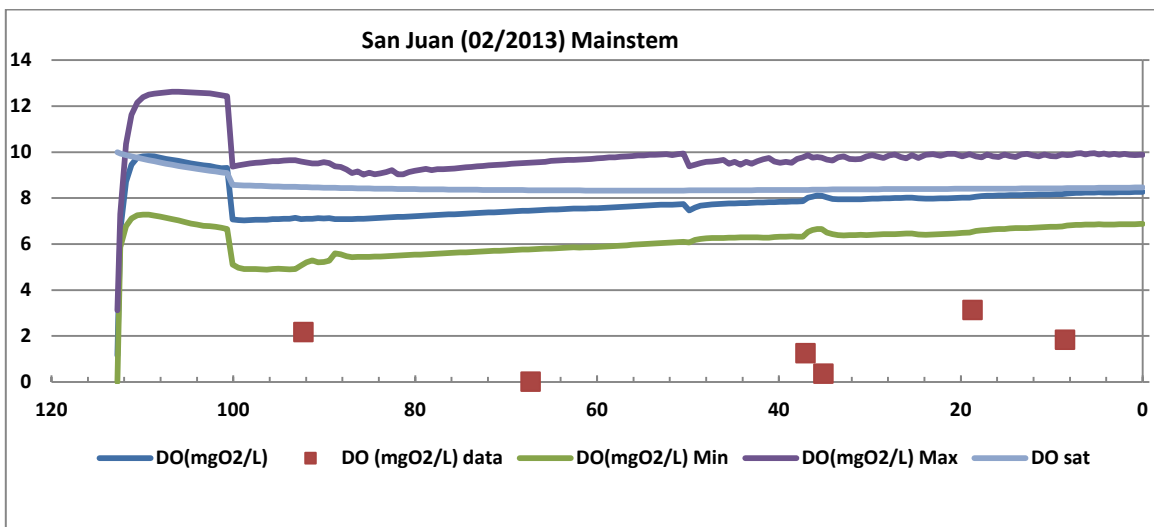
b) Temperatura



c) pH



d) Oxígeno disuelto

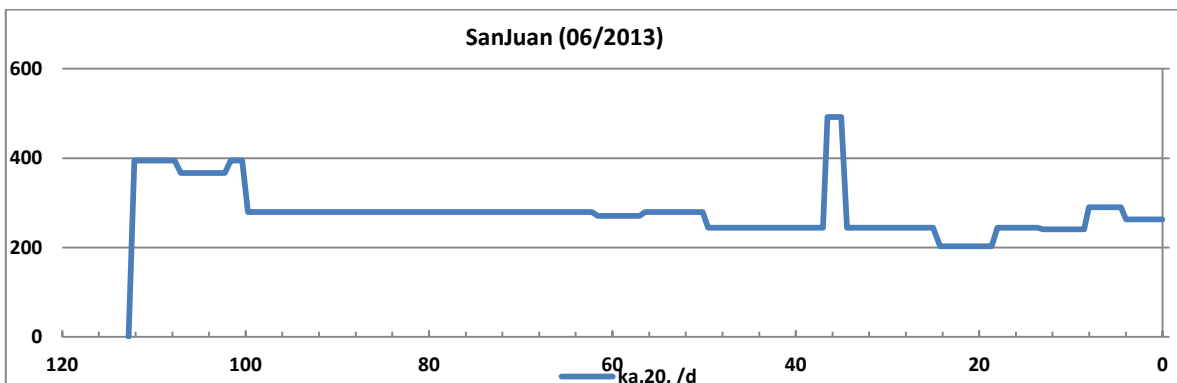


Gráfica 5. Resultados del modelo QUAL2K del cauce principal de la sub-cuenca San Juan del Río, durante el periodo seco (febrero 2013), para a) Re-aireación, b) Temperatura, c) pH, d) Oxígeno Disuelto.

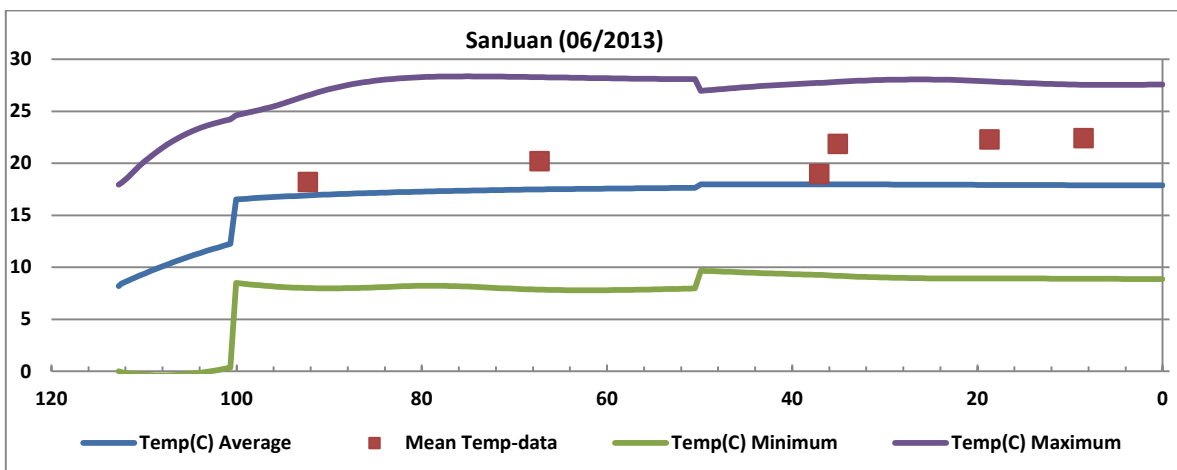
En la gráfica a) de re aireación se logra observar el comportamiento del río, es decir donde logra tener más turbulencia para volver a obtener oxígeno de la atmosfera, como se aprecia en el kilómetro 40 una subida súbita de re-aireación debido a que en este punto se encuentra una cascada, por lo que el modelo representa bien el cauce del río, en la gráfica b) de temperatura, es una medida del calor o energía térmica de las partículas en una sustancia. Ésta no depende del número de partículas. La temperatura del agua tiene gran importancia por el hecho de que los organismos requieren determinadas condiciones para sobrevivir. Este indicador influye en el comportamiento de otros indicadores de la calidad de agua, como el pH, el déficit de oxígeno, la conductividad eléctrica y otras variables fisicoquímicas; La elevación de la temperatura disminuye

la solubilidad de gases (oxígeno) e incrementa, en general, la solubilidad de las sales. También, aumenta la velocidad de las reacciones del metabolismo, acelerando, de esta manera, la putrefacción. La temperatura óptima del agua para beber está entre 10 y 15°C. (Davis M.L., 1998); como proyecta la gráfica b) el parámetro de temperatura tiene un comportamiento normal con lo que modela el QUAL2K y con los valores obtenidos en campo, la gráfica de pH (c) muestra un comportamiento similar el que muestra el modelo por lo cual el cauce tiene un comportamiento normal u optimo es dicho parámetro, la gráfica de oxígeno disuelto (d) representa la curva funcional del oxígeno disuelto, la gráfica muestra un máximo donde el nivel de calidad es excelente. Por lo que logramos concluir que los valores obtenidos en campo no entran en los valores marcados por el modelo, por lo cual podemos concluir que este valor es un problema grave en el cauce principal ya que no se logró correlacionar con los valores obtenidos por la modelación.

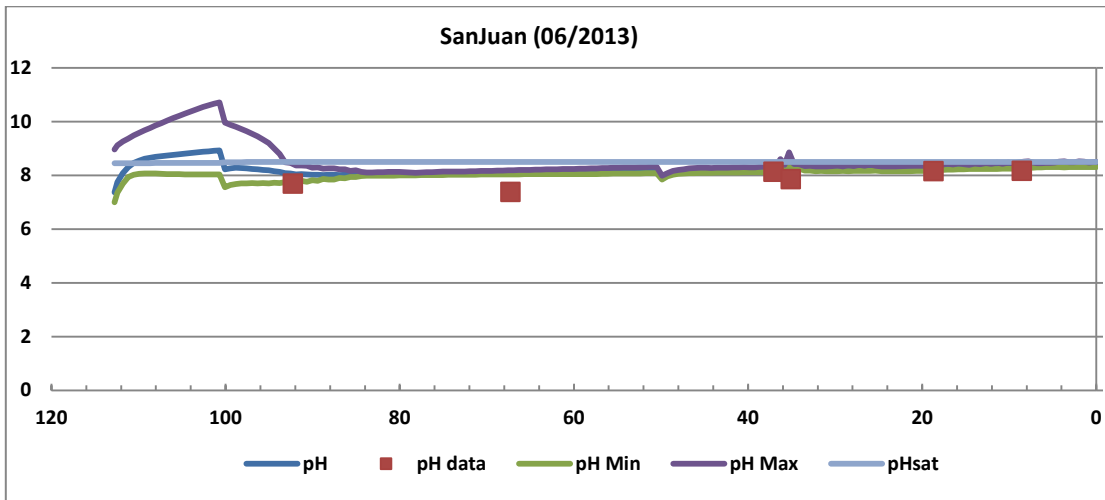
a) Reaereación



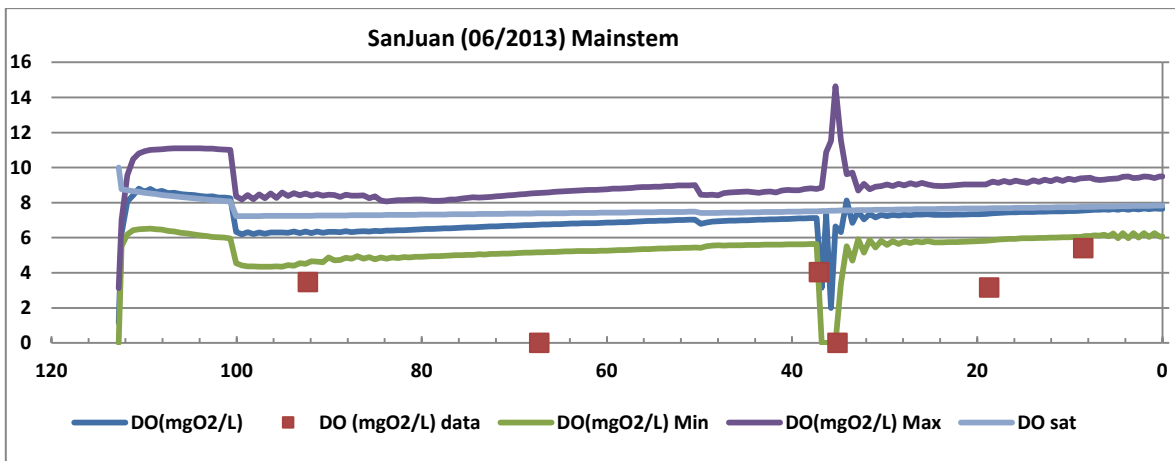
b) Temperatura



c) pH



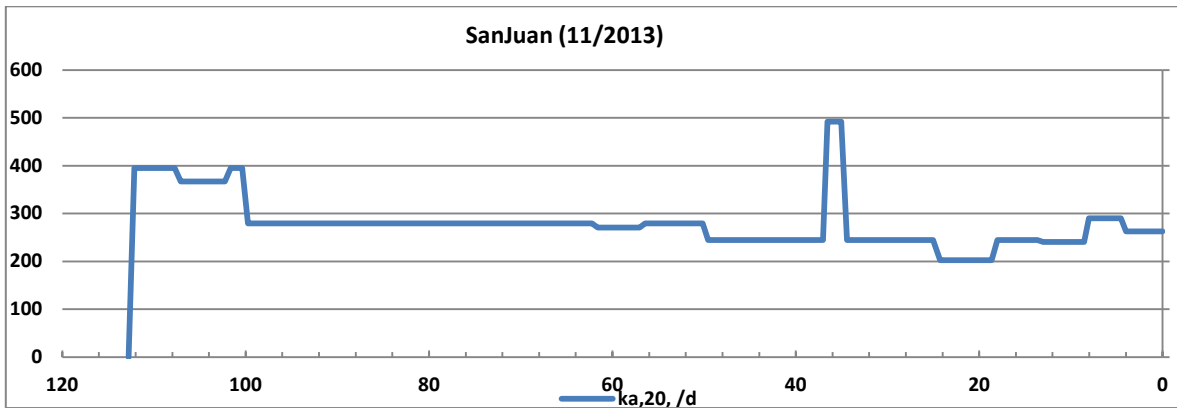
d) Oxígeno disuelto



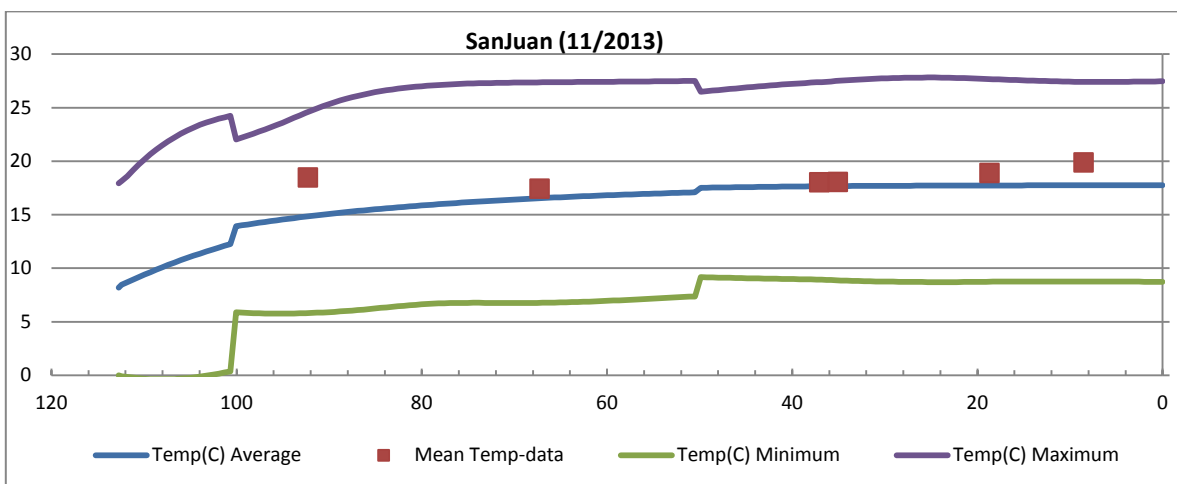
Gráfica 6. Resultados del modelo QUAL2K del cauce principal de la sub-cuenca San Juan del Río, durante el periodo de lluvias (junio 2013), para a) Reaeración, b) Temperatura, c) pH, d) Oxígeno Disuelto.

En la gráfica de temperatura (b), en el periodo de lluvias se logra observar un incremento de temperatura, sin embargo aún entra en condiciones óptimas de comportamiento del cauce del río principal, y en el mismo casi se encuentra la gráfica que representa el pH (c), y para la gráfica de oxígeno disuelto se logra observar un comportamiento diferente en como la turbulencia creada por una cascada que se encuentre en el punto del kilómetro 40 del río, entra el valor tomado en campo en valores considerables, sin embargo es importante tener este parámetro en cuenta debido a que en ninguna de las gráficas pasada entro en los valores aceptable para su modelación.

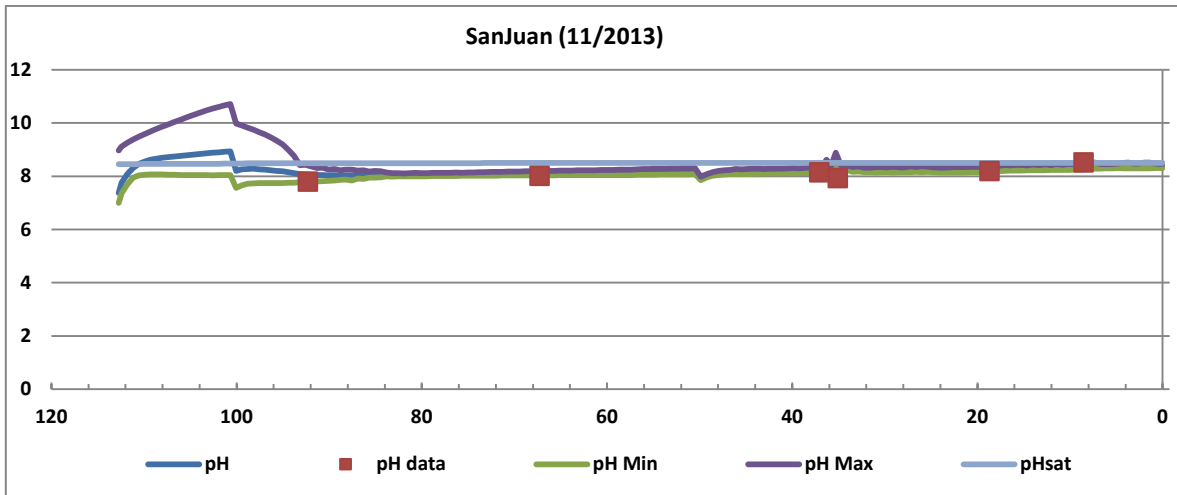
a) Reaereación



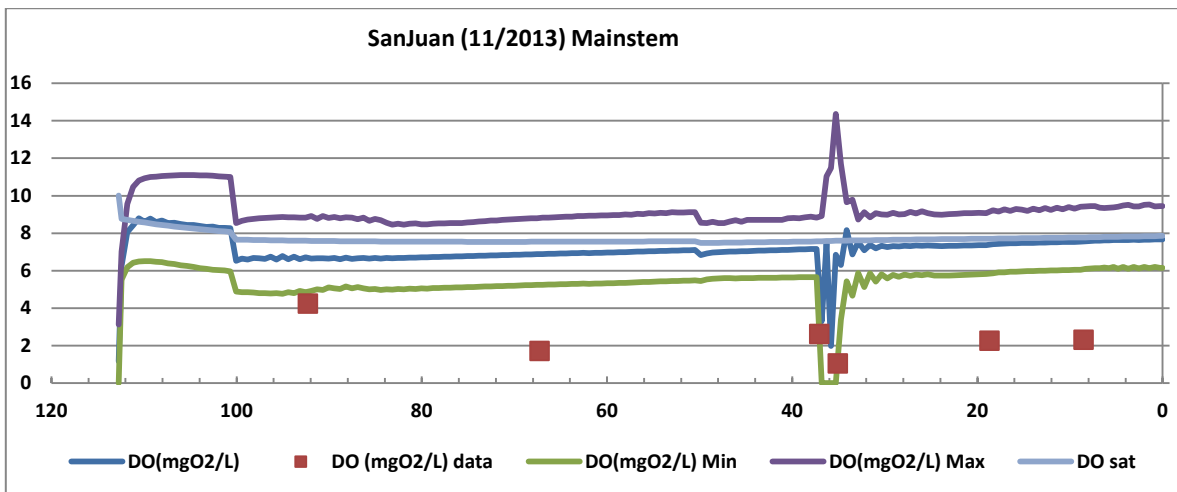
b) Temperatura



c) pH



d) Oxígeno disuelto



Gráfica 7. Resultados del modelo QUAL2K del cauce principal de la sub-cuenca San Juan del Río, durante el periodo de post-lluvias (noviembre 2013), para a) Re-aireación, b) Temperatura, c) pH, d) Oxígeno Disuelto.

Las gráficas presentes en la gráfica 7 muestra un comportamiento bastante similar a las presentes y descritas en la gráfica 5 debido a que estas son parámetros medidos en un periodo de post lluvias, sin embargo podemos concluir para la gráfica que representa el pH, el cual es un parámetro químico indicador de la calidad del agua que muestra la cantidad de iones hidrogenión (H^+) que posee el agua y que en última puede afectar la vida acuática presente en ellas. Se mide en un rango de 0 a 14 siendo 7 el valor medio ideal que debe presentar el agua de forma natural, pero valores entre 8-14 indican alta alcalinidad del agua, esto quiere decir que es baja la cantidad de H^+ , mientras en un rango entre 0-6 indica acidez del agua por alta concentración de este ion.

Para esta corriente modelada se observa que la calibración obtenida en ambos casos puede considerarse buena ya que los puntos de control presentan poca variabilidad y la línea modelada se encuentra en el rango medio de ellos. Los resultados muestran que el pH se encuentra en el rango ligeramente superior a 8 es decir denota un poco de alcalinidad de la corriente.

3.10 CONCLUSIÓN DE MODELACIÓN DEL CAUCE PRINCIPAL EN LA ZONA DE ESTUDIO

El sistema natural estudiado posee muchos factores que afectan su comportamiento, por lo tanto aumenta la complejidad en la modelación, ya que al ser un río de gran longitud y con caudales bajos. Esto genera que los resultados obtenidos en la modelación pierdan ajuste, ya que, las descargas no medidas aumentan considerablemente, lo anterior, debido a que quedaba fuera del alcance del Proyecto realizar la caracterización de las descargas marginales, extracciones y bombeos. La información señala la importancia de algunos parámetros en la calidad del agua del cauce principal de la sub-cuenca de San Juan del Río, y su comportamiento respecto a sus condiciones hidráulicas y ambientales.

El sistema natural en su parte alta o inicial, cuenta con valores dentro de lo normal del comportamiento del río es decir de autodepuración. Esto debido a las elevadas pendientes y, en general, a las características hidráulicas que promueven la re-aireación. Esta capacidad de autodepuración, se conjuga con pocas descargas, contaminantes, lo que da como resultado niveles altos de calidad del agua. Luego, en la parte media y baja, se dan condiciones de poca autodepuración gobernadas por las bajas pendientes y gran cantidad de descargas debido al cambio en el uso del suelo, esto a causa de que en esta parte, el uso del suelo es primordialmente urbano, de agricultura y desarrollo industrial, lo anterior, genera que la calidad del agua decaiga bruscamente, ya que la capacidad de autodepuración del río la sobrepasa las descargas de contaminantes, generando un “déficit” en la calidad del agua que se podría mejorar teniendo un mayor control de las descargas.

En la parte media y baja, se generan conflictos uso-calidad, debido a que las concentraciones de plomo monitoreadas en el estudio, superan los estándares definidos para distintos usos del agua como riego, recreación y abastecimiento. Por lo tanto se refiere a un problema por contaminación

de metales pesados posiblemente causados por las vertientes de las zonas industriales en desarrollo presentes en el área de estudio.

4. ALTERNATIVA DE TRATAMIENTO DE UN EFLUENTE INDUSTRIAL DE LA SUB-CUENCA SAN JUAN DEL RÍO

Debido a que en la sub-cuenca San Juan del Río, es una zona con un alto desarrollo industrial, es posible que en el futuro cercano, se cuente con alguna industria dedicada a la producción de biodiesel, por lo que el siguiente capítulo consiste en el tratamiento del efluente producido por la etapa de purificación del biodiesel proveniente por diferentes materias primas a nivel laboratorio.

4.1 ANTECEDENTES DE LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL

Existen diferentes fuentes de energías renovables y limpias como lo son; el viento, sol, olas, biomateriales y mareas; por lo cual se han convertido en una necesidad urgente, la investigación en fuentes de energía, debido a la a los problemas ambientales y disminución de energía derivado de combustibles de fuentes fósiles que causan una gran liberación de contaminantes provenientes de su quema, utilización en las diferentes industrias; por lo que es necesario tener fuentes de energía alternativas como la biomasa, que posean un gran potencial energético que logren cubrir las necesidades energéticas en el mundo moderno, como lo son el biodiesel y el bioetanol; ya que el biodiesel es una fuente de energía alternativa debido a que es obtenido a partir de aceites animales y vegetales, lo cual químicamente son ésteres de alquilo, de metilo y de etilo, esto representa una alternativa de sustitución del diésel que es derivado del petróleo, además de ser un producto no tóxico y biodegradable, es decir que prácticamente no produce un impacto sobre el medio ambiente (T. del N. J. García-Costa, 2009).

Los siguientes factores como lo son: crecimiento explosivo en el uso de energía, el incremento elevado de los costos de la energía, los limitados recursos de petróleo con los que se cuentan en la actualidad, además, de los problemas de contaminación que son consecuencias de dichos factores son algunas causas por las que es necesario contar con nuevas fuentes de energía alternativas, limpias, renovables y además amigables con el ambiente (Vlada B. Veljkovic, 2014). Sin embargo el combustible más utilizado es el petróleo, por lo que es un recurso de energía limitado, el cual

cuenta con una reserva mundial de 1,668.9 billones de barriles en el 2012, la cual se calcula que esta cantidad solo es suficiente para abastecer durante 53 años a nivel mundial, es decir que se puede proyectar una crisis energética, es por esto que se crea una reciente preocupación sobre nuevas tecnologías para fuentes de energía alternativas. ((BP), 2015)

Entre las fuentes de energía alternativa, ya mencionados entran los bio-combustibles, especialmente el biodiesel, el cual puede ser utilizado en motores de diésel convencional. Químicamente, el biodiesel es una mezcla de ésteres ácidos grasos mono-alcalinos, que contienen la calidad de combustible, los cuales están marcados en la norma europea EN14214 la cual señala los combustibles para automóviles y sus características de ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME) para los motores de diésel, sus requisitos y métodos de prueba; para obtener un biocombustible el cual es biodegradable y no tóxico, produce menos emisiones contaminantes y cuenta con un punto de inflamación alto, por lo que es más seguro. En general el biodiesel puede ser producido de fuentes renovables (como aceites vegetales y grasas animales) por una reacción llamada de “transesterificación”, esta reacción es la esterificación de los triglicéridos y ácidos grasos respectivamente, en donde se realizan dos reacciones utilizando alcohol adicionado en exceso para comenzar las reacciones (más comúnmente metanol), estas reacciones son catalizadas por un ácido o una base para mejorar las condiciones de rendimiento, y se utilizan como materia prima aceites vegetales y grasas animales con un gran contenido de triglicéridos.

El proceso para la producción de biodiesel se presenta a continuación en la figura 32. La cual se origina en una reacción de transesterificación alcalina, y posteriormente una separación de fases, en la cual se obtiene biodiesel y glicerina, purificación del biodiesel (lavados y secado), obtención de metanol. La que produce dicha reacción son ésteres metílicos los cuales se pueden clasificar como biodiesel solamente si cumple con las especificaciones estándar, tales como las marca la EN14214 (norma europea para la producción de biodiesel), por lo cual la etapa de purificación es esencial para la obtención de los parámetros de acidez que marca dicha norma, además de la aplicación práctica de los ésteres metílicos producidos (biodiésel bruto).

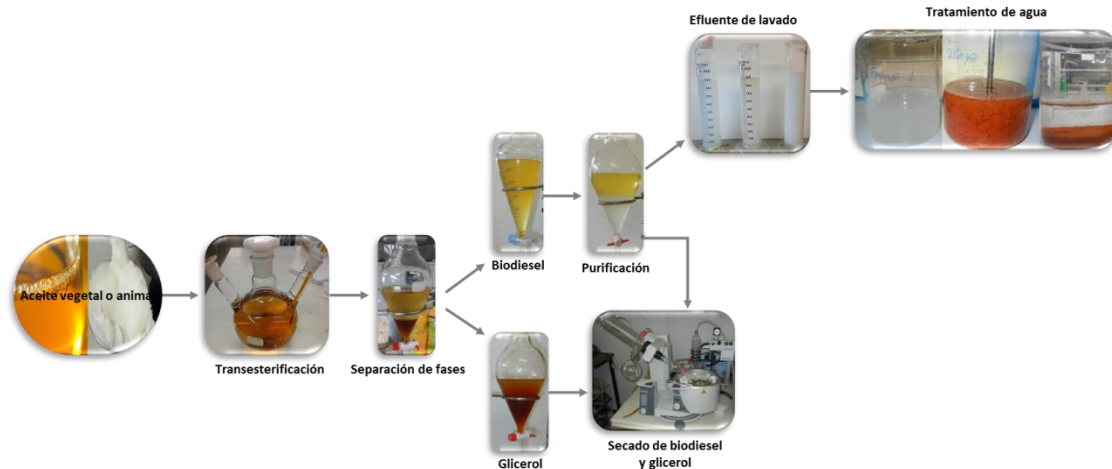


Figura 31. Representación de la producción de biodiesel por reacciones de transesterificación

Para la purificación del biodiesel se aplican dos métodos: a) lavado húmedo y b) lavado seco, el lavado húmedo es el más usado, ya que remueve los contaminantes y productos químicos del biodiesel, y es el único que genera los parámetros que marca la norma EN 14214, por ejemplo el lavado con agua destilada y caliente genera un biodiesel del 99% de pureza. (Karaosmanoglu F., 1996). El efluente generado por el proceso de purificación contiene los aceites vegetales o animales que no reaccionaron, además de catalizador, sales, jabones e impurezas inorgánicas.

Las aguas residuales del proceso de producción de biodiesel, son muy peligrosas para el medio ambiente debido a que sobrepasan los parámetros de calidad del agua, y no pueden ser vertidas a ríos, canales o lagos sin algún tratamiento previo. Se calcula que en la producción de biodiesel se produce alrededor de 6-8 L de aguas residuales por un litro de biodiesel producido; es por esto que es importante para el medio ambiente contar con un tratamiento óptimo para las descargas de este tipo de procesos, ya que cuenta con grandes cantidades de contaminantes y un gran volumen de efluente.

Esta investigación se centra en el tratamiento del efluente producido por la purificación del biodiesel de tres diferentes materias primas (aceite de soja, manteca de puerco y aceite de ricino), en la literatura revisada se encontraron diferentes métodos físicos, químicos, físico-químicos, electroquímicos y biológicos aplicados al tratamiento del agua en la parte de purificación de la producción de biodiesel basado en la reacción de alcalina de transesterificación. Por lo tanto el objetivo de este proyecto de investigación fue dar un método de tratamiento químico a dicho efluente

4.2 EL BIODIESEL

El biodiesel es un biocombustible que puede ser obtenido de diferentes materias primas, las cuales se engloban en: aceites vegetales, grasas animales y residuos de aceites usados (Bankovi Ili, 2012), donde la aplicación de cada material depende de los altos costos para su obtención y manipulación. El proceso de producción es logrado mediante reacciones de transesterificación, es decir, que dicha reacción se lleva a cabo entre un aceite y un alcohol (metano) en presencia de un catalizador, y esto nos da como consecuencias los mono-alquil ésteres (biodiesel) y glicerol, posteriormente se separan y se purifican (lavado), dándonos como resultado un biocombustible compuesto de ésteres mono-alquílicos de ácidos grasos de cadena larga derivados de lípidos renovables. (Gómez, 2010)

Los biocombustibles, son una alternativa para sustituir o mezclar los combustibles de origen fósil debido a su compatibilidad con el medio ambiente y a que se obtienen a partir de recursos renovables, sin embargo, muchos de los procesos diseñados e implementados en la industria para la producción de biodiesel, se ven limitados por los altos costos de producción, causados por las restricciones impuestas por el equilibrio químico, reacciones reversibles y compleja separación y purificación del biodiesel (Sánchez, 2010), teniendo como resultado grandes cantidades de efluentes contaminados con grasas y/o aceites, pH elevado, sólidos suspendidos totales, etc.

De acuerdo con el anexo III de la Directiva 2009/28 / CE del Parlamento Europeo y del Consejo Europeo del 23 de abril de 2009, define el biodiesel como un "éster metílico producido de aceite vegetal o animal, teniendo la calidad del diesel, para utilizarlo como biocombustible " (Parlamento de la Unión Europea, 2009). La palabra biodiesel proviene del griego: bio, que es vida y Diesel, por su creador Rudolph Diesel se refiere a un biocombustible a partir de biomasa. Este biocombustible es identificado como FAME (por sus siglas en inglés Fatty Acid Methyl Ester) o también es llamado éster metílico.

La tabla 20, presenta las propiedades generales que contiene el biodiesel

Tabla 20. Propiedades de biodiesel (Demirbas, 2008)

Nombre químico	Ésteres etílicos de ácidos grasos
Formula molecular	C14-C24 en ésteres metílicos
Viscosidad cinemática (mm²/s)	3.3-5.2
Masa volumétrica (kg/m³)	860-894
Punto de inflamación (°C)	157-182
Solubilidad en agua	Insoluble
Aspecto físico	Limpio, amarillo claro a oscuro
Olor	Ligero olor a jabón
Biodegradabilidad	Biodegradable

Las ventajas que presenta el biodiesel son:

- i) La producción, almacenamiento, transporte y uso se realiza de una manera fácilmente, ya que es biodegradable y tiene un alto punto de inflamación;
- ii) Es un gran lubricante motor, aumentando su vida útil;
- iii) El biodiesel reduce el dióxido de carbono liberado a la atmósfera (reducido las emisiones que contribuyen al calentamiento global)
- iv) Está libre de sulfatos y los hidrocarburos aromáticos resultantes de la combustión
- v) Baja toxicidad y alta biodegradabilidad en comparación con diésel.
- vi) Utiliza como materia prima aceites y grasas vegetales los cuales son recursos renovables (Borges, 2012)

4.2.1 PRODUCCIÓN DE BIODIESEL

La técnica utilizada para la producción de biodiesel es el proceso de transesterificación por ser más económica y menos compleja, ya que consiste en una reacción química, en la cual se hace reaccionar la materia prima (aceite o manteca) con un alcohol (metanol) en exceso en presencia de un catalizador (NaOH o KOH), esto nos da como resultado la producción de biodiesel y glicerol, esta reacción es realizada por los FAME (fatty acids methyl esters) que son los ésteres metílicos de ácidos grasos. Las reacciones presentes en la producción de biodiesel se presentan a continuación en la figura 33.

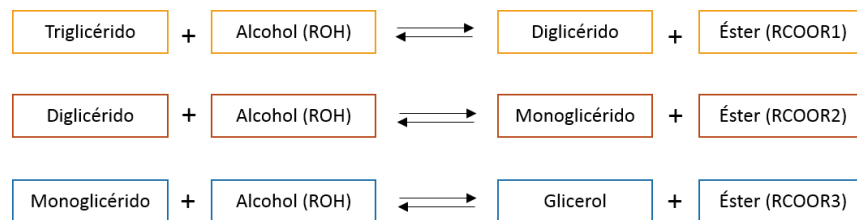


Figura 32. Reacciones reversibles en el proceso de producción de biodiesel (Freeman, 1986)

Estas reacciones son reversibles consecutivas y consisten en que la primera reacción pasa de triglicéridos a diglicéridos, después de diglicéridos a monoglicéridos y de monoglicérido a glicerol, produciendo metil éster de cada glicerol por cada reacción (figura 33). Es decir que la producción de biodiesel por transesterificación, hace referencia a una reacción catalizada donde mediante el uso de un alcohol los triglicéridos son transformados a alquil-ésteres y glicerol como subproducto; la transesterificación es la ruta más común, rápida y fácil para la producción de biodiesel y se lleva a cabo a velocidades de reacción altas es decir a tiempos cortos de reacción y a bajas temperaturas de entre 60-65 °C. Para esto es necesario tener un exceso de alcohol para que se realice la reacción debido a que es reversible, se necesita desplazar el equilibrio hacia la producción de ésteres. La reacción estequiometría requiere un mol de un triglicérido y tres moles de alcohol; sin embargo, se usa alcohol en exceso para aumentar la producción de ésteres alquílicos y permitirles separar el glicerol de la fase formada. Por lo que se utilizó en la fase experimental una relación molar 1:6; es decir un mol de triglicérido por seis moles de metanol, para optimizar el exceso de alcohol en el proceso de transesterificación. Como se observa en la siguiente figura 34.



Figura 33. Proceso de transesterificación con metanol y catalizador.

La conversión y rendimiento de la reacción de transesterificación se ven afectados por diferentes variables como lo son:

- Relación molar de alcohol a aceite
- La temperatura
- Impurezas de materia prima
- Catalizador
- Tiempo de reacción
- Velocidad de mezclado

Una relación molar de 6:1 (alcohol: aceite) es recomendada para la óptima conversión de triglicéridos. Relaciones menores resultan en bajas conversiones y el exceso de etanol causa problemas en la separación del glicerol e incrementa los costos debido a la separación de etanol. (Freedman, 1998)

El alcohol utilizado, es el metanol debido a que es el alcohol de mayor uso, por ser el de menor costo, para la reacción de producción de biodiesel se requiere también de un catalizador; usualmente una base fuerte; en el cual utilizamos catalizadores homogéneos como el hidróxido de potasio (KOH) para el aceite de ricino y el hidróxido de sodio (NaOH) para la manteca de puerco y el aceite de soja.

4.3 MATERIAS PRIMAS UTILIZADAS PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL

Las materias primas utilizadas para la producción de biodiesel son principalmente aceites vegetales (estado líquido a temperatura ambiente, producido por las plantas, bajo grado de saturación) y grasas animales (sólidos a temperatura ambiente y con alta saturación). Los

principales componentes de los aceites vegetales y grasas animales son Triglicéridos: los aceites vegetales y las grasas animales contienen diferentes tipos de ácidos grasos, que es su diferencia (grasas animales tienen un contenido más alto de ácidos grasos saturados).

Las materias primas más utilizadas y seleccionadas para la producción de biodiesel en el presente trabajo de investigación son: el aceite de soja, de la marca "OliSoja", aceite de ricino comercial con número CAS 80004-26-1 y manteca de puerco de la marca "Auchan" (figura 35), por sus cualidades en contenido de ácidos grasos saturados, proporcionadas por el laboratorio F203, de tratamiento de residuos del departamento de Ingeniería de Minas y Metalurgia, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Porto, en Portugal.



Figura 34. Materias primas utilizadas en la producción de biodiesel

4.3.1 CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

La caracterización de las materias primas se realiza para conocer los siguientes parámetros, y obteniendo los valores que marca la normatividad, para valorar si dicho material puede utilizarse para obtener biocombustible (biodiesel), la norma que marca las características del biodiesel es la norma europea NE-14214.

4.3.2 ÍNDICE DE ACIDEZ

La caracterización de la materia prima se realiza a través de la determinación del índice de acidez, este valor es fundamental, debido a que la acidez de la materia prima indica en miligramos de hidróxido de potasio necesarios para neutralizar los ácidos grasos libre presentes en un gr de

grasa, determinado de acuerdo al procedimiento descrito en la norma portuguesa “NP EN ISO 660:2002” la cual se llama “Determinación del índice de acidez y la acidez para aceites y grasas animales y vegetales”, el cual define el valor de acidez como: el contenido de ácidos grasos libres determinados a continuación la cual se expresa en porcentaje en peso.

4.3.3 PROCEDIMIENTO DE OBTENCIÓN DE ÍNDICE DE ACIDEZ SEGÚN SU MATERIA PRIMA

El valor de acidez nos ayuda a saber si es posible producir el biodiesel, si se logra realizar por una reacción de transesterificación básica homogénea debido a que tolera una acidez inferior a 2 mg KOH, ya que también influye en la presencia de ácidos grasos libres en el producto final.

Se siguió el procedimiento descrito en la norma NP EN ISO 660 del 2002, para la obtención del índice de acidez. Dependiendo de la naturaleza de la materia prima, se sugieren métodos para dicha determinación, de modo que se utilizaron los siguientes métodos para cada tipo de materia prima:

Tabla 21. Métodos para la medición del índice de acidez.

Materia prima	Método de medición de índice de acidez
Aceite de Soja	Disolvente frío
Aceite de Ricino	Disolvente frío
Manteca de puerco	Etanol caliente

Los métodos mencionados en la tabla 21 se describen a continuación:

- **Disolvente frío:** Se pesaron 20 g de la muestra de materia prima (aceite de soja y de ricino) en un vaso de precipitados, en otro vaso de precipitado se colocan 100 mL de solución de éter dietílico y etanol al 96% (1 V/V 1) y es neutralizado previamente con hidróxido de potasio (KOH) de 0.1M (solución estándar) añadiéndole 0.3 mL de fenolftaleína, para observar el cambio de color a rosa. Esta solución previamente neutralizada se coloca a la muestra de materia prima para posterior mente neutralizarla de la misma manera. Se realizaron las pruebas por duplicado para obtener un porcentaje de error mínimo.
- **Etanol caliente:** Se pesaron, 20 g de muestra en un vaso de precipitados. En otro matraz que contiene 0,5 mL de fenolftaleína y 50 mL de etanol al 96% se colocó en una placa

caliente, aumentando su temperatura para obtener que la mezcla llegue a su punto de ebullición; es decir que con la temperatura por encima de 70 °C etanol, se neutralizó con la solución estándar de KOH de 0.1 M (solución estándar). Entonces se añadió a la muestra la solución de etanol neutralizado, después de un lapso de enfriamiento, se procediendo posteriormente a la titulación con KOH 0,1 M (solución de estandarizado). Se realizaron las pruebas por duplicado para obtener un porcentaje de error mínimo.

Calculo para índice de acidez

La fórmula es la siguiente:

$$IA = \frac{M_{KOH} * V_{KOH} * C_{KOH}}{m}$$

Donde:

M_{KOH} = Masa molar de KOH

V_{KOH} = Volumen gastado de solución del titulante

C_{KOH} = Concentración de KOH

El valor del índice de acidez se expresa en mg de KOH/g de muestra.



Figura 35. Resultado de titulación

Aplicando la metodología descrita para el índice de acidez se obtuvieron los siguientes resultados presentados en la tabla 22, de tal manera que se compara el valor que marca la norma europea 14104.

Tabla 22. Resultados de índice de acidez de las diferentes materias primas.

Materia prima	Aceite de Soja	Aceite de Ricino	Manteca de Puerco	EN 14104
Índice de acidez (mg KOH/g)	0.30	0.33	0.5	MAX 0.5
Desviación Estándar	0.001	0.052	0.274	-

Por lo tanto con los valores obtenidos de la tabla 22, podemos concluir que estas materias primas son aceptables para realizar la producción de biodiesel con una reacción de transesterificación homogénea básica, debido a que no superan el valor marcado por la norma EN 14104.

4.4 METODOLOGIA EMPLEADA PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL

La figura 37 representa las etapas empleadas para la producción de biodiesel de tres tipos diferentes de materia prima como lo son: el aceite de soja, aceite de ricino y manteca de puerco, para la obtención de diferentes efluentes de agua resultantes del lavado del biodiesel que se realiza para mejorar la calidad de este.

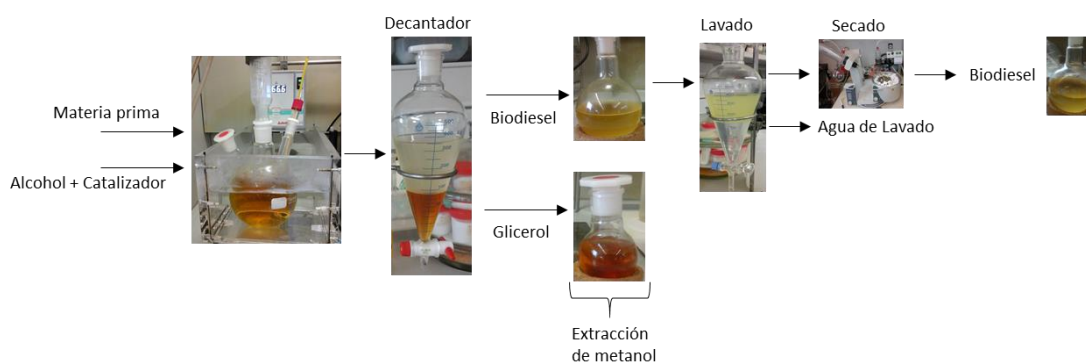


Figura 36. Procedimiento utilizado en la producción de biodiesel

A continuación en la tabla 23 se presentan los parámetros utilizados para la realización de la producción de biodiesel.

Tabla 23. Parámetros utilizados en la producción de biodiesel (Araújo, 2011), (Joana M. Dias, 2008), (Dias, 2008)

Variables	Aceite refinado	Aceite de	Manteca de
-----------	-----------------	-----------	------------

	de soja	ricino	puerco
Cantidad de materia prima (g)	500	500	500 g
Temperatura de reacción (°C)	65	65	65
Tiempo de reacción (h)	1	8	1
Tiempo separación de fases	45 min	10 – 16 h	45 min
Agitación Magnética	Constante		
Razón molar alcohol: aceite/grasa	6:1	6:1	6:1
Alcohol (metanol)	Pureza 99.8 % (m/m)		
Vacío para recuperación de alcohol en Rotavapor	Max. 200 mbar		
Catalizador	NaOH	KOH	NaOH
Concentración (%m_{cat}/m_{aceite/grasa})	0,8	1	1
Pureza (%m/m)	97	85	97

4.4.1 PROCEDIMIENTO DE PRODUCCIÓN DE BIODIESEL POR TRANSESTERIFICACIÓN BÁSICA HOMOGÉNEA

El método de transesterificación con metanol fue el método empleado para la producción de biodiesel, con tres diferentes tipos de materia prima los cuales son: aceite de soja, aceite de ricino y manteca de puerco, donde el catalizador utilizado para el aceite de soja y la manteca de puerco fue el hidróxido de sodio (NaOH) y para el aceite de ricino el hidróxido de potasio (KOH). El catalizador es disuelto en el alcohol en un pequeño reactor, (figura 38. Reactor de biodiesel). La ausencia de agua en la materia prima y durante la reacción global es importante a fin de evitar una posible hidrólisis de ésteres y producción de jabón de ácidos grasos libres formados. (Knothe, 2005)

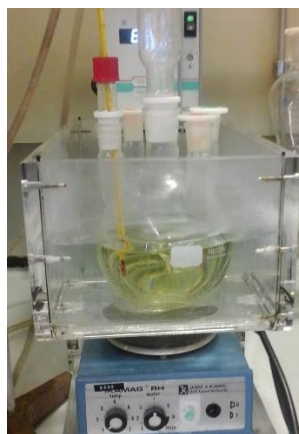


Figura 37. Reactor de biodiesel.

El aceite es transferido al matraz bola (reactor) y después se le añade lentamente la mezcla del catalizador/alcohol. La mezcla se agitada a una temperatura 65 °C, y un tiempo de reacción de 60 minutos para el aceite de soja y la manteca de puerco y un tiempo de reacción de 8 horas para el aceite de ricino a una presión ambiente. Al finalizar el tiempo de reacción de transesterificación exitosa produce dos fases líquidas: éster (biodiesel) y glicerina. Dichas fases, es decir, la mezcla de la materia prima, el catalizador y alcohol se colocan en un embudo de separación en donde se recolecta la glicerina mediante separación de fases después de un tiempo de separación (reposo) de 45 min para el aceite de soja y la manteca de puerco, mientras que para el aceite de ricino la separación fue después de 14 horas de reposo. La separación de fases se logra observar en la figura 39.



a) Aceite de Soja b) Manteca de Puerco c) Aceite de Ricino

Figura 38. Separación de fases según su materia prima

Posteriormente del tiempo de separación (reposo) de fases, se colocan por separado el glicerol y al biodiesel producido, como se muestra en la figura 40.

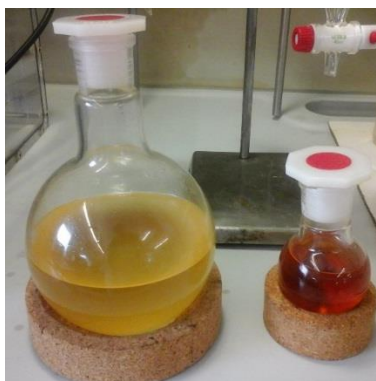


Figura 39. Separación de fases

A cada fases (biodiesel y glicerol) se le extrae el metanol utilizado en la reacción, es decir que se colocan las soluciones separadamente; el biodiesel y glicerol en el rotavapor a presión reducida de 600, 400 y 200 mbar y a una temperatura de 65 °C, para dicha extracción hasta que por evaporación y condensación se extraiga todo el metanol (figura 41).



Figura 40. Rotavapor utilizado para la extracción del metanol

A continuación se realiza el proceso de lavado de biodiesel para su purificación. La fase de lavado se realizó con agua destilada que tenía un pH de 5.72 - 5.77 utilizando un 50% de agua (v / v) hasta que el pH del agua de lavado era casi igual al del agua destilada. Para extraer el agua residual del biodiesel, se colocó nuevamente en el rotavapor para extraerle cualquier cantidad de agua adherida al biodiesel, debido a el agua contenida en el biodiesel puede genera corrosión y produce jabón, este proceso de secado del biodiesel se realizó, a una temperatura de 80 °C a las presiones de 600, 400 y 200 mbar con una duración de dos horas para dicha etapa, con el biodiesel sin agua y purificado se filtró para quitarle cualquier exceso de jabón que pudiera generar el lavado, para finalmente almacenarlo correctamente en el laboratorio donde se realizaron las diferentes síntesis.

4.4.2 RENDIMIENTO DE LA PRODUCCION DE BODIESEL

El rendimiento de la producción de biodiesel, es necesario para tener en cuenta la viabilidad del proceso y la eficiencia de la transformación de materias primas en biodiesel debido a que es necesario determinar su rentabilidad a nivel industrial. Los principales factores que influyen en el rendimiento del producto son: la materia prima; la cual puede conducir a la formación de ácidos grasos libres, lo que resulta en la formación de jabones cuando reaccionan con el catalizador, y algo que se debe de tomar en cuenta para mejorar la calidad del biodiesel; es la fase de lavado es decir la purificación de este, ya que pueden conducir a la pérdida de producto. A través de la relación de porcentaje entre la cantidad de biodiesel obtenido y la cantidad materia prima.

Para evaluar dicho rendimiento se aplica la siguiente formula:

$$\text{Rendimiento del producto} = \frac{\text{Peso del producto final (biodiesel)}}{\text{Peso de la materia prima inicial}} \times 100$$

Dando como resultado los siguientes rendimientos presentes en la tabla 24.

Tabla 24. Rendimiento de producción de biodiesel según su materia prima

Materia Prima	Aceite de Soja	Manteca de Puerco	Aceite de Ricino
Rendimiento %	90.62	73.08	74.28
Coficiente de varianza (%)	0.85	3.14	-

Como se puede apreciar al aceite de soja tiene una conversión mayor en el proceso de transesterificación, sin embargo el aceite de ricino y la manteca que puerco tienen rendimientos similares debido a que la manipulación de la manteca de puerco es difícil ya que al momento de decantación (separación) y enfriamiento se endurece la glicerina teniendo mayores pérdidas al momento de ser separadas, y el aceite de ricino por su difícil manejo ya que posee una viscosidad muy elevada y se dificulto el número de lavado debido a la gran cantidad de jabón que producía.

4.5 PURIFICACIÓN DE BODIESEL

El lavado del biodiesel (éster), tiene como objetivo principal neutralizar y remover del producto, residuos del catalizador, glicerina, jabón, sales, aceite, alcohol (Atadashi IM, 2011). Por lo que el

proceso de lavado es después de extraer el exceso de alcohol en el biodiesel y glicerina con extracción por vacío en un rotavapor, el número de lavadas fue de 15 a 26 lavadas hasta tener una aclaración del agua y un pH cerca del pH inicial del agua destilada; obteniendo una cantidad de efluente de 3 a 4 Lt por síntesis (figura 42). La gran cantidad de agua generada en la purificación de biodiesel depende del método de purificación, sin embargo se han reportado valores de efluentes de 20 L (Ken-ichiro Suehara, 2005), 20 – 120 L (Srirangsan A., 2009), y 300 L (De Boni LAB, Goldani E., Milcharek CD, Santos CD, Dos FA. , 2007) por cada 100 L de biodiesel.

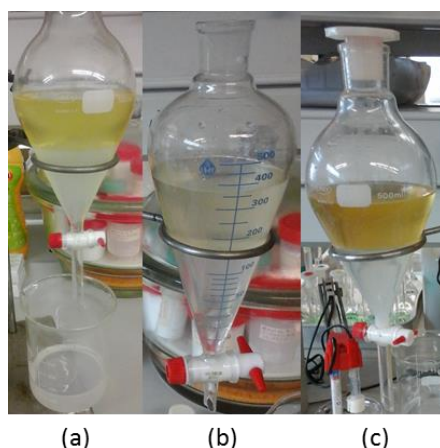


Figura 41. Lavado de biodiesel a) Aceite de soja, b) Manteca de Puerco, c) Aceite de Ricino

Después del lavado se pasó el biodiesel a secarlo en el rotavapor para extraer cualquier presencia de agua a una temperatura de 80°C a presiones de 600, 400, 200 mbar a 60 rpm. Este proceso es necesario para obtener los patrones y especificaciones de calidad que exigen la norma de la unión europea EN 14214:2003.

El efluente obtenido de la purificación del biodiesel es un líquido un poco viscoso y de color blanco opaco, que contiene un pH básico (pH: 9-10), y gran contenido de aceite, sales solubles, jabones e impurezas orgánicas, por lo tanto se puede concluir, que este efluente es muy cargado de materia orgánica con un pH alto en el caso de la utilización proceso de producción homogénea alcalino con un alto contenido de aceites y grasas. (Jaruwat, 2010)

Las ventajas de lavado con agua para la purificación del biodiesel son que es una manera simple y efectiva de purificar el biodiesel, es un método eficiente para remover glicerina y metanol como también compuestos solubles y jabón del biodiesel, es posible una purificación del 99% de

biodiesel, y también se encuentran las siguientes desventajas: se requieren de cantidades grandes de agua destilada, aumenta el costo y tiempo de producción, (Vlada B. Veljkovic, 2014) el agua residual contiene grandes cantidades de grasas y aceites, quitando la posible cantidad de agua que se agregue al biodiesel es necesario incrementar el costo de la energía necesaria para este proceso, posible producción de grandes cantidades de jabones por lo que pueden generar en rendimientos menores en la producción de biodiesel, y alterar las propiedades del biodiesel, genera grandes cantidades de agua que es necesaria tratar para su reuso o desecho, etc. (Ivan J. Stojkovic, 2014)

Para el proceso de lavado se adiciono un 50 % de agua al volumen del biodiesel, con el objetivo de neutralizar la solución que ya estaba básica por tener NaOH o KOH como catalizador. La solución fue agitada lentamente para no generar un exceso de jabón, siendo posteriormente dejada en reposo para separar el biodiesel del agua en un embudo de separación. Como la fase acuosa queda en el fondo del embudo se extrae dicha agua y se mide el pH, hasta llegar a un pH neutro.

Consecutivamente se realizó una caracterización inicial al efluente de agua proveniente de la purificación de biodiesel producido con tres diferentes materias primas ya mencionadas, midiendo los siguientes parámetros que se muestran en la tabla 25.

Tabla 25. Caracterización típica de un efluente residual de agua en la producción de biodiesel. (Rattanapan, 2011)

Parámetro
pH
Demanda química de oxígeno (DBO5) (mg O2/L)
Demanda química de oxígeno (DQO) (mg O2/L)
Aceites y grasas (mg/L)
Solidos suspendidos disueltos (SST) (mg/L)
Fosforo total
Conductividad
Temperatura
Decreto-Lei 236/98, que definen los valores límite de emisión (VLE) para descarga de aguas residuales.

Dichos parámetros son establecidos en el Decreto-Ley Portugués nº 236/98. Donde se establecen los criterios y objetivos de calidad del agua residual con el fin de proteger el medio ambiente acuático y mejorar la calidad del agua en términos de sus principales usos, la definición de los requisitos que deben observarse en el uso del agua para los siguientes propósitos: agua potable,

agua para la acuicultura de soporte de vida, el baño y el agua de riego; así como las normas de descarga de aguas residuales en aguas y suelos. (Ambiente, 1998)

Los parámetros mencionados en la tabla 26, fueron caracterizados de la siguiente manera mencionada en la tabla 26, los cuales son descritos en la siguiente sección.

Tabla 26. Métodos establecidos para la medición de parámetros de calidad de agua (American Public Health Association, 2005).

Parámetro	Metodo
pH	Standard Methods 4500-H ⁺ B. Electrometric Method
DBO5 (mg O2/L)	Standard Methods 5210 B. 5-Day BOD Test
DQO (mg O2/L)	Standard Methods 5220 B. open Reflux Method
Aceites y grasas (mg/L)	Standard Methods 5520 C. Partition- Infrared Method
SST (mg/L)	Standard Methods 5240 D. Total Suspended Solids Dried at 103-105 °C
Fosforo total (mg/L P)	Standard Methods 4500.B and 4500.E
Conductividad (µS/cm)	Standard Methods 2510 B. Laboratory Method
Temperatura (°C)	Standard Methods 5550 B. Laboratory and Field Methods
Decreto-Lei 236/98, que definen los valores límite de emisión (VLE) para descarga de aguas residuales.	

4.6 MATERIALES Y METODOS DE MEDICIÓN

4.6.1 VALOR DE pH

Obtener el valor de pH es un parámetro muy importante para el uso y tratamiento del agua, ya que por este valor dependen los procesos de neutralización, precipitación, coagulación, corrosión etc., dependiendo de la temperatura la intensidad de carácter ácido o básico en la solución indica el pH es decir la actividad del ion de hidrogeno. La alcalinidad, la acidez y la neutralización son las tres diferentes maneras en las que el agua puede presentarse, el pH es definido como $-\log (H^+)$, que es la intensidad de acidez (Sorenson, 1909), sin embargo para realizar las mediciones de pH utilizamos un potenciómetro, el cual utiliza un principio electrométrico donde determina la actividad de los iones de hidrogeno usando un electrodo de bulbo de cristal el cual contiene una concentración de HCl en contacto con el hidrogeno para su medición; estas mediciones pueden ser afectadas por el color, turbidez, salinidad y temperatura de la solución acuosa a medir. (American Public Health Association, 2005). Como lo marca el método de Standar Methods 4500-H⁺ B. Electrometric Method para la medición del pH se basa en el principio electrométrico

determinando la actividad de los iones de hidrogeno por el potencial eléctrico, usando un electrodo de hidrogeno estándar, el cual consiste en un electrodo de platino con gas de hidrogeno, con lo cual la fuerza electromotriz produce en el cristal del electrodo un sistema con variaciones lineales con el pH. Esta relación linear se describe midiendo los diferentes buffers (4, 7, 10), así el pH de la muestra entra interpolando los datos de actividad de los iones H^+ , definido por la operación potencio métrica de la escala del pH.

Para la medición del pH se utilizó un potenciómetro de marca CRISON, modelo GLP 21 como se muestra en la figura 43.



Figura 42. Potenciómetro utilizado para la determinación de pH.

4.6.2 CONDUCTIVIDAD

La conductividad es la habilidad que tiene una solución acuosa para poseer corriente eléctrica, esta habilidad depende de los iones y temperatura que tenga; en la concentración, movilidad y balance de estos; (American Public Health Association, 2005) las moléculas orgánicas presentes en el efluente de agua obtenido no se disocian es por esto que tenemos valores bajos de conductividad. Se tomó la conductividad en la muestras de los diferentes efluentes mediante un conductímetro proporcionado por el laboratorio de química de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Porto.

4.6.3 DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO)

La demanda química de oxígeno se define como la cantidad específica de oxígeno que reacciona en una muestra bajo condiciones controladas, la cantidad de oxidante consumida es expresada en cantidad de oxígeno equivalente, el cual consiste en cuanto se logra oxidar el $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ y al Cr^{3+} , este proceso puede ser alterado por el tiempo de reacción del método, reactivos, y la concentración de la muestra. Existen diferentes métodos para la obtención de dicho parámetro por lo cual se optó por utilizar el método de reflujado abierto; ya que se utiliza para muestras con grandes valores de demanda química de oxígeno, y tiene menor porcentaje de error. El proceso se describe en el anexo 1.

4.6.4 DEMANDA BIOLÓGICA DE OXÍGENO (BOD)

La demanda biológica de oxígeno es determinada empíricamente en pruebas y procesos estandarizados de laboratorio ya que esta determina el oxígeno necesario consumido por microorganismos presentes en la muestra, bajo condiciones específicas; la prueba mide el oxígeno molecular utilizado en un periodo de incubación de degradación bioquímica de la materia orgánica y el oxígeno usado para la oxidación de la materia orgánica, sulfuros, iones ferrosos y nitrógeno. El estándar Method 5210 B. 5-days BOD Test, se basa en la incubación por 5 días de la muestra diluida en recipientes de un mismo tamaño a temperatura constante (20 °C), se mide el oxígeno inicial y después de 5 días el oxígeno final. Como se puede ver en el anexo 2.

4.6.5 FOSFORO TOTAL

El fósforo se encuentra presente en el agua y aguas residuales de manera natural como fosfatos, se encuentra comúnmente en solución, en partículas o en detritus (materia orgánica en descomposición); el fósforo tiene diferentes fuentes de origen ya sean provenientes de fuentes de detergentes fertilizantes, y procesos biológicos de la biota del agua; el fósforo es un elemento esencial para el crecimiento y desarrollo de diferentes organismos como nutriente y limitante para la producción primaria en el agua.

La determinación de este elemento analíticamente puede ser realizado de dos formas a) con la conversión del fosforo de interés disuelto en orto-fosfato y b) el método por colorímetro la cual determina el orto-fosfato disuelto. (American Public Health Association, 2005), por lo cual se utilizó el método b) por colorímetro como se describe en el anexo 3.

4.6.6 SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES

Los sólidos y los suspendidos totales en el agua generan un aspecto no agradable, es por eso que se tiene un límite de 500 mg de solidos por litro para el agua potable. Los sólidos totales es el término que se usa, para definir al material que queda después de evaporar el agua de una muestra a una temperatura determinada, esto incluye a los sólidos suspendidos totales, este término se define como la porción total retenida en un papel filtro de una muestra de agua determinada, y solidos disueltos totales se definen; como la porción de solidos que pasan por el papel filtro, el papel filtro utilizado para dicha medición, estaba compuesto de microfibra de vidrio, con un diámetro de 47 mm, y con poros de 1.2 μm , se le dio un pre-tratamiento de lavado con agua destilada y secado a 105 °C por dos horas, para eliminar cualquier posible contaminación que pudiese tener; debido al tipo de papel filtro, el tamaño del poro, la porosidad, área y espesor, además de la naturaleza de la partícula y la cantidad de muestra analizada determinan la separación y deposición de los sólidos. (American Public Health Association, 2005).

4.6.7 GRASAS Y ACEITES

Para la medición y/o determinación de grasas y aceites no se es posible determinar a partir de alguna sustancia específica, sin embargo, existen grupos de sustancias con características

similares; que se determinan cuantitativamente con base en su solubilidad con un solvente de extracción orgánico; es por esto que las grasas y aceites se definen como cualquier material recuperado de una sustancia soluble en el disolvente, es decir que esto incluye otras materias extraídas del solvente, es importante entender que la muestra que se analiza contiene otros elementos químicos como iones y otros compuestos, por lo tanto la determinación de las grasas y aceites se define dependiendo del método que se utilice para su determinación. Existen diferentes métodos para dicha determinación como: método gravimétrico de partición liquido-liquido, método infrarrojo, método de extracción Soxhlet, por lo cual se utilizó el método de extracción liquido-liquido realizado en el laboratorio de Ciencias Ambientales de la Universidade do Porto, en Portugal

Es importante medir este parámetro de grasas y aceites en el agua residual porque si se tiene en grandes cantidades en el ambiente crea depósitos superficiales y litorales que degradan en medio ambiente y la calidad del agua.

4.7 CARACTERIZACIÓN DEL EFLUENTE DE AGUA PROVENIENTE DEL LAVADO DE BIODIESEL

Como lo describe el Standard methods for the examination of wáter (American Public Health Association, 2005) se adaptó dicha metodología para obtener los parámetros de solidos suspendidos totales (SST), demanda química de oxígeno (DQO), demanda biológica de oxígeno (DBO₅), grasas y aceites. Por lo que como ya se mencionó anteriormente también son parámetros que se encuentran en las diferentes normas mencionadas (decreto-Lei 236/98), por lo cual se caracterizó el efluente de agua para posteriormente dar un tratamiento, por lo tanto los valores iniciales que obtuvimos son los siguientes:

Tabla 27. *Parámetros iniciales de la caracterización del efluente del agua obtenida de los lavados de diésel.*

Efluente de lavado producido con biodiesel de	Aceite de Soja		Manteca de puerco		Aceite de Ricino	
	Media	CV	Media	CV	Media	CV
pH	10.29	0.10	9.77	0.08	9.76	0.20
Conductividad (μS/cm)	109.13	0.09	130.13	0.46	155.47	0.13
DBO₅ (mg O₂/L)	1273.30	9.35	1451.8	3.28	1249.5	5.71
DQO (mg O₂/L)	16685.05	1.70	10110.29	9.70	7536.76	0.0

SST (mg/L)	882	1.81	701	0.29	659	8.19
Grasas y aceites (mg/L)	11145.38	0.42	12283.04	0.03	1861.14	0.11
Fosforo Total (mg/l P)	<0.021 mg P/L					

Los valores reportados en la tabla 27, representan el promedio de por lo menos dos medidas (repeticiones); en todas las muestras, se tomó como un dato real cuando el coeficiente de variación (CV) es menor a 10 %, debido a que es difícil obtener CV más bajos, ya que la muestra contiene gran heterogeneidad y es difícil su repetitividad. Y también se logra observar que los valores obtenidos en la caracterización inicial, son valores que salen fuera de los que marcan las normas para la descarga de aguas residuales, por lo que es necesario aplicar un método de tratamiento para el efluente. Por lo que se propuso el siguiente tratamiento del efluente descrito en la sección de a continuación.

4.7 TRATAMIENTO DEL EFLUENTE

El biodiesel obtenido a partir de tres materias primas diferentes (aceite de soja y ricino y manteca de puerco) requiere purificación para mejorar su calidad y cumplir con los parámetros necesarios para que se logre clasificar como biodiesel, y para ello se lavó con agua destilada, la cual se emplea en una proporción de aproximadamente el 50% en volumen y es agregada como etapa final para la purificación del biodiesel (Berrios, 2008) (Berrios y Skelton, 2008).

El proceso de lavado se realiza para la purificación del biodiesel, después de ser separado del glicerol, y de extraerle el exceso de metanol con un evaporador rotativo, es decir, que el lavado es la adición de agua destilada, repitiendo este paso varias veces hasta que el color sea claro y el pH sea casi del pH del agua destilada, así se logra comprobar que son removidas las impurezas del biodiesel.

El lavado con agua es el método más utilizado para remover contaminantes químicos que son obtenidos de la producción del biodiesel, ya que el lavado del biodiesel es el único que da las características al biodiesel que cumplen con la EN 14214 Standard (M. Berrios, 2008) dando un valor de pureza del 99%. (Karaosmanoglu F, 1996). Dicha agua de lavado constituye el agua

residual proveniente del proceso de producción del biodiesel, la cual contiene grasas y aceites, catalizador básico (NaOH, KOH), sales, jabones, trazas de glicerol y metanol. En consecuencia, el agua del lavado se debe someter a un proceso de tratamiento antes de ser vertida al medio ambiente. Los resultados de la caracterización de las aguas de lavado de biodiesel, muestran la necesidad de su tratamiento antes de ser descargadas a un cuerpo de aguas, por su alto contenido de materia orgánica, de demanda química de oxígeno (DQO), demanda biológica de oxígeno (DBO₅), grasas y aceites entre otros componentes. Se calcula que en la producción de biodiesel se produce alrededor de 6-8 L de aguas residuales por litro de biodiesel producido; es por esto que es importante para el medio ambiente contar con un tratamiento óptimo para las descargas de este tipo de procesos, ya que cuenta con grandes cantidades de contaminantes y un gran volumen de efluente.

El efluente producido por este proceso de purificación, es viscoso y de color blanco opaco con un pH alcalino que contiene gran cantidad de aceite residual, residuos de catalizador, jabones e impurezas orgánicas (ácidos grasos libres, ésteres metílicos, metanol y glicerol) (Ken-ichiro Suehara, 2005), y el contenido de nitrógeno y fósforo son extremadamente bajos, los parámetros medidos en la efluente son los siguientes: pH, demanda química de oxígeno (DQO), demanda biológica de oxígeno (DBO₅), grasas y aceites y sólidos suspendidos totales.

El efluente de la purificación del biodiesel no puede ser descargado en el drenaje público debido a que puede causar problemas de reducción de actividad biológica y taponamiento del sistema. Para la protección del medio ambiente es necesario encontrar un método de tratamiento de agua adecuado para la descarga o para el reúso del efluente. Por lo cual es necesario contar con un método de tratamiento eficiente, un proceso típico en esta área de trabajo son los métodos combinados físico-químicos, los cuales pueden ser adsorción, acidificación (ajuste de pH), floculación/coagulación, sedimentación, filtración con sus diferentes combinaciones de estos.

Debido a los factores ya mencionados se propone el tratamiento de dichas aguas con procesos de coagulación y floculación utilizando dos tipos de coagulantes; orgánico e inorgánico como lo son el "RIFLOC 1815" y el cloruro férrico (FeCl₃) con concentraciones de 150 mg/L y 400 mg/L respectivamente; por lo cual es necesario estudiar la aplicación de una secuencia de tratamiento a este tipo de aguas residuales que permita la obtención de agua con los requisitos de calidad para su vertido como lo marcan el decreto-lei n°. 236/98 de la República Portuguesa, y la NOM-001-

SEMARNAT-1996 de la República Mexicana, las cuales marcan los valores de calidad para las descargas de agua.

El tratamiento primario para el efluente residual del proceso de purificación del biodiesel consiste en la eliminación de sólidos en suspensión y emulsiones de grasas y aceites por medios físicos o procesos fisicoquímicos. Utilizando un proceso inicial de centrifugado que fue mejorado posteriormente por la adición de coagulantes y floculantes. Estos pasos también incluyeron la eliminación de aceite y grasa por la centrifugación. Ya que el principio de la desestabilización química de emulsiones de aceite estables consiste en la cancelación de la energía que existe entre las gotas de aceite. Esto se logra mediante la adición de compuestos químicos que neutralizan la carga eléctrica responsable por la repulsión de las gotas de agua y aceite, se logró adicionando bicarbonato de sodio. El desestabilizado se aglomera a continuación, por coalescencia o la floculación y, después de eso, logra ser separado por decantación (Raquel O. Cristóvão, 2014).

Este trabajo de investigación tiene como objetivo optimizar el tratamiento primario de las aguas residuales de la producción de biodiesel con los procesos de centrifugación y coagulación-floculación. Las eficiencias de tratamiento fueron evaluados en términos de sólidos suspendidos totales (SST), demanda biológica de oxígeno (DBO_5) y demanda química de oxígeno (DQO) y el aceite y grasa (O & G). Cuyos resultados son reportados en el presente trabajo, mostrando como altas remociones de materia orgánica, la cual disminuye los valores de DQO, DBO_5 y grasas y aceites para lograr entrar dentro de los parámetros que la ley estipula en las descargas residuales.

4.7.1 METODOS Y MATERIALES DE TRATAMIENTO DEL EFLUENTE

La aplicación de procesos físico-químicos en el tratamiento de efluentes contaminados con compuestos orgánicos permite reducirlos, transformarlos o eliminarlos, es por esto que se utilizaron las etapas de centrifugación y coagulación/floculación como proceso de tratamiento del efluente generado por la etapa de purificación del biodiesel producido con diferentes materias primas, utilizando de tal manera coagulante inorgánico Cloruro férrico ($FeCl_3$, 40%, densidad= 1.44 g/cm^3), el cual fue proporcionado por el laboratorio de química de la Faculdade de Engenharia de la Universidade do Porto. Posteriormente el agua fue caracterizada para obtener datos iniciales de

su composición y caracterizada al final del proceso para conocer el porcentaje de rendimiento de los métodos aplicados al efluente.

Los métodos utilizados para el tratamiento del efluente de la purificación del biodiesel son descritos a continuación:

1. Centrifugación

La primera etapa del tratamiento del efluente es el de centrifugación; se utilizó un equipo de centrifugación, el cual está equipado con una pila de discos cónicos montados en un recipiente que gira a altas velocidades (figura 44), y que tiene como principio utilizar las diferencias en densidades de los componentes del fluido, para lograr la separación deseada (Sant'Ana, 2014).



Figura 43. Equipo de centrifugación.

Los efluentes provenientes de la producción de biodiesel con diferentes materias primas (aceite de soja, manteca de puerco, aceite de ricino), fueron centrifugadas durante 7 minutos a 4000 rpm, para crear una separación de fases, y así poder eliminar algún exceso de aceites y grasas de la muestra, extrayendo solo la parte inferior del recipiente centrifugado, se observaba una capa de grasas y aceites en la superficie de la muestra, debido a que en la parte superior se separaba los sólidos suspendidos totales y grasas y aceites como se muestra en la figura 45, por lo que la parte se extraía por medio de una pipeta, para no volver a mezclar las grasas y aceites ya separadas debido al proceso de centrifugación.



Figura 44. Separación de fases obtenida del proceso de centrifugación.

2. Coagulación/floculación

La segunda etapa del proceso de tratamiento fue el de coagulación/floculación, debido a que la muestra se encuentra emulsionada (las gotas de agua se encuentran adheridas a las grasas y aceites) es necesario de una demulsificación, la cual se puede lograr con la coagulación/floculación mediante la adición de un coagulante, por lo cual una sal inorgánica como lo es el cloruro férrico sirvió para dicha etapa. La coagulación y floculación son etapas sucesivas, cuando es agregado el coagulante, los iones metálicos se hidrolizan rápidamente formando series de hidrólisis metal, en este primer paso se forman coágulos debido a que sus cargas iónicas son neutralizadas, para obtener estos resultados es necesario tener una agitación vigorosa, posteriormente con agitación lenta las partículas en suspenso forman flóculos de gran tamaño que rápidamente se sedimentan. El ajuste de pH ayuda a mejorar la eficiencia del proceso de coagulación (Vlada B. Veljkovic, 2014)

Para el proceso de coagulación, se realizaron ensayos de “Jar Test” (W. Wesley Eckenfelder, 2000), (G. Tchobanoglous, 1991), el cual es un proceso experimental para conocer las determinaciones de coagulante mínimo, valor óptimo de pH, cantidad óptima de coagulante y el efecto de la adición del floculante. Estos ensayos son importantes debido a que brindan valores para dimensionar las estaciones de tratamiento de agua y sus operaciones; y también pueden ser utilizados para evaluar cualitativamente la velocidad de formación de flóculos en función de la energía utilizada (velocidad de agitación), y a la sedimentabilidad de los flóculos formados, y la aparición del agua sobrenadante. La coagulación/floculación precedido por el ajuste del pH se utiliza con frecuencia en el tratamiento físico-químico de las aguas residuales de biodiesel.

Se utilizaron sales de cloruro de hierro (FeCl_3 , con una concentración de 8 g/L). La secuencia común del proceso de coagulación es el siguiente: ajuste del pH, coagulación (adicionar coagulante, con agitación vigorosa por 3 min)/floculación (adicionar floculante con agitación lenta durante 15 min) y sedimentación por un tiempo de 30 min .

Como proceso de coagulación/floculación: se adicionaron en una muestra del efluente a tratar de 250 mL, 1.5 mL de cloruro de hierro (FeCl_3) de una concentración de 8 g/L, 1.5 g de bicarbonato de sodio (NaHCO_3), con una agitación de 150 rpm (vigorosa) durante 3 minutos, donde se observaron la formación de coagulos, como se muestra en la figura 46.

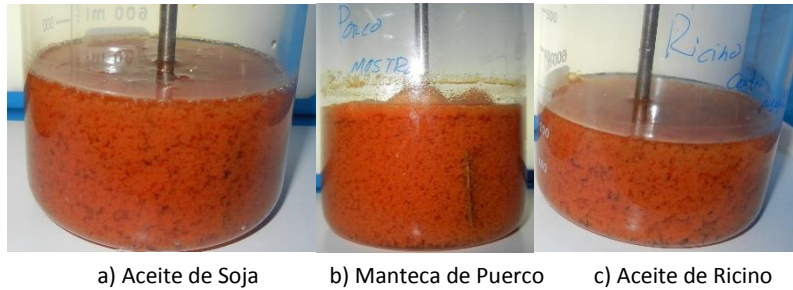


Figura 45. Formación de coágulos en el proceso de coagulación, en los efluentes, producidos por diferentes materias primas para la producción de biodiesel

Posteriormente debido a que en el proceso de coagulación solo se formaban coágulo que quedaban suspendido en la muestra, a continuación se procedió al proceso de floculación, es decir, se adicionaron 2.5 mL de “magnafloc155” (floculante) el cual tiene una concentración de 0.5 g/L, con una agitación de 20 rpm (lenta) durante 15 minutos. Para dejar la muestra de este proceso en reposo durante 60 min, dando como resultado una separación de fases clara, como se muestra en la figura 47.



Figura 46. Resultado final del proceso de centrifugación-coagulación-floculación en los efluentes obtenidos de la purificación de biodiesel producido por diferentes materias primas.

Con la separación de fases (sedimentación) obtenida (figura 47), se separa la parte superior de la parte sedimentada, para consecutivamente poder conocer el rendimiento de los procesos del tratamiento aplicados al efluente dependiendo de los parámetros iniciales obtenidos; por lo cual se caracterizó el efluente después de cada procedimiento analizar el desempeño de estos. Como se muestra en la imagen 34. Esta metodología de tratamiento de los efluentes fue repetido para los tres diferentes tipos de efluentes obtenidos en la purificación de biodiesel producido con diferentes materias primas.

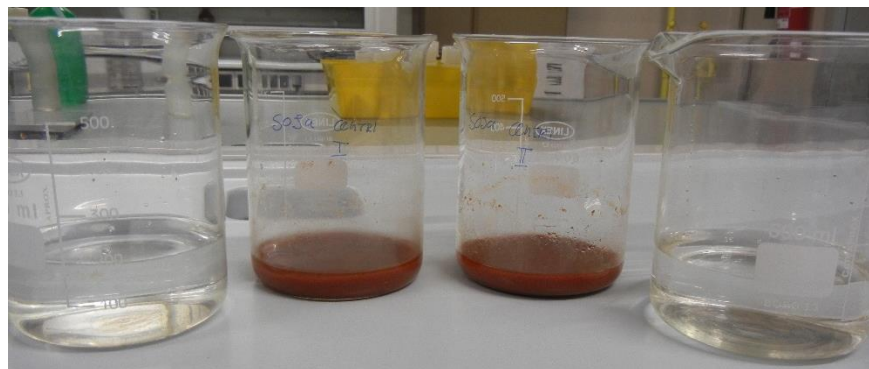


Figura 47. Separación de fases post-coagulación/floculación, para su caracterización final.

Las ventajas de utilizar coagulación/floculación es que es un proceso simple de realizar, de poca duración, efectivo en la remoción de grasas y aceites, de bajo costo en operación, el proceso puede ser automatizado, sin embargo presenta las desventajas de que utiliza una gran área de tratamiento, es inefectivo en la remoción de la demanda química de oxígeno, puede crear la contaminación de las aguas residuales tratadas por coagulantes químicos, las condiciones de tratamiento óptimas deben ser determinadas experimentalmente para cada lote de aguas residuales de biodiesel, y la formación de lodos que se clasifica como residuo peligroso (Vlada B. Veljkovic, 2014).

4.8 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para conocer el desempeño de remoción de los procesos seleccionados para el tratamiento de los efluentes, se caracterizaron con los parámetros de DBO₅, DQO, SST, pH, conductividad, grasas y aceites, después de realizar el proceso de tratamiento del efluente el cual consiste en: centrifugación y coagulación/floculación para conocer así el desempeño de cada proceso.

Los datos de la caracterización inicial se presentan en la tabla 28.

Tabla 28. Caracterización inicial de los efluentes de purificación del biodiesel producido por diferentes materias primas.

Materia prima	Aceite de Soja		Manteca de Puerco		Aceite de Ricino	
	Media	CV	Media	CV	Media	CV
pH	10.29	0.10	9.77	0.08	9.76	0.20
Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	109.13	0.09	130.13	0.46	155.47	0.13
Fosforo Total (mg P/L)	<0.021					

Sólidos Suspendidos Totales (SST) (mg/L)	882	1.81	701	0.29	659	8.19
Demanda Química de Oxígeno (DQO) (mg O₂/L)	16685.05	1.69	10110.20	9.70	7536.76	0
Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅) (mg O₂/L)	21514.62	7.62	21814.55	0.73	8135.93	7.62
Grasas y aceites (mg/L)	11145.38	0.42	12283.04	0.03	1861.14	0.11

Como se logra observar en la tabla 28 los valores obtenidos en la caracterización inicial son muy elevados, y sobrepasan los valores que marca la normatividad portuguesa y mexicana, dichos valores se presentan en la tabla 31, los cuales son los límites de descarga evaluados considerando el Decreto-Ley 236/98, que definen los valores límite de emisión (VLE) para descarga de aguas residuales industriales en Portugal, y para México se utiliza la NOM-001-SEMARNAT la cual establece los (LMP) límites máximos permisibles para las descargas de aguas residuales a bienes nacionales los cuales se encuentran señalados en la tabla 31. Es por esto que se realizó el tratamiento del efluente. Sin embargo el valor del fósforo está dentro de los valores que marcan las normas de descargas residuales por lo, se para dicho parámetro no se volvieron a repetir sus mediciones.

Tabla 29. Valores de los parámetros iniciales que marca la normatividad.

Parámetro/normatividad	Decreto-lei NE 236-98 VLE*	NOM-001-SEMARNAT-1996 LMP**
pH	6-9	-
Conductividad (µS/cm)	-	-
Fósforo Total (mg P/L)	10	20
Sólidos Suspendidos Totales (SST) (mg/L)	60	75
Demanda Química de Oxígeno (DQO) (mg O₂/L)	150	-
Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅) (mg O₂/L)	40	75
Grasas y aceites (mg/l)	15	15
VLE*: valores límite de emisión; norma portuguesa		
LMP**: límites máximos permisibles; norma mexicana		

Aplicando la primera fase de centrifugación ya descrito previamente en la sección anterior. Y caracterizando dicho efluente obtenemos los resultados en la tabla 30.

Tabla 30. Parámetros de caracterización de los efluentes obtenidos de la producción de biodiesel con diferentes materias primas después del proceso de centrifugación.

Materia prima	Aceite de Soja		Manteca de Puerco		Aceite de Ricino	
	Media	CV	Media	CV	Media	CV
Parámetro						
pH	10.03	0.60	9.71	0.31	7.87	0.20
Conductividad ($\mu\text{S/cm}$)	95.3	0.52	113.05	0.09	158.27	0.13
Sólidos Suspendidos Totales (SST) (mg/L)	5	0	28.75	8.7	17.5	0
Demanda Química de Oxígeno (DQO) (mg O_2/L)	3155.94	3.92	6002.48	8.25	5259.90	4.71
Demanda Biológica de Oxígeno (DBO_5) (mg O_2/L)	1273.30	9.35	1451.80	3.28	1249.50	5.71
Grasas y aceites	5387.94	1.36	6325.02	1.09	2121.22	0.35

La tabla 30 muestra que con el proceso de centrifugación, las concentraciones bajaron, y se des-emulsiono la muestra, por lo que fue posible el proceso de coagulación/floculación, aunque las concentraciones obtenidas del proceso de centrifugación no entran en los valores que marca la ley, dicho proceso ayuda a reducir los valores iniciales con un gran porcentaje de remoción, sin embargo se agregó al tratamiento de los efluentes el procedimiento de coagulación/floculación al efluente obtenido del proceso de centrifugación, de tal manera se caracterizó el efluente después de aplicar la segunda fase, para subsiguientemente conocer el porcentaje de remoción de los parámetros de caracterización del efluente y se muestran en la tabla 31.

Tabla 31. Parámetros de caracterización de los efluentes obtenidos de la producción de biodiesel con diferentes materias primas después del proceso de coagulación/floculación.

Materia prima	Aceite de Soja		Manteca de Puerco		Aceite de Ricino	
	Media	CV	Media	CV	Media	CV
Parámetro						
pH	8.52	0	8.58	0.35	8.61	0.12
Conductividad ($\mu\text{S/cm}$)	7.49	0.13	7.37	0	7.77	0.51
Sólidos Suspendidos Totales (SST) (mg/L)	2.5	0	7.5	0	12.5	0
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	1342.28	7.41	1716.42	5.80	3781.09	1.32

(mg O ₂ /L)						
Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅) (mg O₂/L)	36.50	8.22	45	0	29.50	3.39
Grasas y aceites (mg/L)	43.21	1.30	53.10	0.71	19.34	0.45

Los resultados obtenidos están dentro de las remociones normales en otros estudios con tratamientos similares (Vlada B. Veljkovic, 2014), no obstante, se muestra necesario agregar un proceso más, debido a que es necesario alcanzar los valores para cumplir con las normas. Como se muestran en las tablas de resultado de caracterización inicial y final los valores en cada etapa del proceso de tratamiento del efluente (centrifugación-coagulación/floculación), tienen una gran disminución (o remoción), sin embargo dichos valores finales no cumplen con las normativas citadas (Decreto-lei NE 236-98 y NOM-001-SEMARNAT-1996), no obstante es de gran interés conocer los porcentajes de remoción de cada etapa así como del proceso en completo, ya que de esta manera podemos tener en cuenta que etapa mejorar o en que parámetro si logra cumplir con los valores marcados en la normatividad, por ejemplo al finalizar el tratamiento del efluente el pH y los sólidos suspendidos totales si logran entrar a los parámetros que abarca la ley para su descarga pero no las demás características.

4.8.1 PORCENTAJE DE DESEMPEÑO DEL TRATAMIENTO DEL EFLUENTE

El porcentaje desempeño o remoción es obtenido con los resultados de las concentraciones iniciales y finales de los parámetros para la caracterización del efluente, utilizando la siguiente formula:

$$\%Remoción = \frac{C_{inicial} - C_{final}}{C_{inicial}} \times 100$$

Donde C representa la concentración del parámetro (Saúl A. Chuchón Martínez, 2008), por lo que para obtener una mejor comprensión de los resultados obtenidos por el tratamiento del efluente seleccionado, se presentan las siguientes gráficas y porcentaje de remoción a continuación:

4.8.2 PORCENTAJE DE DESEMPEÑO DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES

En la tabla 32 tenemos los resultados de remoción de sólidos suspendidos totales (mg/L) de los tres diferentes efluentes obtenidos por la purificación del biodiesel producido por tres diferentes materias primas, en este parámetro en la etapa inicial del tratamiento; centrifugación tenemos un porcentaje de remoción de alrededor del 100 % por lo cual con este proceso en dicho parámetro entra a cumplir las norma portuguesa y mexicana para las descarga de agua residuales en los casos del efluente producido con biodiesel de aceite de soja y aceite de ricino, sin embargo el efluente producido con biodiesel de manteca de puerco aun con un porcentaje de remoción de 95.90% no logra cumplir los valores marcados por la normatividad.

Tabla 32. Porcentaje de remoción de sólidos suspendidos totales (SST) (mg/L) de valores iniciales con centrifugación.

PORCENTAJE DE DESEMPEÑO SST (mg/L)	
ETAPAS: EFLUENTE INICIAL - CENTRIFUGACIÓN	
TIPO DE EFLUENTE DE LA PURIFICACIÓN DE BIODIESEL PRODUCIDO CON:	MEDIA (%)
ACEITE DE SOJA	99.43
MANTECA DE PUERCO	95.90
ACEITE DE RICINO	97.34

Sin embargo agregando el proceso de coagulación/floculación al efluente obtenido de la etapa de centrifugación, se obtuvieron los siguientes rendimientos presentes en la tabla 33, y se logra concluir que agregando la segunda etapa del tratamiento los tres efluentes logran cumplir con la normatividad señalada.

Tabla 33. Porcentaje de remoción de sólidos suspendidos totales (SST) (mg/L) comparando valores de centrifugación con coagulación/floculación

PORCENTAJE DE DESEMPEÑO SST (mg/L)	
EFLUENTE PROVENIENTE DE LA CENTRIFUGACIÓN A COAGULACIÓN/FLOCULACIÓN	
TIPO DE EFLUENTE DE LA PURIFICACIÓN DE BIODIESEL PRODUCIDO CON:	MEDIA (%)
ACEITE DE SOJA	50
MANTECA DE PUERCO	73.91
ACEITE DE RICINO	28.57

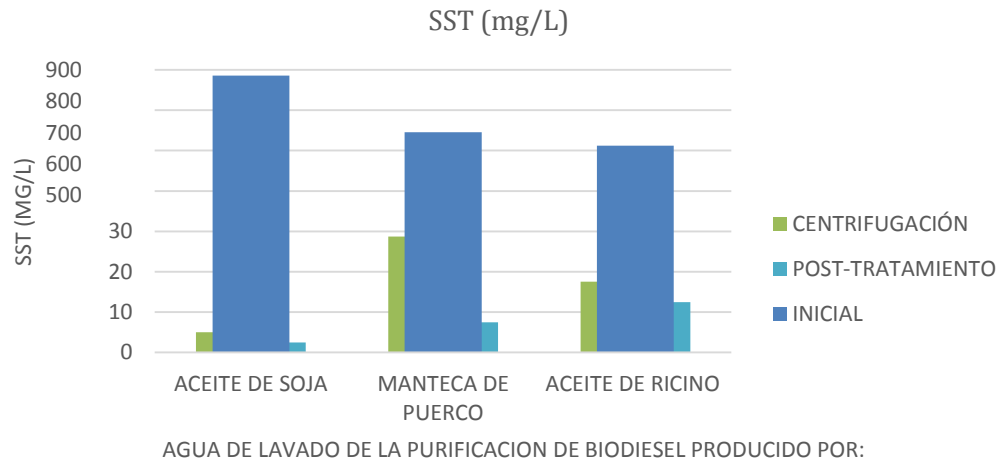
En la tabla 33, muestra el porcentaje de remoción de los sólidos suspendidos totales obtenido después de la fase de coagulación/floculación, los cuales son desempeños bajos en el caso del efluente producido del biodiesel de aceite de soja y aceite de ricino, debido a que el porcentaje de remoción de en la fase de centrifugación es casi de 100 %, es decir del 99.43% y 97.34% respectivamente, pero un valor más alto en al efluente del biodiesel de manteca de puerco en esta segunda fase del tratamiento (coagulación/floculación) tiene un porcentaje de remoción del 73.91%, ya que en la etapa de centrifugación tuvo valores relativamente bajos en comparación a los otros efluentes, sin embargo aun con dichos valores de remoción con la etapas combinadas los tres efluentes logran cumplir con la normatividad en este parámetro.

Además se presenta en la tabla 34, el porcentaje de remoción del parámetro a analizar (SST) de forma global; es decir desde los valores del efluente inicial hasta terminar el tratamiento del efluente (centrifugación-coagulación/floculación). Dando como resultado una remoción global de solidos suspendidos totales de alrededor de 100%. Por lo que en este parámetro entra en los valores que marca la normatividad.

Tabla 34. Porcentaje de remoción de solidos suspendidos totales (SST) (mg/L) comparando valores iniciales y post-tratamiento.

PORCENTAJE DE DESEMPEÑO SST (mg/L)	
EFLUENTE INICIAL-POST-TRATAMIENTO (CENTRIFUGACIÓN-COAGULACIÓN/FLOCULACIÓN).	
TIPO DE EFLUENTE DE LA PURIFICACIÓN DE BIODIESEL PRODUCIDO CON:	MEDIA (%)
ACEITE DE SOJA	99.72
MANTECA DE PUERCO	98.93
ACEITE DE RICINO	98.10

Dicha remoción se logra apreciar de una mejor forma en la gráfica.



Gráfica 8. Influencia del tratamiento en la remoción de solidos suspendidos totales.

La grafica 8 representa la influencia de las diferentes etapas en los valores de solidos suspendidos totales, donde se logra observar que cada etapa disminuye en grande dimensión dicho parámetro, obteniendo así un óptimo desempeño del tratamiento, debido a que logra cumplir con los valores estipulados en la normatividad para descargas de aguas residuales.

4.8.3 VARIACION DE pH

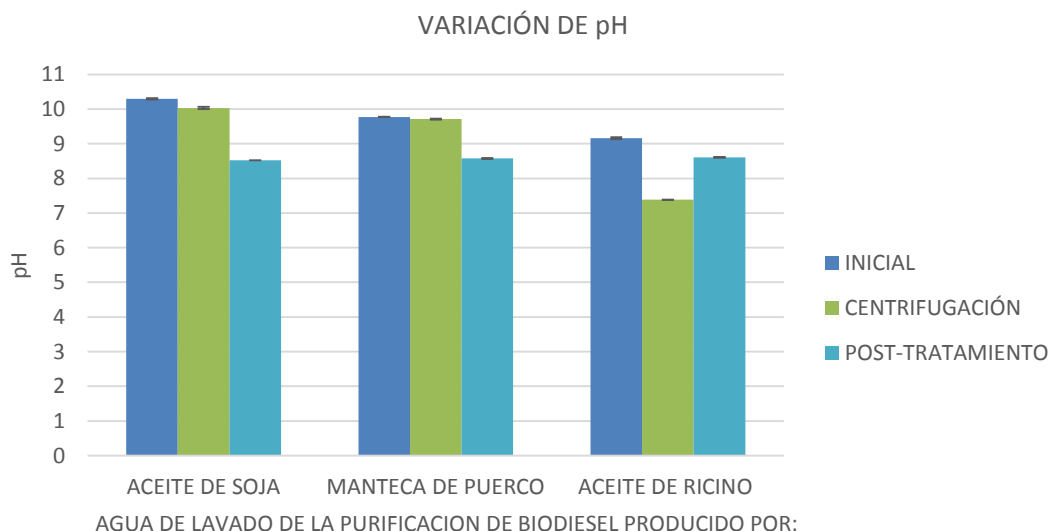
Las variaciones del pH de los efluentes en las diferentes etapas del tratamiento esta presentado en la tabla 35

Tabla 35. Varicaciones del pH inicial en las diferentes etapas del tratamiento de los efluentes.

TIPO DE EFLUENTE DE LA PURIFICACIÓN DE BIODIESEL PRODUCIDO CON:	pH INICIAL DEL EFLUENTE		pH EFLUENTE CENTRIFUGADO		pH EFLUNTE POST-TRATAMIENTO	
	PROMEDIO (mg/L)	CV (%)	PROMEDIO (mg/L)	CV (%)	PROMEDIO (mg/L)	CV (%)
ACEITE DE SOJA	10.29	0.10	10.03	0.60	8.52	0.00
MANTECA DE PUERCO	9.77	0.08	9.71	0.31	8.58	0.35
ACEITE DE RICINO	9.16	0.04	7.87	2.16	8.61	0.12

Como se observa en la tabla 35 los efluentes iniciales poseen un pH un poco superior al que marca la normatividad que es de 6-9, sin embargo en cada etapa del proceso se logra ir disminuyendo el pH sin adicionar reactivos para modificarlo, por lo que es un paso optimo en el tratamiento ya que

no se utilizan más reactivos los cuales causan costos más altos al tratamiento del efluente, de esta manera en la etapa final los valores se encuentran dentro de la normatividad señalada.



Gráfica 9. Comportamiento del pH en el tratamiento del efluente.

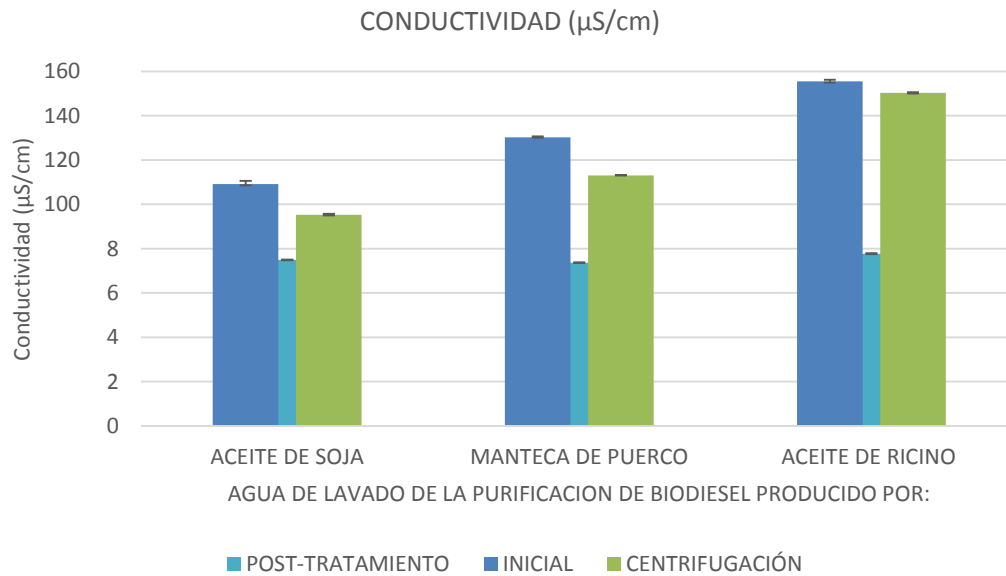
Como se observa en la gráfica 9, los efluentes se encuentran en un estado básico, en los casos de los efluentes producidos por el biodiesel generado con manteca de puerco y aceite de soja en cada fase de tratamiento el pH desciende, pero en el efluente proveniente utilizando como materia prima aceite de ricino, desciende y asciende, sin embargo al final del tratamiento de los efluentes entran en los valores que marca la normatividad, sin necesidad de acidificar el efluente.

4.8.4 VARIACIÓN DE CONDUCTIVIDAD

A continuación se presentan las variaciones del parámetro de conductividad en la tabla 36.

Tabla 36. Variaciones de la conductividad en las diferentes etapas del tratamiento del efluente.

TIPO DE EFLUENTE DE LA PURIFICACIÓN DE BIODIESEL PRODUCIDO CON:	CONDUCTIVIDAD INICIAL DEL EFLUENTE		CONDUCTIVIDAD EFLUENTE CENTRIFUGADA		CONDUCTIVIDAD EFLUENTE POST-TRATAMIENTO	
	PROMEDIO (mg/L)	CV (%)	PROMEDIO (mg/L)	CV (%)	PROMEDIO (mg/L)	CV (%)
ACEITE DE SOJA	109.13	0.09	95.3	0.52	7.49	0.13
MANTECA DE PUERCO	130.13	0.46	113.05	0.09	7.37	0
ACEITE DE RICINO	155.47	0.13	158.27	0.13	7.77	0.51



Gráfica 10. Comportamiento de la conductividad en el tratamiento del efluente.

En la gráfica 10 se presenta el comportamiento de la variación de la conductividad en las diferentes etapas de tratamiento, por lo cual podemos concluir que cada efluente es diferente dependiendo de la materia prima aunque el resultado final sea la producción de biodiesel, y en cada etapa el parámetro desciende.

4.8.5 DESEMPEÑO DE REMOCION DE DQO

Para obtener una mejor comprensión de los resultados de demanda química de oxígeno (DQO) obtenidos se presentan las siguientes gráficas y porcentaje de remoción a continuación:

Tabla 37. Porcentaje de remoción de demanda química de oxígeno (mg/L) comparando valores iniciales con centrifugación.

PORCENTAJE DE DESEMPEÑO DE DEMANDA QUIMICA DE OXIGENO	
AGUA INICIAL - CENTRIFUGACIÓN	
TIPO DE EFLUENTE DE LA PURIFICACIÓN DE BIODIESEL PRODUCIDO CON:	MEDIA (%)
ACEITE DE SOJA	81.09

PUERCO	40.63
MANTECA DE PUERCO	30.21

El valor obtenido en la remoción de DQO, con el efluente del biodiesel producido con biodiesel de aceite de soja, fue el más elevado con un 81.09 %, y los efluentes del biodiesel producido con manteca de puerco y aceite de ricino, contienen remociones más bajas de 40.63% y 30.21% respectivamente, debido a que cada efluente contiene diferentes características iniciales, los cuales se comporta de manera diferente, sin embargo con dichos porcentajes de rendimientos en la etapa inicial no se logra cumplir con la normatividad por lo que a continuación se presenta la tabla 40 para conocer el porcentaje de remoción en la etapa final del tratamiento.

Tabla 38. Porcentaje de remoción de demanda química de oxígeno comparando valores de centrifugación con coagulación/floculación

PORCENTAJE DE DESEMPEÑO DE DEMANDA QUIMICA DE OXIGENO	
EFLUENTE CENTRIFUGACIÓN-POST-TRATAMIENTO (COAGULACIÓN/FLOCULACIÓN)	
TIPO DE EFLUENTE DE LA PURIFICACIÓN DE BIODIESEL PRODUCIDO CON:	MEDIA (%)
ACEITE DE SOJA	57.44
MANTECA DE PUERCO	71.40
ACEITE DE RICINO	28.11

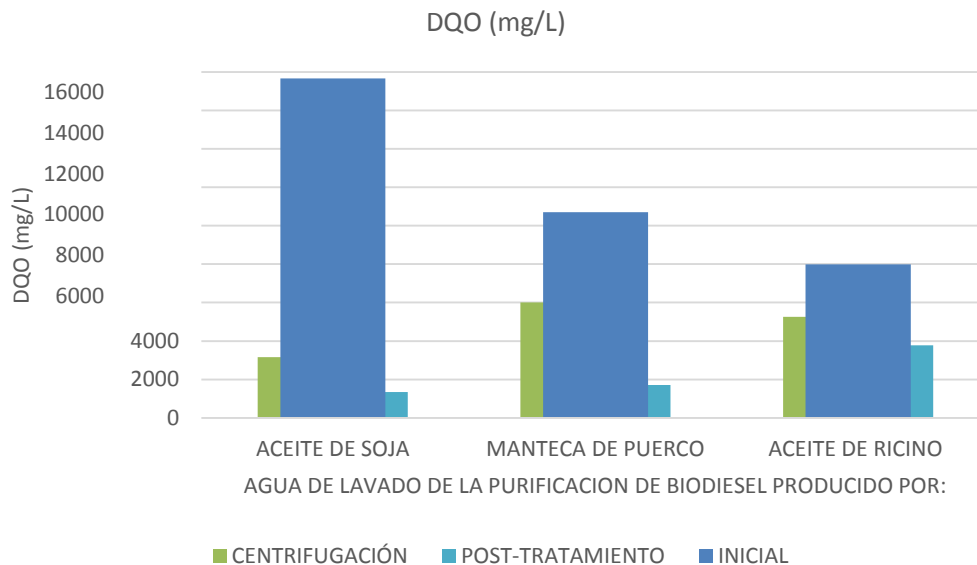
La tabla 38 presenta el porcentaje de remoción y/o desempeño en el parámetro de demanda química de oxígeno en la etapa de centrifugación a coagulación/floculación, teniendo valores bajos de remoción de dicho parámetro, donde el valor máximo alcanza una remoción de 71.4 % en el efluente producido del biodiesel creado con manteca de puerco, por lo tanto obtenemos valores más bajos para los efluentes de biodiesel producido con aceite de soja y aceite de ricino de 57.44 % y 28.11% respectivamente, por lo cual este parámetro con el tratamiento final no logra cumplir con los valores que la normativa de señala (150 mg/L). Por lo que a continuación se presenta el rendimiento global, comparando datos iniciales con finales, en la tabla 39.

Tabla 39. Remoción de demanda química de oxígeno global.

PORCENTAJE DE DESEMPEÑO DE DEMANDA QUIMICA DE OXIGENO	
EFLUENTE INICIAL A EFLUENTE POST-TRATAMIENTO	
TIPO DE EFLUENTE DE LA PURIFICACIÓN DE BIODIESEL PRODUCIDO CON:	MEDIA (%)
ACEITE DE SOJA	88.12
MANTECA DE PUERCO	88.43

ACEITE DE RICINO	34.82
-------------------------	-------

En la tabla 39 se presentan los valores del porcentaje de desempeño de la demanda química de oxígeno en el proceso completo del tratamiento de los efluentes producidos en la purificación (lavado) de biodiesel, por lo cual se puede concluir que el tratamiento aplicado a los diferentes efluentes (centrifugación-coagulación/floculación) no es lo suficientemente efectivo para reducir dicho parámetro en valores que acepten las normas portugués y mexicana para descargas de aguas residuales, en la cual en el decreto-lei (norma portuguesa) de tiene un valor de emisión límite de 150 (mg O₂/L), y el efluente obteniendo del tratamiento aplicado, tenemos valores mucho más elevados de 1,342.28 (mg O₂/L) en efluente con biodiesel de aceite de soja, de 1,716.42 (mg O₂/L) en efluente con biodiesel de manteca de puerco y de 3,781.09 (mg O₂/L) en efluente con biodiesel de aceite de ricino. El comportamiento de la demanda química de oxígeno se logra apreciar de una mejor manera en la gráfica 11, describiendo como en cada etapa del proceso de tratamiento del efluente.



Gráfica 11. Influencia del tratamiento en la remoción de demanda química de oxígeno.

Por lo tanto como lo muestra la gráfica 11, el parámetro de DQO inicial es muy elevado y sin embargo a medida de que pasa las diferentes etapas del tratamiento no logra descender dicho parámetro a valores permisibles que marca la ley, aunque si es una reducción del 88.12% y del 88.43% en el efluente de biodiesel de aceite de soja y manteca de puerco respectivamente, no

basta para tomarlo como un porcentaje de remoción alto, pero es de denotarse que el porcentaje de desempeño en el efluente del biodiesel de aceite de ricino comienza con valores más bajos en comparación a los otros efluentes y sin embargo se tiene una remoción de 34.82% muy baja aplicando la misma metodología de tratamiento de los efluentes.

4.8.6 DEMANDA QUIMICA DE OXIGENO (DBO₅)

Los resultados de porcentaje de desempeño del tratamiento del efluente en el parámetro de demanda biológica de oxígeno (DQO₅) obtenidos, se presentan las siguientes gráficas y porcentaje de remoción a continuación:

Tabla 40. Porcentaje de remoción de demanda biológica de oxígeno (%) de los valores iniciales con centrifugación.

PORCENTAJE DE DESEMPEÑO DE DEMANDA BIOLÓGICA DE OXIGENO	
FASE INICIAL - CENTRIFUGACIÓN	
TIPO DE EFLUENTE DE LA PURIFICACIÓN DE BIODIESEL PRODUCIDO CON:	MEDIA (%)
ACEITE DE SOJA	92.92
MANTECA DE PUERCO	81.84
ACEITE DE RICINO	57.58

Como se observa en la tabla 40, los porcentajes de remoción son altos comparando los datos iniciales con los obtenidos después de la centrifugación, en los efluentes procedentes de biodiesel de aceite de soja y manteca de puerco, exceptuando el efluente producido con biodiesel de aceite de ricino que tiene un porcentaje de remoción de 57.58% siendo un valor bajo de remoción comparando con los otros que fue de 92.92% y 81.81 respectivamente. Sin embargo en esta primera etapa de tratamiento no se logra obtener valores que cumplan con la normatividad. A continuación en la tabla 41 se presenta el porcentaje de remoción de dicho parámetro entre las fases de centrifugación y coagulación/floculación.

Tabla 41. Porcentaje de remoción de demanda biológica de oxígeno de los valores de centrifugación con coagulación/floculación

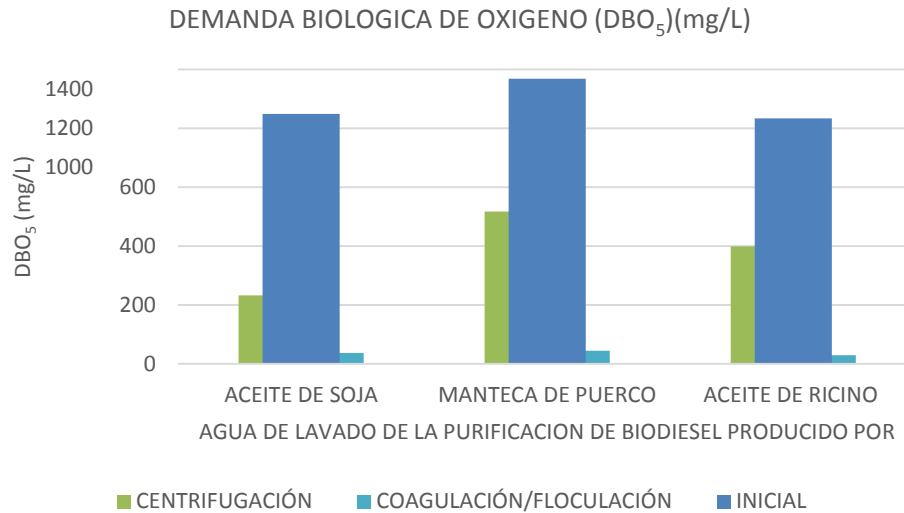
PORCENTAJE DE DESEMPEÑO DE DEMANDA BIOLÓGICA DE OXÍGENO	
FASE CENTRIFUGACIÓN-POST-TRATAMIENTO	
TIPO DE EFLUENTE DE LA PURIFICACIÓN DE BIODIESEL PRODUCIDO CON:	MEDIA (%)
ACEITE DE SOJA	48.18
MANTECA DE PUERCO	71.73
ACEITE DE RICINO	44.36

En la tabla 41, se presenta los porcentaje de remoción de la demanda biológica de oxígeno, entre las fases de centrifugación a post-tratamiento (coagulación/floculación), el cual presenta porcentajes bajos en el efluente proveniente del biodiesel de aceite de soja y aceite de ricino con valores de remoción de 48.18% y 44.36%, y un valor más alto en el de manteca de puerco con 71.36% de remoción. A continuación en la tabla 44 se presenta el porcentaje de remoción global del tratamiento aplicado a los efluentes.

Tabla 42. Remoción de demanda biológica de oxígeno global.

PORCENTAJE DE DESEMPEÑO DE DEMANDA BIOLÓGICA DE OXÍGENO	
EFLUENTE INICIAL-POST-TRATAMIENTO (COAGULACIÓN/FLOCULACIÓN)	
TIPO DE EFLUENTE DE LA PURIFICACIÓN DE BIODIESEL PRODUCIDO CON:	MEDIA (%)
ACEITE DE SOJA	96.33
MANTECA DE PUERCO	94.87
ACEITE DE RICINO	76.40

Como se logra observar en la tabla 44 los porcentajes de remoción de la demanda biológica de oxígeno son valores muy altos, sin embargo con estos porcentajes de remoción no se logran obtener los valores que marcan las normas, como el decreto-lei (norma portuguesa) de 40 mg de O₂/L y para la norma mexicana (nom-001) un valor de 75 mg de O₂/L, por lo que con los valores de 96.33 %, 94.87, 76.40% de remoción para cada efluente producido por biodiesel de aceite de soja, manteca de puerco y aceite de ricino respectivamente no son lo suficientemente eficientes para cumplir con lo que se estipula en las normas de descargas de aguas residuales. A continuación se presenta el gráfico 5 con el comportamiento de la demanda química de oxígeno representando cada fase del tratamiento.



Gráfica 12. Influencia del tratamiento en la remoción de demanda química de oxígeno.

En la gráfica 12 se logra observar como la primera fase del tratamiento, la centrifugación remueve gran parte de este parámetro, teniendo una gran remoción, y en la segunda fase con valores un poco más bajos pero sin cambiar la tendencia de descender, aunque es debido a la muestra tiene un gran contenido de materia orgánica en el efluente inicial que es difícil la reducción casi total de dicho parámetro.

4.8.6 GRASAS Y ACEITES

Las grasas y aceites fue un parámetro con valores iniciales extremadamente elevados en la su concentración, por lo cual como en los parámetros anteriores se optó por conocer el porcentaje de desempeño de cada etapa del tratamiento del efluente (etapa 1 centrifugación y etapa 2 coagulación-floculación). A continuación en la tabla 43 se muestran los resultados del rendimiento de la etapa inicial (centrifugación)

Tabla 43. Porcentaje de remoción de grasas y aceites (%) de los valores iniciales con centrifugación.

PORCENTAJE DE DESEMPEÑO DE GRASAS Y ACEITES	
EFLUENTE INICIAL - CENTRIFUGACIÓN	
TIPO DE EFLUENTE DE LA PURIFICACIÓN DE BIODIESEL PRODUCIDO CON:	MEDIA (%)
ACEITE DE SOJA	51.66
MANTECA DE PUERCO	48.51
ACEITE DE RICINO	54.41

Como lo muestra la tabla 43, el porcentaje de desempeño de grasas y aceites en la etapa inicial de centrifugación tiene rendimientos bajos de alrededor del 50% de remoción, sin embargo sin este proceso de centrifugación era imposible la segunda etapa de coagulación-floculación, ya antes de no contar con dicho etapa inicial el proceso de coagulación/floculación no se realizaba con éxito, debido a que los coágulos quedaban adheridos a las grasas y aceites evitando de esta manera la sedimentación (separación de fases) de los coágulos/floculos, en la tabla 44 se presentan los porcentaje de remoción de la segunda etapa de coagulación/floculación para grasas y aceites.

Tabla 44. Porcentaje de remoción de grasas y aceites (%) de los valores de centrifugación con coagulación/floculación

PORCENTAJE DE DESEMPEÑO	
AGUA CENTRIFUGACIÓN-POST-TRATAMIENTO	
TIPO DE EFLUENTE DE LA PURIFICACIÓN DE BIODIESEL PRODUCIDO CON:	MEDIA (%)
ACEITE DE SOJA	99.20
MANTECA DE PUERCO	99.16
ACEITE DE RICINO	99.09

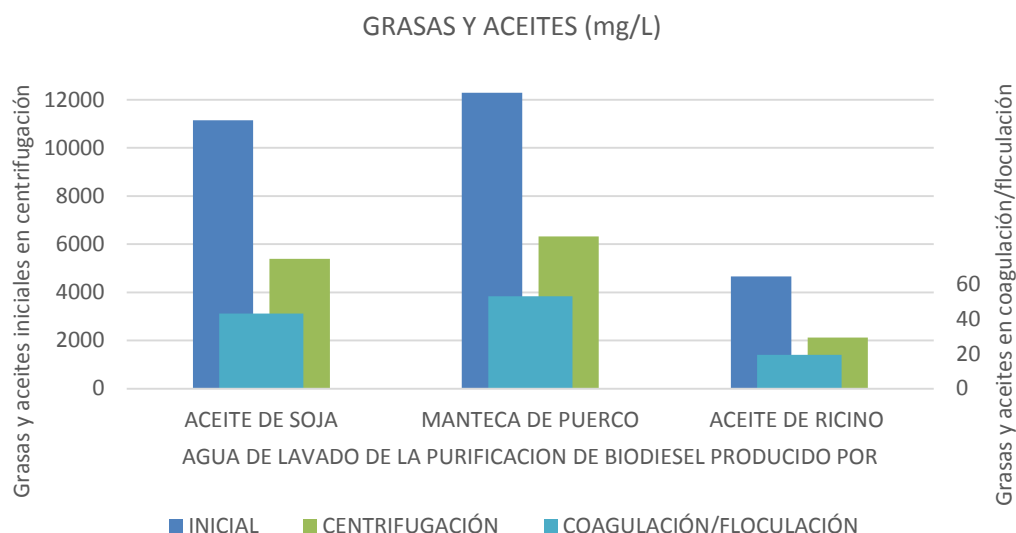
Observando los resultados de porcentaje de desempeños (tabla 44) para grasas y aceites en la segunda etapa, se logra una gran remoción de 99.61%, 99.57% y 99.58% para los efluentes producidos por con biodiesel de aceite de soja, manteca de puerco y aceite de ricino respectivamente, obteniendo de esta manera un excelente porcentaje de rendimiento, en la tabla 45 se presenta el porcentaje de desempeño del proceso de tratamiento completo para el parámetro de grasas y aceites.

Tabla 45. Porcentaje de remoción de grasas y aceites (%) de los valores iniciales a post-tratamiento.

PORCENTAJE DE DESEMPEÑO	
EFLUENTE INICIAL-POST-TRATAMIENTO	
TIPO DE EFLUENTE DE LA PURIFICACIÓN DE BIODIESEL PRODUCIDO CON:	MEDIA (%)
ACEITE DE SOJA	99.61
MANTECA DE PUERCO	99.57
ACEITE DE RICINO	99.58

La tabla 45 presenta el porcentaje de remoción obtenido en grasas y aceites después del tratamiento del efluente, obteniendo remociones casi del 100% sin embargo con dichas remociones en este parámetro después del tratamiento no logra cumplir con los valores que

marca la normatividad de 15 mg/L teniendo valores de 43 mg/L, 53 mg/L y 19 mg/L, de los efluentes de biodiesel producidos con aceite de soja, manteca de puerco y aceite de ricino respectivamente. De tal manera que para entender como fue la disminución (comportamiento) de la remoción de grasas y aceites en las diferentes etapas se representa en una gráfica de barras simbolizando los valores obtenidos en cada etapa del tratamiento.



Gráfica 13. Influencia del tratamiento en la remoción de grasas y aceites.

Debido a que el tratamiento seleccionado no obtuvo los resultados esperados de remoción de contaminantes, sin proporcionar concentraciones que cumplan con la normatividad señalada (Decreto-lei NE 236-98 y NOM-001-SEMARNAT-1996), por lo para trabajos futuros en esta investigación sería, aplicar nuevos métodos de desemulsión en el efluente obtenido de la purificación del biodiesel y aplicar nuevos reactivos de coagulación/floculación optimizando la cantidad de coagulante y floculante, además es importante conocer si el efluente tratado es utilizable nuevamente para purificar biodiesel aunque los parámetros de caracterización no entre en los valores que las normas de calidad de agua dicten, es decir, conocer si la reutilización del efluente tratado obtenido en el proceso de lavado del biodiesel, deberá ser futuramente evaluado, es decir, conocer si dicho efluente es óptimo para la purificación del biodiesel dando los parámetros de pureza aceptables para la producción de biodiesel de calidad.

4.9 COCLUSION DE TRATAMIENTO EN LA PURIFICACIÓN DE BIODIESEL

Es de vital atención utilizar métodos de física, química, físico-química, electroquímica y biológicos integrados para el tratamiento de las aguas residuales de la producción de biodiesel. Al discutir las ventajas y desventajas de los métodos utilizados encontramos como ventajas que se obtiene efluente un alto porcentaje de remoción de los contaminantes, y como desventajas los procesos empleados tienen un alto costo energético y de aplicación para la centrifugación y alto costo económicos para la implementación de los coagulantes y floculantes. Sin embargo es difícil comparar diferentes métodos de tratamiento de dicho efluente ya que cada método es diferente y los parámetros de caracterización se comportan de diferente manera en cada método.

Ya que en la industria de la producción de biodiesel, se debe de tener en cuenta la reducción de la producción de efluente proveniente de la purificación de dicho producto, debido a la gran cantidad de aguas residuales provenientes de esta etapa del proceso, y a la gran cantidad de materia orgánica que presenta en el efluente. Los métodos de tratamiento de agua residual proveniente de la producción de biodiesel deben de incluir métodos efectivos y viables para la reducción de las concentraciones de demanda química de oxígeno y demanda biológica de oxígeno así como para grasas y aceites para obtener un efluente resultante con las características necesarias para ser reutilizable. Esta área de investigación es una gran oportunidad para enfocarse en la eliminación o reducción del efluente de aguas residuales en la producción de biodiesel, buscar nuevas tecnologías para la purificación del biodiesel, y utilizar nuevos métodos de tratamiento de aguas para obtener efluentes reusable y/o limpios.

Sin embargo se logró obtener biodiesel a partir de diferentes materias primas (aceite de soja, manteca de puerco y aceite de ricino). Aunque el resultado final es la producción de biodiesel con un proceso de transesterificación, los efluentes de cada tipo de biodiesel muestran características diferentes. Fundamentalmente, los efluentes tienen gran contenido de materia orgánica, por cual es necesario un tratamiento para que cumplan las normas de descargas de agua. Con la combinación de procesos de centrifugación y coagulación/floculación como tratamiento del efluente, se obtuvieron remociones de contaminantes muy elevadas (>99%); sin embargo, estas remociones no logran disminuir las concentraciones de grasas y aceites, demanda química de oxígeno e demanda biológica de oxígeno a los valores que marcan la normas de descargas de aguas residuales en Portugal y México. Pero como recomendaciones o investigaciones futuras es

interesante conocer si el efluente obtenido del tratamiento propuesta es útil para el proceso de lavado, es decir, reusar dicho efluente obteniendo características del biodiesel obtenido de su purificación como las marca la normatividad, de tal manera aunque no se lograron los resultados esperados en el tratamiento del efluente obteniendo los parámetros con valores permisibles para la descarga del efluente en el medio ambiente, se lograría beneficiar el proceso en costo reutilizando dicho efluente, debido a la reducción de la consumo total de agua se puede hacer mediante la recirculación a nuevo al proceso de producción de biodiesel.

CONCLUSIONES

La gestión sostenible del agua es una cuestión crítica para el futuro del planeta. Son numerosos los factores que hay que tener en cuenta para conseguir una gestión sostenible e integrada de los recursos hídricos: eficiencia, ordenación del territorio (delimitación y manejo de cuencas, sub-cuencas y micro-cuencas), participación ciudadana, normatividad adecuada, tecnología apropiada y amigable con el medio ambiente, economía, control de los consumos (industria-agricultura), responsabilidad compartida, etc.

Debido a la dificultad de interrelacionar todos estos aspectos, es necesario tomar como la unidad de manejo del territorio a la cuenca hidrográfica ya que también tiene una gran importancia desde el punto ambiental, socio-económico y cultural. Aunque la zona de estudio se conoce su importancia debido al desarrollo industrial y tecnológico que se desarrolla en dicha área, la importancia en calidad de los ecosistemas acuáticos no ha tenido este reconocimiento para su preservación y conservación.

Más allá de la cooperación en la toma de decisiones es necesario contar con buenas alternativas para el uso, manejo y tratamiento del agua, para garantizar que la gestión sea integrada, activa y participativa. Por lo que existen otros factores que también contribuyen positivamente para un buen manejo de sub-cuenca, al saber que las visiones conjuntas para la gestión del recurso hídrico, vienen con la existencia de un plano de actividades dentro del área de estudio. Ya que del análisis de las condiciones de la cuenca. La calidad del agua en la zona de estudio "Sub-cuenca San Juan Río", en particular en el cauce principal estudiado, con siete puntos de muestreo, tiende a ser degradado continuamente por las prácticas agrícolas realizadas en las zonas rurales, con efectos visibles en el cambio del uso del suelo por el desarrollo industrial que tiene esta zona. Por lo que es necesario aplicar un plan de manejo, como contribución para la gestión integrada del recurso hídrico, de las aguas superficiales del área.

Con base en el objetivo de la investigación se caracterizó el cauce principal y el territorio de la sub-cuenca, teniendo como base de un modelo digital de elevaciones para la utilización de un sistema de información geográfica (SIG), permitiendo que para su realización fueron necesarios fundamentalmente tres tipos de base de datos de: información cartográfica, registros de precipitación y valores de escurrimientos, los cuales permitieron tener una capacidad analítica de

los resultados obtenidos; como la capacidad de delimitar la cuenca, su caracterización topográfica, caracterización hidrológica, son algunos ejemplos de lo que se realizó para tener resultados y análisis de la cuenca en estudio, y así se constituye una base de apoyo para la toma de decisiones en la gestión y manejo de los recursos hídricos.

Una ventaja de la caracterización de la cuenca fue que se tenían muestras representativas de las condiciones del río principal, teniendo como resultados contaminación por plomo, en zonas específicas, como lo son los puntos: San Juan del Río, Presa Centenario, La Vega, Las Rosas y el Geiser, obtenido por las actividades humanas y el desarrollo tecnológico el cual ha contribuido notablemente al aumento de los niveles naturales del plomo en las aguas, sedimentos, flora y fauna, tanto marina como continental, por lo cual es necesario aplicar un método de tratamiento en estos puntos, ya que en un futuro se pueden presentar daños a la salud debido a que el recurso hídrico de la zona de estudio se utiliza para agricultura y ganadería; además de que no cuentan con plantas tratadoras de aguas en la zona de estudio, por lo que se sugiere implementar un método fácil y ampliamente utilizado para la remediación de este contaminante, el cual es la adsorción por carbón activado ya que adsorbe el 99% del contaminante a condiciones de un pH de 5 y una temperatura de 25 ± 1 °C, debido a que el plomo es un elemento bioacumulable, que puede ser absorbido por plantas y animales y que puede entrar a la cadena trófica y dañar así la salud de la población.

De los resultados obtenidos de la modelación; se puede concluir que la existencia de un mecanismo de modelación del cauce principal, bien definido, y con un elevado porcentaje de datos reales de campo, debido a que es un modelo que responde a la pregunta “¿Qué pasaría si?”, crea escenarios sumamente importantes para la proyección de toma de decisiones y la gestión integrada óptima y con resultados positivos; ya que ayuda a promover la participación de todos los usuarios en general de la sub-cuenca, para los procesos de toma de decisiones necesarios para el manejo del recurso hídrico. Dada a la capacidad de extracción de datos de diferentes orígenes (físicos, químicos, meteorológicos), y a su integración en un ambiente es capaz de procesar, es por eso que el modelo QUAL2K, nos ayudó comprender el comportamiento y/o desenvolvimiento del cauce, dando como resultados gráficas las cuales podemos tener un análisis e interpretación de lo que ocurre en el cauce principal, pudiendo así conocer que puntos de muestreo son los mejores y por qué condiciones son afectados, pH, aireación, conductividad, oxígeno disuelto, etc. La disponibilidad de toda la información real y relevante y su fácil acceso para la población y toma de

decisiones para el manejo del recurso hídrico, es esencial para lograr lo objetivo. Esta disponibilidad también pasa para el tratamiento y análisis de esta información, no sólo respecto a la situación actual, pero también a través del análisis y la previsión de escenarios futuros, para que se convierta completa y legible para los tomadores de decisiones.

Es necesario contar con diferentes tecnologías y/o métodos de tratamiento de diferentes efluentes industriales, en este trabajo de tesis, se propone el tratamiento del efluente industrial obtenido en la producción de biodiesel debido a que es una energía renovable, y nueva por lo que es posible considerar que en un futuro esta industria se llegue a producir en México, y debemos ya contar con información y/o investigaciones previas para su planeación, realización y tratamiento de los posibles escenarios que se presentan como lo es la contaminación del agua por su efluente proveniente de la purificación del biodiesel, de tal manera que aunque en esta investigación no se obtuvieron los resultados esperados para el tratamiento de dicho efluente si se logra comprender, la gran cantidad de efluente resultado de este proceso y se tiene un gran campo de investigación.

Referencias

(BP), B. P., 2015. *British Petroleum (BP)*. [En línea]

Available at: <http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/Energy-economics/statistical-review-2014/BP-statistical-review-of-world-energy-2014-full-report.pdf>

Agency, U. S. E. P., 2014. *United States Environmental Protection Agency*. [En línea] Available at: <http://www.epa.gov/athens/wwqts/index.html>

Aguilar, L. A., 1998. *El agua de la nación: una historia política de México (1888-1946)*. México: CIESAS.

Alba, M. I. D. d., 2013. *Avances en el control de la contaminación por metales: nuevas metodologías de análisis y especiación metálica en sistemas acuáticos.*. Cádiz, España.: Universidad de Cádiz.

Alliance for water stewardship, 2012. *Estandar Internaiconal para la Gestión Sostenible del Agua*. Estados Unidos: Truthstudio.

Altamirano, J. I. C., 2009. *Validación de la incertidumbre en la determinación de Na, K, Ca y Mg por espectrofotometria de emisión y absorción atómica en muestras geotermicas y aplicacion de geotermometros para estimar la temperatura del reservorio*. León : Universidad Nacional Autonoma de Nicaragua .

Ambiente, M. d., 1998. Decreto-Lei nº 236/98. *Diário da República*, 1 Agosto, pp. 3676- 3722.

American Public Health Association, A. W. W. A. W. E. F., 2005. *Standar Methods for the Examination of Water & Wasterwater*. Quinta ed. Washington, DC: American Public Health Association.

American Public Health Association, A. W. W. A. W. E. F., 2005. *Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater*. Veintiuno ed. Baltimore, Maryland: American Public Health Association.

Araújo, J., 2011. *Producao de biodiesel a partir de sementes aleaginosas de mamona*. Porto: Universidade do Porto.

Atadashi IM, A. M. A. A. S. N., 2011. Refininf technologies for the purification of crude biodiesel. *Appl Energy*, pp. 4239-4251.

Ayuntamiento, H., 2013. *Plan Municipal de Desarrollo*, San Juan del Rio, Querétaro: Presidencia Municipal.

Bankovi Ili, S. V., 2012. *Biodiesel production from non-edible plant oils*. s.l.:Renew Sust Energy Rev.

Barrios, E. C. L., 2008. *Plan de manejo de la microcuenca del río Tojguech, municipio de Tacaná, departamento de San Marcos*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.

Berkowitz B., D. I. Y. B., 2008. *Contaminant Geochemistry. Intereactions and trasport in the subsurface environment*. Berlin: Springer-Verlag.

Berrios, M. y. R. S., 2008. Comparison of purification methods for biodiesel. *Chemical Engineering Journal*, pp. 459-465.

Borges, J. M. C., 2012. *Degradacao anaeróbica de biodiesel proveniente de diferentes matérias-primas*. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Camacho L. A., D. G. M. G. E., 2002. *Contribución al desarrollo de un modelos de calidad del agua del Río Bogotá (Colombia)*, La Habana, Cuba : Universidad de los Andes y Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB). XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica.

Carabias, J. & L. R., 2005. *Agua, Medio Ambiente y Sociedad. Hacia la Gestión Integral de los recursos Hídricos en México..* México: UNAM/El Colegio de México/Fundación Gonzalo Río Arronte.

Carabias, J. y. L. R., 2005. *Agua, medio ambiente y sociedad. Hacia la gestión integral de los recursos hídricos en México..* México: UNAM, El Colegio de México, Fundación Gonzalo Río Arronte.

Carmencita Lavado Meza, M. d. R. S. K. S. B., 2010. Adsorción de plomo de efluentes industriales usando carbones activados con H₃PO₄. *Sociedad Química de Perú*.

Castañé, P. T. M. C. R. S. A., 2003. Influencia de la especiación de los metales pesados en medio acuático como determinante de sus toxicidad. *Toxicología* , pp. 13-18.

CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe), 1994. *Políticas Públicas para el Desarrollo Sustentable: La Gestión Integrada de Cuencas*. Venezuela : s.n.

Chapra Steve C., P. G., 2003. *QUAL2K. A Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality. Documentation and users manual*. New York: Surface Water-Quality Modelling, The McGraw-Hill Companies. Inc..

Chapra Steve, P. G., 2008. *QUAL2K theory and documentation (version 5.1). A modeling framework for simulating river and stream water quality*. New York: s.n.

Ciencia, M. d. E. y., 2004. *Meteorología y Climatología* , España: Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología.

CONAGUA, SEMARNAT, 2012. Regiones Hidrológicas. En: *Atlas del agua en México 2012*. México: Gobierno Federal, pp. 22-25.

CONAGUA, 2011. Usos del Agua. En: *Estadísticas del agua en México*. México: CONAGUA, p. 45.

CONAGUA, 2014. *Regiones Hidrológicas*. [En línea]
Available at: <http://www.conagua.gob.mx/atlas/ciclo09.html>

CONAGUA, 2014. *Servicio Meteorológico Nacional*. [En línea]
Available at:
http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=42&Itemid=75

CONAGUA, 2015. *Regiones Hidrológicas*. [En línea]
Available at: <http://www.conagua.gob.mx/atlas/ciclo09.html>
[Último acceso: 5 Mayo 2015].

CONAGUA, 2015. *Regiones hidrológicas-administrativas*. [En línea]
Available at: <http://www.conagua.gob.mx/atlas/contexto07.html>
[Último acceso: 15 Mayo 2015].

Consejo del Sistema Veracruzano del Agua, 2002. *Análisis Integral de los recursos hidráulicos en la cuenca del río Pánuco. Uso público en comunidades urbanas y rurales. Terminos de referencia.*
Veracruz: Gobierno de Veracruz.

Cotler, H., 2004. En: *El manejo integral de cuencas en México. Estudios y reflexiones para orientar la política ambiental*. México: INE-SEMARNAT, pp. 25-40.

Davis M.L., C. D., 1998. Series in Water Resources and Environmental Engineering. En: *Introduction to Environmental Engineering*. s.l.:McGraw Hill, pp. 224-230.

De Boni LAB, Goldani E., Milcharek CD, Santos CD, Dos FA. , 2007. Tratamento físico-químico da água de lavagem proveniente da purificação do biodiesel. *Periód Tch Quim* , pp. 41-50.

Demirbas, A., 2008. *Biodiesel a realistic fuel alternative for diesel engines*. Londres: Springer.

Dias, J. e. a., 2008. Mixtures of vegetable oils an animal fat for biodiesel production: influence on product composition and quality. *Energy&Fuels*, pp. 3889-3893.

DISC, N. G., 2014. *Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center*. [En línea]
Available at: <http://mirador.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/mirador/presentNavigation.pl?tree=project&project=TRMM&dataGroup=Gridded&CGISESSID=8568cbafba6d195150a6394d00f839b2>

DOF, 2014. *Ley general del Equilibrio Ecológico y la Protección al ambiente*. México: Camara de Diputados del H. Consejo de la Unión.

Doménech X., P. J., 2006. *Química Ambiental de Sistemas Terrestres.* España: Ed. Reverté.

Dushmanta Dutta, K. W. W. D. W. D. N. S. K. L. C., 2013. A new river system modelling tool for sustainable operational management of water resources. *Journal of Environmental Management*, pp. 13-28.

E. Mollard, S. V., 2005. *Problemas socio-ambientales y experiencias organizativas en las cuencas de México*. México: IMTA-IRD.

Felipe I. Arreguá Cortés, V. A. Y. H. M. M. C. C. J. P. A. G. M. G. S. J., 2010. Los retos del agua. En: *El agua en México: Cauces y Encauces*. México: CONAGUA, Academia Mexicana de Ciencias, pp. 51-77.

- Fenglian Fu, Q. W., 2011. Removal of heavy metal ions from wastewaters. *Journal of Environmental Management*, pp. 407-418.
- Fifield, F. H. P., 2000. *Environmental Analytical Chemistry*. Segunda ed. Oxford: Blackwell Science.
- Freedman, B. P. E. M. T., 1998. *Variables Affecting the yield of fatty ester from transesterified vegetable oils*. s.l.:Am Oil Chem Soc..
- Freeman, B. E. M. T., 1986. *Variables affecting the yields of fatty esters from transesterified vegetable oils*. s.l.:Oil Chem Soc..
- Fundación Vasca para la Seguridad Agroalimentaria, 2013. *Plomo*, s.l.: elika.
- G. Jyotsna, K. K. R. C. K. V., 2005. Removal of lead (II) by adsorption using treated granular activated carbon: Batch and column studies. *J. Hazard.* , pp. 211-220.
- G. Tchobanoglous, F. B., 1991. *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse*. Singapura: McGraw-Hill.
- Gabriel Vázquez Sánchez, R. P. L., 2010. Propuesta de creación de un área de protección de recursos naturales en la cuenca alimentadora del distrito de riego 023 San Juan del Río, Querétaro.. *Ciencia UAQ*, III(1), pp. 61-70.
- García, F. G., 2014. *Remoción de cromo hexavalente utilizando un sistema de filtración con α -alúmina*. Toluca : Universidad autónoma del estado de México .
- García, G. M., 2013. *Hacia un sistema de gestión sustentable del agua para los usuarios del área metropolitana de Monterrey. Un estudio de factores socioambientales*.. Monterrey : Universidad Autónoma de Nuevo León .
- Global Water Partnership South America, 2011. Red de drenaje . En: *Contribuyendo al desarrollo de la Cultura del Agua y la Gestión Integral del Recurso Hídrico*. Perú: Sociedad Geográfica de Lima, pp. 26-28.
- Global Water Partnership; International Network of Basin Organizations, 2009. *Manual para la Gestión para la gestión integrada de recursos hídricos en cuencas*. Londres, Reino Unido: Scriptoria.
- Global Water Partnership, 2005. *Planes de Gestión Integrada del Recurso Hídrico*. Canada: Cap-Net.
- Global Water Partnership, 2005. Principios para la gestión del agua. En: *Planes de Gestión Integrada del Recurso Hídrico. Manual de Capacitación y Guía Operacional*. Canadá: Cap-Net, pp. 10-17.
- Gómez, M. U., 2010. *Simulación de una planta piloto para la producción de biodiesel en el laboratorio de operaciones unitarias de la ESIQIE*. México: Instituto Politécnico Nacional.

Gonzalez, J. E. H., 2014. *Calibración del modelo de simulación de la calidad del agua QUAL2KW del río Palo con fines de ordenamiento del recurso hídrico*, Cauca : Corporación Autónoma Regional del Cauca .

Goodchild, M. F., 2005. *Geographical information science fifteen years later*. Santa Barbara: University of California.

Grey C. Castellar Ortega, A. A. G. G., 2011. Remoción de Pb²⁺ en disolución acuosa sobre carbón activado en polvo: Estudio por lote. pp. 59-69.

Gustavo León Duarte, F. P. G., 1998. *Aspectos básicos del enfoque global para el manejo de recursos hídricos por cuencas hidrográficas*. Sonora: El Colegio de Sonora.

Hall, J. E., 2003. Bioconcentration, bioaccumulation, and biomagnification in Puget Sound biota. *Journal on Environment*, pp. 1-19.

Harris Castro, Unión Comunal Juntas de Vecinos de San Pedro Melipilla, Luis Carvajal, Comité de Defensa de los Derechos Ancestrales de Chusmiza y Usmagama, Katerina Kliwadenko, Jorge Godoy, 2010. *Conflictos por el agua en Chile entre los derechos humanos y las reglas del mercado*. Chile: Chile Sustentable.

Helena Cotler Ávalos, R. P. L., 2009. Manejo integral de cuencas en México ¿hacia dónde vamos?. *Boletín del Archivo Histórico del Agua*, pp. 16-21.

Helena Cotler Ávalos, R. P. L., 2011. *Manejo integral de cuencas en México ¿hacia dónde vamos?*, México: Boletín del Archivo Histórico del Agua.

Holguin-Gonzalez J.E., B. P. A. A. C. F. C. M. W. G. N. I. G. P., 2013. Integrating hydraulic, physicochemical and ecological models to assess the effectiveness of water quality management strategies for the river cuenca in Ecuador. *Ecological Modelling*, pp. 1-14.

INE, 2014. *Instituto Nacional de Ecología*. [En línea]
Available at: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/folletos/98/98.html>

INECC, 2014. *Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático*. [En línea]
Available at: <http://www.inecc.gob.mx/sqre-temas/763-aqre-metales>

INEGI, 2004. Edafología. En: *Guía para la Interpretación de Cartografía*. Aguascalientes: Instituto Nacional de Estadísticas y Geografía, pp. 11-24.

INEGI, 2010. *Población, Número de habitantes*. [En línea]
Available at: <http://cuentame.inegi.org.mx/poblacion/habitantes.aspx?tema=P>
[Último acceso: 13 Mayo 2015].

INEGI, 2015. *Datos de Relieve*. [En línea]
Available at: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/queesmde.aspx>

INEGI, C. I., 2007. *Documento técnico del mapa de Cuencas hidrográficas de México (escala 1:250000)*, México: INEGI, CONAGUA, INE.

Instituto Nacional de Ecología, 2004. *Análisis morfométrico de cuencas: caso de estudio del parque nacional Pico de Tancitaro*. México: INE.

Instituto Nacional de Ecología, 2005. Introducción. En: *Instructivo para la revisión de la delimitación de las Cuencas Hidrográficas de México a escala 1:250 000*. México: Dirección de Manejo Integral de Cuencas, pp. 3-6.

Ivan J. Stojkovic, O. S. S. D. S. P. V. B. V., 2014. Purification technologies for crude biodiesel obtained by alkali-catalyzed transesterification. *ScienceDirect Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 1-15.

J. Díaz, L. C. J. F., 2007. Thermal treatments of activated carbon catalysts under N₂O. *Carbon*, Volumen 45, pp. 212-214.

Jaruwat, P. S. K. M. H., 2010. Management of biodiesel wastewater by the combiner processes of chemical recovery and electrochemical treatment. *Energy Conversion and Management*, pp. 51-54.

Joana M. Dias, M. C. A.-F. M. F. A., 2008. Comparison of the performance of different homogeneous alkali catalysts during transesterification of waste and virgin oils and evaluation of biodiesel quality. *Fuel*, pp. 3572-3578.

Juan C. Valencia Vargas, J. J. D. N., 2010. *La Gestión Integrada de los Recursos Hídricos en México: Un Nuevo Paradigma en el Manejo del Agua*. México: INECC.

Karaosmanoglu F., C. K. T. M. E. S., 1996. Investigation of the refining step of biodiesel production.. *Energy Fuel*, pp. 10-890.

Karaosmanoglu F, C. K. T. M. E. S., 1996. Investigation of the refining step of biodiesel production. *Energy Fuel*, pp. 890-900.

Ken-ichiro Suehara, Y. K. E. F. J. K. Y. N. a. T. Y., 2005. Biological Treatment of wastewater Discharged from Biodiesel Fuel Production Plant with Alkali-Catalyzed Transesterification. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, pp. 437-442.

Ken-ichiro Suehara, Y. K. E. F. J. K. Y. N. T. Y., 2005. Biological treatment of wastewater discharged from biodiesel fuel production plant with alkali-catalyzed transesterification. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, pp. 437-442.

Knothe, G. e. a., 2005. *the Biodiesel Handbook*. Illinois: AOCS Press.

Lobo, F. M. d. S., 2012. *Gesta Integrada da Zona Estuarina de Rio Minho, no contexto da Implementacao da DQA*. Porto: FEUP.

- Louise Rolland, Y. V. C., 2010. La gestión del agua en México. *POLIS*, 6(2), pp. 155-188.
- Lozano G., Z. M. P. L., 2003. *Selección del Modelo de Simulación de agua en el Proyecto "Modelación de corrientes hídricas superficiales en el departamento del Quindío"*. Cartagena de Indias, Univerisdad del Valle, Instituto CINARA.
- Luis Aboites Aguilar, D. B. J. A. G. T., 2010. El manejo de las aguas mexicanas en el siglo XX. En: *El Agua en México: Cauces y encauces*. México: CONAGUA, Academia Mexicana de Ciencias, pp. 21-49.
- M. Berrios, R. S., 2008. Comparison of purification methods for biodiesel. *Chemical Engineering Journal*, pp. 459-465.
- Macias-Garcia, A., 2004. Adsorption of Pb²⁺ in aqueous solution by SO₂ treated activated carbon. *Carbon*, pp. 1755-1764.
- Maidment, D. R., 1993. *Handbook of Hydrology*. USA: McGraw-Hill, Inc.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010. *Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico*. Colombia : Dirección de Ecosistemas, Grupo de Recursos Hídricos.
- Ministerio de Salud Digesa, s.f. *Exposición al plomo en el ambiente de trabajo*, Republica Dominicana : Dirección General de Salud Ambiental .
- Monroy, N. A., 2007. ¿Por qué considerar a la microcuenca?. En: *La microcuenca como elemento de estudio de la vulnerabilidad ambiental*. Michoacan: El Colegio de Michoacán, pp. 1-6.
- NASA, G. D., 2014. *Goddard Earth Sciences Data and Information Service Center*. [En línea] Available at: [http://mirador.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/mirador/granlist.pl?allversion=007&page=1&pointLocation=\(-90,-180\),\(90,180\)&dataSet=TRMM_3B43&version=007&startTime=2014-01-01T00:00:01Z&endTime=2014-01-31%2023:59:59&keyword=3B43:%20Monthly%20&longname=TRMM%20and%20](http://mirador.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/mirador/granlist.pl?allversion=007&page=1&pointLocation=(-90,-180),(90,180)&dataSet=TRMM_3B43&version=007&startTime=2014-01-01T00:00:01Z&endTime=2014-01-31%2023:59:59&keyword=3B43:%20Monthly%20&longname=TRMM%20and%20)
- Nordberg M. Templeton D. M., A. O. D. J., 2009. Glossary of terms used in ecotoxicology. *Pure and Applied Chemistry*, pp. 829-970.
- Odum, E., 1985. Fundamentos de Ecología. En: Estados Unidos de America: Interamericana, p. 422.
- ONU-Agua, 2006. *Combatir la escasez de agua: El desafío del siglo XXI*, s.l.: s.n.
- ONU-DAES, Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de las Naciones Unidas, 2015. *La escasez de agua*. [En línea] Available at: <http://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/scarcity.shtml>
- P. Suhas, M. C. R. C., 2007. Lingnin-from natural adsorbent to activated carbon: A review. *Bioresource Technol*, Volumen 98, pp. 2301-2312.

Parlamento de la Unión Europea, 2009. *Promoción de la utilización de energía proveniente de fuentes renovables que altera y subsecuentementederogatoria las directivas*. Europa: Jornal Oficial de la Unión Europea.

Pezo D., P. A. B. A., 1992. *Determinación de metales pesados bioacumulables en especies ictivas de consumo humano en la amazonia peruana.* , Perú: Folia Amazónica.

PNUD, 2006. *Informe sobre Desarrollo Humano: Más allá de la escasez: Poder, pobreza*, s.l.: s.n.

PNUD, 2011. *Informe sobre Desarrollo Humano 2011*. Nueva York: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.

PNUMA, 2004. *Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente*. Nairobi : Year Book 2003.

R.L., L., 1942. Thr Trophic dynamic aspect of ecology. *Ecol (23)*, pp. 399-418.

Radojevic M., B. V., 2006. *Practical enviromental analysis*. England: The Royal Society of Chemistry, 2nd Ed. Cambridge.

Rand, G. P. W. L., 1995. Fundamentas of Aquatic Toxicology. *Introduction to Aquatic Ecology*, pp. 3-53.

Raquel O. Cristóvão, C. M. B. R. J. J. M. L. R. A. R. B., 2014. Primary treatment optimization of fish canning wastewater from a Portuguese plant. *Water Resources and Industry*, pp. 51-63.

Rattanapan, C. A. S. T. S. C. S., 2011. Enhanced Efficiency of dissolved air flotation for biodiesel wastewater trearment by acidification and coagulation processes. *ScienceDirect*, pp. 280-204.

Romero-Bañuelos, M., 2003. *Hidrología y metales pesados en la materia particulada suspendida del agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz, B.C.S.,*. México: s.n.

Samaniego, X. M. C., 2009. *Análisis de la concentración de arsénico en tres alimentos (papas (Solanum tuberosum), maíz (Zea mays) y leche cruda) producidas en las zonas afectadas por el volcán Tungurahua (Guano-Penipe)*. Riobamba: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

San Juan del Río H. Ayuntamiento, 2013. *Plan Municipal de Desarrollo 2013-2015*. Quetérato: s.n.

Sánchez, A. A. C., 2010. *Ecaluación experimental de la producción de biodiesel por destilación reactiva*. Manizales: Universidad Nacional, Facultad de Ingeniería y Arquitectura.

Sánchez, O. E., 2010. *Bioacumulación y biomagnificación de mercurio y selenio en peces pelágicos mayores de la costa occidental de Baja California Sur, México*. La Paz: IPN-CICIMAR.

Sant'Ana, A., 2014. Physical Removal of Microalgas. *Encyclopedia of Food Microbiology*, pp. 30-35.

- Sara Ibáñez Asensio, H. M. R. J. M. G. B., 2005. Concepto de coeficiente de escorrentía. En: *Métodos para la determinación del coeficiente de escorrentía (c)*. Valencia : Universidad Politécnica de Valencia, pp. 3-5.
- Sayas, J. L., 2011. *EAA para la Determinación Elemental en Té Instantaneo*. España: Universidad de Zaragoza.
- Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2012. Grado de Presión . En: *Informe de la situación del medio ambiente en México-Compendio de las estadísticas ambientales indicadores clave y de desempeño ambiental* . México: SNIARN, p. 271.
- SEMARNAT, CONAGUA, 2013. Grado de Presión sobre el recurso. En: *Estadísticas del Agua en México*. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, p. 59.
- SEMARNAT, 2008. Aguas superficiales. En: *Estadísticas del Agua en México*. México: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, pp. 35-36.
- SEMARNAT, 2010. Documentos básicos de los consejos de cuenca. En: *Consejo de cuenca*. México: SEMARNAT, pp. 12-22.
- Shiklomanov, I. J. R., 2003. *World Water Resources at the Beginning of the Century*. París: UNESCO.
- Simonian, L., 1999. *LA defensa de la tierra del jaguar. una historia de la conservación en México*. México: SEMARNAP-CONABIO-IMERNAP.
- Sorenson, S., 1909. *Über die Messung und die Bedeutung der Wasserstoff ionen Konzentration bei Enzymatischen Prozessen*. Alemania: Biochem.
- Srirangsan A., O. M. C. O., 2009. Treatment of biodiesel wastewater by electrocoagulation process. *Environ Asia*, pp. 9-15.
- Suzuki M., K. S., 1990. Equilibrium and rates of ammonium ion exchange by clinoptilolite. *Chemistry Engineering*, pp. 139-145.
- T. del N. J. García-Costa, V. M. d. I. C.-G. I. N.-M. O. S.-D. Y. R.-O. T. L.-A., 2009. Purificación de biodiesel obtenido de aceite de ricinus. *Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología de Superficies y Materiales*, pp. 20-23.
- Umaña, I. A., 2007. *Las cuencas y la gestión del riesgo a los desastres naturales en Guatemala*. Guatemala: FAO.
- Umaña, I. A., 2007. *Las cuencas y la gestión del riesgo a los desastres naturales en Guatemala*. Guatemala: FAO Guatemala.
- Unidas, N., 2014. *Declaración sobre la Calidad del Agua de «UN Water»*. [En línea] Available at: http://www.un.org/es/events/waterday/wwd_waterquality.shtml

Vázquez, Á. R., 2011. *Diagnóstico Ambiental Integral de la Ciudad de San Juan del Río, Querétaro*. Querétaro: Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Querétaro.

Vlada B. Veljkovic, O. S. S. M. B. T., 2014. The wastewater treatment in the biodiesel production with alkali-catalyzed transesterification. *Renewable and Sustainable Energy Reviews (ELSEVIER)*, pp. 40-60.

W. Wesley Eckenfelder, J., 2000. *Industrial Water Pollution Control*. Singapura: McGraw-Hill.

W. Wesley Eckenfelder, J., 2000. *Industrial Water Pollution Control*. Singapura: McGraw-Hill.

World Vision, 2000. Definición de ambiente, calidad de vida, recursos naturales, desarrollo sostenible y cuenca hidrográfica.. En: *Manual de Manejo de Cuencas*. Canadá: World Vision, pp. 8-14.

Carabias, J. & Landa, R. (2005). Agua, medio ambiente y sociedad. Hacia la gestión integral de los recursos hídricos en México. México: UNAM/El Colegio de México/Fundación Gonzalo Río Arronte.

SHIKLOMANOV, I.A., y J. RODDA. 2003. *World Water Resources at the Beginning of the Century*. UNESCO, París.

PNUMA. 2004. *GEO. Year Book 2003*. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Nairobi.