



CAPÍTULO 8

Tratamiento de aguas residuales

Diana Marcela Fúquene

Andrea Yate-Segura

Diego Alejandro Pérez

Carlos Mario Duque Chaves

Juan Sebastián Chiriví Salomón

Christian Felipe Valderrama López

Víctor Fabián Forero Ausique¹³

8.1. Introducción

La calidad del aire, el estado del suelo, el control de las inundaciones y la polinización de cultivos, son algunos de los servicios ecosistémicos de regulación que a menudo son desapercibidos, pero cuando se ven deteriorados; ya sea por motivos naturales o infringidos por el ser humano, las pérdidas que ocasionan llegan a ser devastadoras y resultan difíciles de recuperar. La agricultura, silvicultura y pesca son las actividades principalmente afectadas por la regulación de los flujos de agua, considerando tanto su cantidad como su calidad, ya que el agua es un servicio clave, que depende directamente de la cobertura y la configuración del suelo. Sin embargo, su dinámica no ha sido puesta en escena sobre la formulación de políticas de gestión, ni sobre el ordenamiento del territorio nacional; dejando de lado el tratamiento de las aguas residuales como factor preponderante en la reducción del daño sobre los recursos hídricos que ocasiona el vertimiento de aguas contaminadas, y/o la implementación de sistemas de tratamiento inadecuados (FAO, 2018).

El recurso hídrico tiene múltiples usos, desde la preservación de especies hasta el riego y la recreación; pasando por el enfriamiento de plantas industriales y el aprovechamiento de las corrientes generadas en ríos para proporcionar

¹³ Docentes de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia. Escuela de Ciencias Agrícolas Pecuarias y del Medio Ambiente. Correos electrónicos de contacto: diana.fuquene@unad.edu.co, andrea.yate@unad.edu.co, diego.perez@unad.edu.co

electricidad. Si bien, a menudo los lagos y llanuras aluviales no son contemplados como depósitos de agua dulce, amortiguadores de inundaciones y/o purificadores de agua, su contaminación reduce significativamente la contención de especies acuáticas y limita la disponibilidad de agua potable, de ahí la importancia de contar con bases teóricas que permitan establecer los tratamientos a los que debe ser sometido un efluente para no alterar negativamente la calidad de las fuentes hídricas receptoras de aguas residuales (Kosmus *et al.*, 2012).

En este sentido, es necesario planificar y gestionar integralmente las fuentes hídricas, así como los efluentes industriales y domésticos a nivel nacional y municipal. Logrando que las aguas residuales se conviertan en parte integral de la planificación urbana y de la gestión integrada de las cuencas y costas, vinculando a la población que hace uso de este preciado líquido en actividades antropogénicas e industriales, y son quienes deben tener bases conceptuales que les permitan hacer un uso racional y eficiente del agua (ONU, 2015).

El presente capítulo pretende integrar los servicios ecosistémicos con el desarrollo de una población, reconociendo los vínculos entre naturaleza y progreso, prevaleciendo la conservación de los recursos hídricos.

8.2. Seguridad hídrica

El ciclo del agua juega un papel importante en muchos aspectos, desde las condiciones del clima, hasta en las interacciones químicas y biológicas de la tierra, haciendo que sea difícil definirlo como un servicio distintivo de aprovisionamiento, regulación o soporte, esto hace que sea tratado como un único sistema de aguas continentales, esencial en la entrega de servicios ecosistémicos a la humanidad (Vörösmarty *et al.*, 2005). En este sentido, su abastecimiento deja a los ecosistemas en el centro del enfoque de la gestión integral de los recursos hídricos; que permitan el almacenamiento de agua dulce, la regulación de caudales y la reducción de riesgos asociados a desastres relacionados con el agua (Global Water Partnership, 2005).

El estudio y manejo de este servicio involucra procesos físicos y químicos sumados al papel que la diversidad biológica juega en el ciclo hidrológico, considerando a su vez, que la disponibilidad de agua de buena calidad depende de los

ecosistemas que lo contienen, así como, de los procesos humanos de distribución, manejo y gestión del recurso y, en general, del territorio (Alcaldía de Medellín, 2015; MADS, 2017).

8.3. Aprovisionamiento y regulación de agua de buena calidad

El crecimiento poblacional, la industrialización y la creciente expansión en la última década, han sido catalogados como algunos de los aspectos más significativos en la transformación y pérdida de ecosistemas naturales, que a su vez ha generado un incremento en la demanda de bienes y servicios relacionados con el agua (MADS, 2017). En contraste, el acceso al agua limpia está reduciéndose, debido a la contaminación de los acuíferos y las aguas subterráneas, tendencia que produce una competencia por el agua entre las áreas urbanas y rurales (Vörösmarty, *et al.*, 2017).

En Colombia, los eventos por precipitación de alta intensidad que ocurren en lo que conocemos como *fenómeno de la Niña*, y que tuvo un gran impacto en los años 2010 y 2011; así como, la divergencia hacia el *fenómeno del niño* en 2015, que generó sequía en amplias zonas del país y, en consecuencia, desabastecimiento de agua, imponen retos en la toma de acciones preventivas, que requieren del conocimiento del territorio y que permitan, a su vez, que se pueda responder de manera oportuna y adecuada ante futuros eventos (Betancur-Vargas *et al.*, 2017). Todo esto, enmarcado en los objetivos de desarrollo del Milenio, sobre los cuales Colombia contempla metas para que se garantice al 100% de la población, la disponibilidad y gestión sostenible del agua, así como el saneamiento básico para el 2030 (MADS, 2014; Findeter, 2017).

Es evidente que el uso del agua no se puede tratar como un tema aislado del problema de aprovisionamiento. Entre las principales problemáticas que afectan la continuidad del suministro de agua potable en Colombia, se encuentra el progresivo deterioro de sus fuentes hídricas, causado tanto por contaminación natural, como, por arrastre de materia orgánica natural, material disuelto y particulado, entre otros; y causas de origen antrópico, debido a los efluentes residuales de aguas domésticas e industriales, escorrentía agrícola y demás, que hacen que las fuentes abastecedoras se conviertan en un riesgo sanitario (Pérez-Vidal *et al.*, 2012; Utrera *et al.*, 2013), definido por Torres & colaboradores (2009) como “el riesgo de transportar agentes contaminantes que puedan causar enfermedades de origen hídrico al hombre y los animales”.

En función de lo anterior, es importante implementar monitoreos de control que permitan establecer alertas tempranas aguas arriba de la captación (Pérez-Vidal *et al.*, 2012). No obstante, dada la riqueza en recursos hídricos con la que cuenta Colombia, es necesario priorizar los programas y proyectos de los cuerpos de agua involucrados en el abastecimiento de las poblaciones, así como de las fuentes hídricas que reciben vertimientos, empleando herramientas como los índices de calidad del agua (ICA) e indicadores de contaminación (ICO) (Jaramillo-Rojas *et al.*, 2011).

8.3.1. Índices de Calidad del Agua (ICA)

Para la estimación de la disponibilidad y calidad del agua en Colombia, las autoridades ambientales desarrollaron el “Sistema de Indicadores Hídricos - SIH” que permiten determinar las afectaciones de las actividades humanas sobre la oferta del recurso, contemplando características fisicoquímicas y microbiológicas de los cuerpos hídricos y de las variables de contaminación (IDEAM, 2014).

El índice de calidad en corrientes superficiales es una herramienta sencilla que permite evaluar el recurso hídrico, basándose en los datos de muestreo de parámetros físicos, químicos y microbiológicos que aportan información sobre la condición ambiental de una corriente. Es importante resaltar que el índice ofrece información puntual, en un momento específico y para un escenario climático determinado, por lo tanto, requiere de un seguimiento histórico para establecer la condición de la corriente (Ramírez *et al.*, 1997; Jaramillo-Rojas *et al.*, 2011). Desde 2005, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM, calcula el ICA a través del monitoreo de cinco parámetros fisicoquímicos (sólidos suspendidos totales, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, demanda química de oxígeno y pH). Sin embargo, a partir del 2009 introdujo la relación nitrógeno total/fósforo total en la medición. El sistema de evaluación de la calidad establece que las mediciones se realicen sistemáticamente cada tres meses (IDEAM, 2011).

El ICA es una expresión numérica que se obtiene de la sumatoria aritmética equiponderada de la medición de cinco o seis parámetros fisicoquímicos básicos, que son monitoreados por la Red Básica de Monitoreo de la Calidad de Agua. Los valores obtenidos del ICA son clasificados por rangos, definiendo el agua como buena, aceptable, regular, mala o muy mala.

Teniendo en cuenta que la calidad del agua cuenta con unos parámetros más representativos que otros, se asignan pesos relativos a cada parámetro representado por W ; para el cálculo del ICA con cinco parámetros, este peso relativo es de 0.2 para todos los parámetros, mientras que, para el caso de seis variables, el peso relativo es de 0.17, a excepción del pH que cuenta con un peso relativo de 0.15. La ecuación empleada para el cálculo del ICA es:

$$ICA_{njt} = \left[\sum_{i=1}^n W_i \cdot I_{ikjt} \right]$$

Donde:

ICA= índice de calidad del agua, escala de 0 a 1.

W_i = Peso relativo o factor de ponderación.

n = Número de variables de calidad involucradas.

I_{ikjt} = Valor calculado de la variable i , en la estación de monitoreo j , registrado durante la medición realizada en el trimestre k , del periodo de tiempo t .

Las ecuaciones funcionales o subíndices para cada variable empleada en el cálculo del índice se presentan en la tabla 8.1.

Tabla 8.1. Ecuaciones de subíndices del ICA según IDEAM (2011).

Parámetro		Ecuación	Condiciones	
1	Porcentaje de saturación del oxígeno disuelto.	$PS_{OD} = \frac{(O_x \cdot 100)}{C_p}$	O_x : C_p :	Oxígeno disuelto medido en campo (mg/l). Concentración de equilibrio de oxígeno (mg/l).
	Oxígeno Disuelto ($PS_{OD} > 100\%$)	$I_{OD} = 1 - (1 - 0.01 \cdot PS_{OD})$		
	Oxígeno Disuelto ($PS_{OD} > 100\%$)	$I_{OD} = 1 - (0.01 \cdot PS_{OD} - 1)$		
2	Sólidos suspendidos totales.	$I_{SST} = 1 - (-0.02 + 0.003 \cdot SST)$	Si	$SST \leq 4.5 \rightarrow I_{SST} = 1$ $SST \geq 320 \rightarrow I_{SST} = 0$
3	Demanda química de oxígeno.	Se rige bajo un rango específico del parámetro.	Si	$DQO \leq 20 \rightarrow I_{DQO} = 0.91$ $20 < DQO \leq 25 \rightarrow I_{DQO} = 0.71$ $25 < DQO \leq 40 \rightarrow I_{DQO} = 0.51$ $40 < DQO \leq 80 \rightarrow I_{DQO} = 0.26$ $DQO > 80 \rightarrow I_{DQO} = 0.125$
4	Conductividad eléctrica.	$I_{C.E} = 1 - 10^{(-3.26 + 1.34 \cdot \log \log (C.E))}$	Si	$I_{C.E} < 0 \rightarrow I_{C.E} = 0$
5	pH, si $4 \leq pH \leq 7$	$I_{pH} = 0.02628419 \cdot e^{(pH \cdot 0.520025)}$	Si	$pH < 4 \rightarrow I_{pH} = 0.1$ $7 < pH \leq 8 \rightarrow I_{pH} = 1$ $pH > 11 \rightarrow I_{pH} = 0.1$
	pH, si $8 < pH \leq 11$	$I_{pH} = 1 \cdot e^{((pH-8) - 0.5187742)}$		
6	Nitrógeno total/ Fósforo total.	Se rige bajo un rango específico del parámetro	Si	$15 \leq NT/PT \leq 25 \rightarrow I = 0.8$ $10 < NT/PT < 15 \rightarrow I = 0.6$ $5 < NT/PT \leq 10 \rightarrow I = 0.35$ $NT/PT \leq 5 \rightarrow I = 0.15$ $NT/PT > 20 \rightarrow I = 0.15$

Fuente: autor, adaptado de (IDEAM, 2011).

Una vez calculado el índice es posible clasificar la calidad del recurso hídrico según lo indicado en la Tabla 8.2, de acuerdo a lo establecido por el IDEAM (2011):

Tabla 8.2. Clasificación de la calidad del agua.

Categoría	Clasificación	Señal de alerta
0.91 – 1.00	Buena	
0.71 – 0.90	Aceptable	
0.51 – 0.70	Regular	
0.26 – 0.50	Mala	
0.00 – 0.25	Muy mala	

Fuente: (IDEAM, 2011).

8.3.2. Índices de Contaminación (ICO)

A nivel nacional se han desarrollado diferentes estudios enfocados a la adaptación o mejora de los ICA de acuerdo con las características de algunas fuentes superficiales. Ramírez *et al.*, (1997), por su parte, desarrollaron los índices de contaminación ICO, enfocado principalmente a la industria petrolera. Estos índices correlacionan variables fisicoquímicas que denotan una misma condición ambiental. A diferencia de los ICA, los ICO no generan un valor global, sino que cada indicador debe ser analizado por separado, lo que permite precisar y profundizar en la identificación de problemas ambientales.

De acuerdo con Ramírez & colaboradores (1997, 1999), las correlaciones halladas dieron como origen los seis indicadores de contaminación presentados en la Tabla 8.3, y tres específicos que evalúan los hidrocarburos alifáticos.

Tabla 8.3. Parámetros correlacionados en ICO.

Indicador de Contaminación	Parámetros Correlacionados
ICOMi: Índice de Contaminación por Mineralización	Dureza, alcalinidad y conductividad eléctrica.
ICOMO: Índice de Contaminación por Materia Orgánica	Demanda bioquímica de oxígeno, coliformes totales y porcentaje de saturación de oxígeno.
ICOSUS: Índice de Contaminación por Sólidos Suspendidos	Sólidos suspendidos totales.
ICTOTRO: Índice de Contaminación Trófica	Fósforo total.
ICOTEMP: Índice de Contaminación por Temperatura	Temperatura.
ICOpH: Índice de Contaminación por pH	pH.

Fuente: autor, adaptado de (Ramírez *et al.*, 1999).

El cálculo tanto del ICA como de los ICO puede realizarse sistematizadamente en el programa ICATest, una herramienta que permite obtener el valor de la calidad del agua ingresando los parámetros fisicoquímicos requeridos para cada indicador. Sin embargo, se debe considerar que algunos indicadores como el ICOTRO no pueden ser calculados empleando esta herramienta y requieren su medición manual (Fernandez & Solano, 2005; González, 2017).

8.4. Sistemas de conducción de las aguas residuales

Los sistemas de conducción de las aguas residuales tienen el objetivo de recoger los vertimientos en el sitio de origen y conducirlos hasta los sistemas de tratamiento, su diseño requiere de un arduo trabajo de ingeniería, con el fin de evitar daños en la salud pública y contaminación del ambiente, así como del apoyo de todas las personas para su correcto funcionamiento; a través del control del estado de las tuberías, la separación de las redes de aguas lluvias, vertimientos domésticos e industriales y la limpieza de las áreas públicas.

Durante el último siglo, los sistemas hidráulicos para la conducción de aguas residuales se han convertido en una alternativa técnicamente viable que brinda solución a una serie de problemáticas que, en materia de ingeniería, se vienen generando como resultado de un mala planificación de los territorios; no obstante, el transporte de estas aguas es el único y mejor medio para tratar el problema de salud pública y la contaminación de ecosistemas que generan las aguas residuales, haciendo importante la instauración de nuevos procesos que permitan el tratamiento de las aguas residuales antes de su vertido o disposición en las fuentes hídricas. Por lo general, los sistemas de conducción de aguas residuales trabajan bajo dos condiciones hidráulicas, que son los sistemas de conducción a flujo cerrado y a flujo abierto.

8.4.1. Sistemas de conducción a flujo cerrado

Estos sistemas hacen referencia a las tuberías que transportan las aguas residuales, cuya particularidad es que no tienen una superficie libre, por lo tanto, el agua llena completamente el conducto y está sometido a la presión hidráulica. Como la carga contaminante que tienen los vertimientos es alta y fluctuante, es importante tener en cuenta el material (PVC, PEAD, GRP, concreto, hormigón, entre otros) del sistema; ya que puede sufrir problemas de corrosión (debido a los pH ácidos o alcalinos), incrustaciones (ocasionadas por los sólidos sedimentables) y malos olores (generados por la materia orgánica).

Por lo general se utilizan tuberías circulares para el transporte de las aguas residuales, debido a que esta forma ofrece una mayor resistencia estructural y una mayor sección transversal; sin embargo, existen otras geometrías como las cuadradas o rectangulares. Lo importante es que la tubería tenga hermeticidad, resistencia mecánica, durabilidad, resistencia a la corrosión, capacidad de conducción, economía, facilidad de manejo e instalación, flexibilidad y facilidad de mantenimiento y reparación (Comisión Nacional del Agua, s.f).

Las tuberías que deban ser instaladas debajo de carreteras, deben utilizar tramos cortos y materiales resistentes, que soporten el peso de los vehículos, como por ejemplo el hormigón. Teniendo precaución con la calidad de las juntas en las uniones de los diferentes tramos de tubería y de las conexiones finales. De aquí la importancia de colocar estructuras a distancias cortas, que permitan explorar el estado del sistema. Dentro de las más utilizadas se encuentran los aliviaderos, los sifones, los interceptores y las cajas de inspección.

Los tipos de flujo que se manejan en las tuberías son laminar y turbulento, en el primero el agua fluye siguiendo trayectorias regulares, separadas y definidas, bajo la ley de Newton de la viscosidad; mientras que en el segundo el agua se mueve en trayectorias libres muy irregulares, ocasionando la transferencia de cantidad de movimiento de una porción de fluido a otro. Estos flujos se ven afectados por diferentes factores como lo son el material de la tubería (por ejemplo, la tubería de PVC lisa circular facilita el flujo laminar), la forma de ingreso del agua a la tubería (generación de turbulencia a la entrada de la tubería) y calentamiento de la superficie (si la superficie de contacto está muy caliente, se transmitirá esa energía al fluido y si es muy grande se recomienda pasar de flujo laminar a turbulento).

8.4.2. Sistemas de conducción a flujo abierto

La conducción a flujo abierto hace referencia a los canales, en los cuales, el flujo se encuentra en una superficie libre sometida a la presión atmosférica. Por lo general el flujo se presenta por acción de la gravedad y la regulación del flujo se hace mediante compuertas (su finalidad es evacuar el agua excedente y vaciar los tramos de los canales para efectos de reparación), cámaras de distribución (se utilizan para distribuir el caudal en varias direcciones), caídas (reducen la pendiente del canal y la velocidad del agua), tanques de sedimentación (eliminan las partículas del suelo que se encuentran suspendidas en el agua) o cuencos amortiguadores (reducen la velocidad del agua). Una desventaja de los canales

de flujo abierto es que las condiciones de la superficie pueden cambiar en función del tiempo y el espacio, llevando a una interdependencia entre la profundidad de flujo, las pendientes del fondo del sumidero, el caudal y la superficie libre (Ardila-Cárdenas, 2015). En este sistema la sección transversal del flujo está definida por la geometría del conducto que puede ser de cualquier forma, desde circular hasta tener formas irregulares en ríos. La rugosidad varía con la posición de una superficie libre, por consiguiente, la selección de los coeficientes de fricción tiene una mayor incertidumbre (Ardila-Cárdenas, 2015).

Por lo general, los tipos de flujo que se manejan en los canales son *uniforme* y *no uniforme*. El primero se da cuando la velocidad de transporte del agua residual en la profundidad es constante, es decir en canales con altura constante, mientras que el segundo se da cuando la velocidad es rápidamente variada por cambio de profundidad de manera abrupta en distancias cortas, como el que se busca en los resaltos hidráulicos.

8.5. Hidrodinámica de los sistemas de conducción de aguas residuales

La hidrodinámica hace referencia al estudio de las propiedades y el comportamiento de los líquidos en movimiento. En el caso de las aguas residuales las condiciones hidráulicas de mayor influencia son los caudales y las velocidades; por lo general, los caudales dependen de las descargas que haga la fuente que origina los vertimientos, es decir, las industrias, los hogares, los cultivos, las fincas, entre otros. Su importancia radica en los cambios en las condiciones de operación de los sistemas de conducción y de tratamiento que ocasionan, por ejemplo un aumento en el caudal puede ocasionar cambio de flujo laminar a turbulento y disminuir los porcentajes de remoción de la planta de tratamiento; en cuanto a la velocidad, se debe mantener en un valor mínimo (depende de las características del agua residual) que permita la autolimpieza de los conductos y evite la sedimentación de las partículas sedimentables en lugares indeseados.

Existen diversos modelos en el mercado, pero se considera importante en este capítulo referenciar el modelo uni-dimensional OTIS (One-Dimensional Transport with Inflow and Storage - Runkel, 1998) que, si bien presenta condiciones de contorno un poco antiguas, en términos de hidrodinámica su aplicabilidad es sumamente importante. Éste se basa en el modelo de almacenamiento transitorio (Transient Storage - TS) formulado por Bencala & colaboradores (1983), donde se

utiliza una simulación matemática para cuantificar los procesos físicos que afectan las sustancias conservativas tales como trazadores y para la caracterización del transporte de solutos en arroyos y ríos pequeños de montaña, bajo la suposición de flujo unidimensional, donde la masa del soluto se supone uniformemente distribuida a lo ancho y profundo de la sección, en consecuencia, la concentración del soluto varía únicamente en la dirección longitudinal.

8.6. Procesos unitarios para el tratamiento de aguas residuales

Las repercusiones que sectores como la agricultura, la ganadería y la pesca producen a los servicios ecosistémicos de los cuales se benefician, pueden ser positivos o negativos, si se consideran aspectos propios de los residuos generados, que pueden ser fuente importante para mantener la fertilidad de los suelos; sin embargo, un exceso de residuos, o su gestión deficiente, pueden conllevar a la contaminación desmesurada del recurso hídrico, poniendo en riesgo la biodiversidad acuática (FAO, 2018). Por esta razón, esta sección se centra en la depuración de las aguas residuales industriales y domésticas, abarcando su importancia ambiental y sanitaria, presentando además, variables importantes en el dimensionamiento, diseño y manejo integral de los sistemas de tratamiento de aguas residuales.

El tratamiento de aguas residuales tiene como principio básico proteger la salud y el bienestar de la sociedad. El uso directo o indirecto de las fuentes hídricas es cada día mayor en función del crecimiento poblacional, esto hace que de igual forma aumente el retorno de aguas contaminadas a las fuentes hídricas, lo que conlleva a la necesidad de proveer sistemas de tratamiento o recuperación que mitigue los impactos al ambiente y a la salud, situación que sólo se puede realizar a través del conocimiento de operaciones y procesos unitarios de interés ambiental y sanitario, las cuales se clasifican en pretratamientos, tratamientos primarios, tratamientos secundarios y tratamientos terciarios (Romero-Rojas, 2005).

8.6.1. Pretratamientos

Los pretratamientos, también llamados tratamientos preliminares, tienen como objetivo remover del agua residual contaminantes que afecten de manera negativa el mantenimiento y operación de los procesos posteriores, estos abarcan una serie de procesos físicos y/o mecánicos que conllevan a la reducción de los sólidos suspendidos y permiten acondicionar los vertimientos para los procesos posteriores. Dentro de los pretratamientos se encuentran:

- **Desarenador:** deben ser instalados después de las rejillas, antes de los tanques de sedimentación primaria y estaciones de bombeo, con el fin de proteger los equipos mecánicos contra la abrasión, evitar la sedimentación de arenas en tuberías y canales, reduciendo la formación de depósitos pesados, minimizar la pérdida de volumen en tanques de tratamiento biológico y reducir la frecuencia de limpieza de los digestores, debido al exceso de la acumulación de arenas.
- **Rejillas:** se emplean principalmente para retener sólidos gruesos en suspensión en el agua o sustancias que por su densidad permanecen flotando en la superficie, principalmente, papel, trozos de madera, cáscaras de frutas, latas, entre otros, transportados por la red de alcantarillado. La Figura 8.1, presenta estas estructuras que por lo general son dispuestas aguas arriba de las estaciones de bombeo o de los procesos que son susceptibles a obstruirse por el material grueso que trae el agua residual cruda.



Figura 8.1. Reja de cribado para detener material sólido grueso.

Fuente: Carlos Collazos (2009).

- **Remoción de grasas:** es importante reducir la carga de grasas y aceites del agua residual debido a que estas pueden acumularse en las alcantarillas y bombas obstruyéndolas, pueden causar problemas de flujo en los sedimentadores y dificultan el proceso de secado de lodos. Los sistemas más

utilizados para su remoción son las trampas de grasas, que consisten en un tanque con un diseño hidráulico y un tiempo de retención adecuado (por lo general es de 15 a 30 minutos) que permita la separación diferencial por gravedad de las grasas y aceites; para un buen funcionamiento de este equipo deben evitarse las cargas hidráulicas súbitas.

- **Homogenización:** este pretratamiento permite regular o reducir los efectos de la variación de la concentración de los afluentes o del flujo. Este proceso consiste en atenuar las variaciones de caudal empleando tanques de forma arbitraria con la capacidad suficiente para contener el flujo de agua que sobrepasa un determinado valor, lo que permite mejorar los tratamientos biológicos, mejorar la calidad del efluente y el rendimiento de los tanques de sedimentación secundaria, adicionalmente, favorece el control de la dosificación de reactivos químicos e incrementa el rendimiento de los sistemas de tratamiento cuando están sobrecargados.

8.6.2. Tratamientos primarios

Estos procesos se enfocan en la remoción parcial de sólidos suspendidos, materia orgánica u organismos patógenos presentes en las aguas residuales, mediante el proceso físico de asentamiento en un tanque de sedimentación. Los tratamientos primarios primordiales en un sistema de tratamiento de aguas residuales, son:

- **Sedimentación:** consiste en la separación, por la acción de la gravedad, de las partículas suspendidas cuyo peso específico es mayor que el del agua (Metcalf & Eddy, 1998). Es un proceso físico en el cual se remueven arenas, sólidos suspendidos, lodos provenientes de los procesos biológicos y materia orgánica que trae el agua residual. De acuerdo con la interacción que tengan las partículas, la sedimentación puede ser discreta (usada para remover arenas), floculante (en algunos casos se pueden adicionar coagulantes de origen químico o natural, con el fin de incrementar la eficiencia en la remoción de los contaminantes), zonal (usada a la salida del tratamiento biológico) y por compresión (usada en los procesos de tratamiento de lodos).
- **Flotación:** es un proceso unitario que se emplea para la remoción de la materia suspendida, además, permite concentrar los lodos biológicos mediante la separación de partículas sólidas o líquidas en un medio líquido. Dicha separación se logra introduciendo burbujas muy finas de gas (normalmente aire) en

la masa líquida; estas se adhieren a las partículas suspendidas y las arrastran hacia la superficie produciendo la separación. La principal ventaja de este proceso en contraste con la sedimentación, es que requiere de menor tiempo para eliminar las partículas pequeñas, que se caracterizan por tener sedimentación lenta. El proceso más utilizado es la Flotación por Aire Disuelto (DAF), presentado en la figura 8.2, donde el agua residual se presuriza con aire en un tanque cerrado, luego es introducida al tanque de flotación pasando por una válvula reductora de presión. El súbito cambio de presión genera burbujas de 50 a 100 micras de diámetro y las burbujas ascienden a la superficie arrastrando consigo las partículas suspendidas (sólidos, aceites y grasas). En los sistemas de tratamiento de mayor tamaño, se tiende a recircular parte del efluente (entre el 15 y 120%), el cual se presuriza y semi-satura con aire.



Figura 8.2. DAF de la PTAR de una industria de productos lácteos.

Fuente: Autor (2007).

- **Coagulación:** es el proceso unitario más utilizado en los sistemas de tratamiento de aguas residuales, consiste en la adición de coagulantes químicos (como el cloruro férrico, la cal, el alumbre, el cloruro de aluminio, el sulfato ferroso, entre otros) o de origen natural (como el almidón de yuca, el quitosano, el almidón de plátano, la moringa, el café, entre otros), para desestabilizar las partículas mediante neutralización de carga y floculación durante el proceso de sedimentación, al unirse las partículas, estas aumentan de masa y sedimentan a mayor velocidad.

- **Neutralización:** también llamado ajuste de pH, se realiza con el fin de proteger las fuentes hídricas receptoras de descargas alcalinas o ácidas fuertes, para favorecer los tratamientos biológicos y para ejercer control de la corrosión. Se lleva a cabo mediante la adición de una sal (normalmente cal o hidróxido de sodio) o un ácido (normalmente ácido sulfúrico o clorhídrico) para obtener un pH cercano a 7,0.
- **Filtración:** se utiliza con el fin de remover sólidos, material no sedimentable, turbiedad, fósforo, DBO, DQO, metales pesados o virus. Estas remociones dependen del lecho filtrante (puede ser carbón coque, arena, grava, gravilla, carbón activado, entre otros) e involucra mecanismos de remoción diferentes como el cribado, la interceptación, la adsorción y la absorción, floculación y sedimentación. La operación completa de filtración consta de dos fases: filtración y lavado (también llamado retrolavado). La fase de filtración es prácticamente igual para todos los sistemas, pero la fase de lavado depende del funcionamiento del filtro (operación continua o discontinua) y del lecho filtrante que se esté utilizando.

8.6.3. Tratamientos secundarios

Se usa principalmente para la remoción de DBO soluble y sólidos suspendidos, abarcando tanto los procesos aerobios como anaerobios (Ramalho, 1996). Los tratamientos secundarios básicos en un sistema de tratamiento de aguas residuales, son:

- **Tanque séptico:** se usa con el fin de remover sólidos suspendidos, materia orgánica y material flotante; en este proceso la sedimentación y la digestión ocurren dentro del mismo tanque y puede considerarse como un digestor convencional a escala limitada. Su uso frecuente es en la depuración de las aguas residuales domésticas generadas en las áreas suburbanas, o en zonas rurales donde no existe un sistema de alcantarillado sanitario.
- **Tanque imhoff:** es un sistema de tratamiento anaerobio de dos pisos, un poco más sofisticado, tiene un par de compartimientos superpuestos, como se observa en la figura 8.3; el de arriba está destinado a facilitar la sedimentación de los sólidos sedimentables y el de abajo para la digestión de los sólidos sedimentados. Tiene las siguientes ventajas, no requiere de técnicos especializados y es de fácil de operación, la cual consiste en la remoción diaria de la espuma y periódica de los lodos.

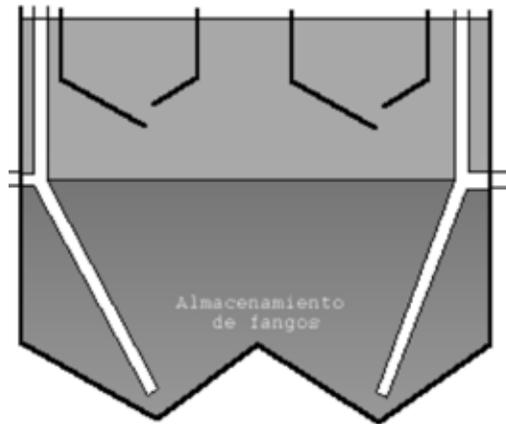


Figura 8.3. Tanque imhoff. Fuente: Bueno & colaboradores (1997).

- **Lodos activados:** el nombre del proceso proviene de la formación de una masa de “microorganismos activos” capaz de estabilizar un desecho orgánico bajo condiciones aerobias y se utiliza cuando el agua residual puede responder al tratamiento biológico. Este proceso requiere de una operación y supervisión competente, que incluya un control rutinario de laboratorio.
- **Lagunas anaerobias:** proceso de degradación de la materia orgánica por acción coordinada de microorganismos, en ausencia de oxígeno y otros agentes oxidantes fuertes. Se utiliza para tratar aguas residuales industriales con elevada temperatura y carga, con cierto contenido de sólidos suspendidos sedimentables y para tratar aguas residuales municipales en combinación con lagunas de maduración y facultativas. Como subproducto se obtiene biogás (con composición básica de CH_4 y CO_2 en un 95%, pero con la presencia adicional de N, H, NH_3 y H_2S , usualmente en proporciones inferiores al 1%). Un aspecto importante que limita su uso en cercanías de los centros urbanos, son los olores desagradables asociados con el proceso.

8.6.4. Tratamientos terciarios

El tratamiento terciario o avanzado, se realiza con el fin de remover nutrientes para prevenir la eutrofización de las fuentes hídricas receptoras o de mejorar la calidad de un efluente secundario para adecuar el agua para su reúso. Algunos tratamientos terciarios son:

- **Adsorción en carbón activo:** con este proceso se busca captar las sustancias solubles presentes en el agua residual, las cuales generalmente causan problemas de olor y color en los vertimientos. La eliminación de contaminantes en las columnas de carbón activado se lleva a cabo mediante tres etapas: macrotransporte, microtransporte y equilibrio. La viabilidad económica del uso de este proceso depende de la existencia de un medio eficaz para la regeneración y recuperación del carbón, una vez se agote su capacidad de adsorción. Los porcentajes de eliminación dependen básicamente del tiempo de contacto entre el carbón activado y el agua residual. Los contaminantes se separan gradualmente al fluir a través de la columna de carbón activado, lo que permite que el agua residual se purifique paulatinamente a medida que desciende por la columna.
- **Osmosis inversa:** es un proceso que separa el agua de las sales disueltas en disolución mediante filtración por medio de una membrana semipermeable a una presión superior a la osmótica provocada por las sales disueltas en el agua residual. En este tratamiento, las aguas residuales fluyen bajo presión elevada (superior al valor de su presión osmótica) a través de un tubo interior formado por material semipermeable y proyectado para soportar presiones elevadas. Tiene como ventaja la eliminación de materia orgánica disuelta que no es susceptible de ser eliminada con otras técnicas de desmineralización. Dentro de sus desventajas se encuentran, su elevado costo y la necesidad de tener un afluyente de gran calidad, ya que la presencia de material coloidal puede provocar fallos en el sistema y la presencia de hierro y manganeso, puede producir incrustaciones carbonatadas.
- **Militamiz Giratorio (MG):** su principal objetivo es eliminar del agua residual de los sólidos de tamaño superior a la abertura del militamiz (Figura 8.4). También es capaz de remover la materia suspendida, los organismos patógenos y la carga orgánica, ya que el tamizado tiene una función similar a la del desbaste, pero a un nivel más fino. La malla de un tamiz es directamente proporcional a la eficiencia de remoción y puede tener aperturas que fluctúan entre 10,0 (en el caso de tamices) y 0,2 mm, dependiendo de su aplicación, pero se consideran como tamices finos aquellos entre 0,2 y 1,5 mm (micro y mili tamices, μT , MG). Este sistema con malla especial de 0,2 milímetros de apertura, se puede utilizar para remover el 35% de la DQO de las aguas residuales municipales o el 60%, con costos unitarios de remoción bajos, si se le adicionan coagulantes antes del tratamiento.



Figura 8.4. Tamiz rotativo. Fuente. (Fluiteco, s.f).

- **Intercambio iónico:** es un proceso unitario en que los iones de las diferentes especies en disolución se mantienen unidos a grupos funcionales sobre la superficie de un sólido por fuerzas electrostáticas y desplazan a los iones insolubles. Por lo general se usa para el ablandamiento de aguas residuales domésticas. Este procedimiento ha llegado a ser importante en el campo del tratamiento de aguas residuales, ya que la desmineralización completa puede alcanzarse mediante intercambio iónico. Para la reducción de los sólidos disueltos totales, es necesario utilizar resinas de intercambio aniónico, resinas de intercambio catiónico y tener un agua residual con concentraciones bajas de sólidos en suspensión, con el fin de evitar que se taponen los lechos y así prevenir grandes pérdidas de carga y rendimientos ineficaces. No todos los iones disueltos se eliminan por igual, cada resina de intercambio iónico se caracteriza por una serie selectiva y algunos de los iones del final de la serie, tan sólo se eliminan de forma parcial.

8.7. Consideraciones finales

Mediante el conocimiento de los sistemas de conducción y los procesos unitarios que existen para el manejo de las aguas residuales, se pueden establecer sistemas de tratamiento que permitan remover los contaminantes que traen los vertimientos de origen doméstico o industrial, aliviando la presión sobre el ecosistema y

dejando el agua apta para devolverse a las fuentes naturales de manera segura, favoreciendo su reutilización, sin que conlleve a riesgos para los seres humanos y el medio ambiente, logrando un uso más sostenible y mejorando los problemas de calidad del agua.

Si bien existen múltiples herramientas para la determinación de la calidad del agua, y cada territorio es libre de decidir cuál es el apropiado según el uso y manejo de sus recursos, los ICO e ICA son factores clave para la planificación de recursos ecosistémicos, en pro de salvaguardar el aprovisionamiento y regular el agua de buena calidad para los ciudadanos de un territorio, sin afectar su desarrollo económico.

8.8. Estudio de caso: contaminación por descargas de aguas residuales al río Consotá

El río Consotá es una de las fuentes hídricas más importantes de la ciudad de Pereira. Este ha sido ampliamente estudiado por diferentes universidades, así como empresas del sector, quienes han trabajado con las comunidades de las quebradas tributarias del Consotá con el propósito de generar conciencia sobre la importancia de contribuir a la preservación del río mediante acciones orientadas a disminuir los residuos sólidos que caen a las quebradas de sus barrios para que estas lleguen limpias al río (Corredor Ambiental Otún-Consotá-Pereira, 2012; Arias, 2014).

La cuenca del río Consotá, nace entre los corregimientos de La Bella y Tribunales, a una altura de 2150 m.s.n.m., pasando por el costado sur del casco urbano de Pereira y desembocando en el río La Vieja, a una altura de 930 m.s.n.m., entre el Corregimiento de Cerritos (Pereira) y el municipio de Cartago (Valle del Cauca) (Acevedo-Arias, 2016). Esta cuenca tiene una extensión aproximada de 132 km² y se ubica en la zona andina del territorio colombiano, es importante debido a sus suelos y clima, que la hacen apta para la agricultura, además de contar con una gran riqueza mineral. El uso actual de la cuenca Consotá es la de recibir las aguas residuales de la ciudad de Pereira, lo cual ahonda la problemática, ya que dadas sus características edafológicas, climáticas y topográficas, lo hacen susceptible, particularmente, a los procesos erosivos y a los deslizamientos (Díaz-Giraldo, 2007).

La cuenca del río Consotá se encuentra localizada entre el Bosque Húmedo Pre-montano (2.200 m.s.n.m.) hasta el Bosque Seco Tropical (900 m.s.n.m.), según la

clasificación de zonas de vida de Holdridge¹⁴. Esta formación tiene como temperaturas mínima y máxima 18 y 24°C, respectivamente, y un promedio anual de lluvias de 1000 a 2000 mm. (Acevedo-Arias, 2016).

La cuenca del río Consotá se encuentra entre las fuentes de abastecimiento de agua aptas para consumo humano en la zona rural municipal, según la CARDER. Cinco corregimientos de la zona rural municipal son abastecidos por 16 fuentes hídricas superficiales, según los prestadores del servicio de acueducto, llevando sus aguas en el río Consotá y abasteciéndose 10 acueductos comunitarios a través de 16 microcuencas (Acevedo-Arias, 2016).

De acuerdo con Acevedo-Arias (2016) la estructura ecológica principal del Plan de Ordenamiento Territorial (POT) de Pereira define áreas que permiten el sostenimiento de la biodiversidad y la oferta de servicios ecosistémicos en la cuenca del río Consotá como:

- a. Regulación del recurso hídrico, al proteger las áreas aferentes a los acueductos rurales presentes en la cuenca el río Consotá y delimitar las áreas forestales protectoras de corrientes hídricas y determinación de las zonas de amenaza y riesgo.
- b. Provisión de recursos genéticos y nutrientes, que brinda el Distrito de Conservación de Suelos Barbas-Bremen como Área Protegida a una de las zonas con mayor producción agrícola y pecuaria del municipio.
- c. Culturales, para la recreación y el turismo en el cerro Canceles, Filo Bonito y Cerro Cerritos.

En este sentido, el río Consotá se convierte en un eje estructurante para propiciar la conectividad de los ecosistemas, que permite generar dinámicas ambientales urbano rurales entre los suelos de protección existentes en el Municipio, con cuatro objetivos fundamentales: 1) Integrar las áreas forestales protectoras de la corriente del río Consotá con los relictos de bosque alledaños y las áreas con pendientes superiores al 70%, con el fin de generar conectividad con los ecosistemas alledaños. 2) Ampliar las áreas de protección que se incorporarán a la red de

¹⁴ El sistema de Holdridge es una clasificación donde las zonas biogeográficas se organizan según los efectos biológicos de la temperatura y las precipitaciones en la vegetación.

espacio público al interior de la cuenca, implementando actividades que generen la revitalización de estas zonas. 3) Recuperar las zonas de amenaza alta y riesgo alto no mitigable ocasionados por inundaciones, especialmente en la zona urbana en las comunas El Poblado, Consotá, Cuba, San Joaquín y Olímpica. 4). Integrar a los estudiantes de los colegios al interior de la cuenca en programas educativos y comunitarios sobre conocimiento, manejo y protección del corredor ambiental río Consotá (Acevedo-Arias, 2016).

Dada la importancia ecosistémica del río Consotá, sus condiciones generan de manera directa e indirecta riesgos hacia el desarrollo socioeconómico de los habitantes de la zona, y a su infraestructura, tales como, los fenómenos de remoción en masa, inundaciones, sismicidad, entre otros. Aún más, teniendo en cuenta que en el área metropolitana Centro de Occidente la gestión del recurso hídrico obedece a un proceso lineal de captación, distribución, consumo y vertimientos que genera desechos no tratados, los cuales, a su vez, son introducidos al ciclo ecosistémico, hacen cada vez más importante la puesta en marcha de procesos de resignificación y saneamiento del río Consotá, proyectándolo como detonante de la ciudad en torno al espacio público, a la educación, a un espacio polinuclear (nodos tecnológicos de actividad múltiple), eje de la ciencia, la tecnología y la innovación. Además, capaces de lograr cambios en las dinámicas socioculturales en torno a esta cuenca, transformándola de un colector de aguas residuales, a un elemento articulador de paisaje, de la biodiversidad, de la movilidad y del desarrollo urbano, que merece ser cuidado y valorado (García Serna *et al.*, 2014; Acevedo-Arias, 2016).

Es importante destacar que, dada la dinámica del recurso hídrico, los estudios de calidad y balances hídricos se generan involucrando diferentes estaciones de monitoreo. Actualmente, el IDEAM cuenta con una base de datos de los ICA medidos desde el año 2005 hasta el 2011 de diferentes ríos principales a nivel nacional, abarcando el área de la cuenca del río La Vieja, estación Cartago, dada su intensa actividad económica, agropecuaria, industrial y turística, y de la cual se desprende el río Consotá. En la a figura 8.5, se presenta la baja variabilidad de la calidad del agua del río La Vieja.

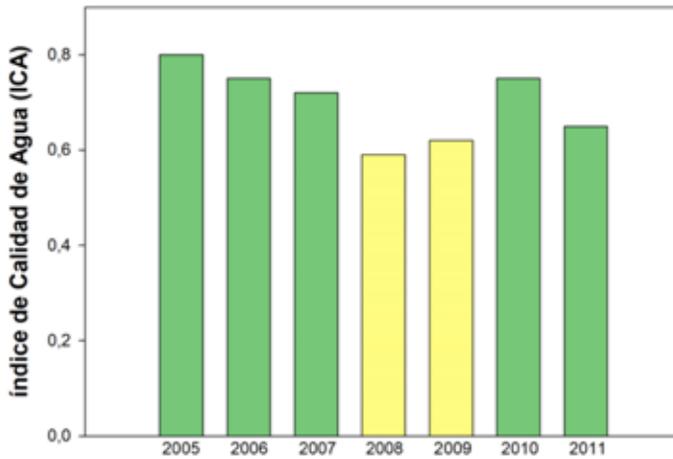


Figura 8.5. ICA del río La Vieja medido por el método de cinco variables.

Fuente: Autor.

Aunque el río La Vieja presenta una calidad del agua aceptable, a excepción de los años 2008 y 2009 donde la calidad baja a regular, requiere de un manejo adecuado de sus subcuencas para preservar y mejorar sus condiciones fisicoquímicas.

Si bien, el río Consotá no cuenta con mediciones del ICA ni del ICO, como la subcuenca del río La Vieja, fue analizado en el año 2002, a través del monitoreo de dos estaciones: La Curva y Puente Madera; encontrándose la calidad del recurso hídrico como buena y regular, respectivamente, de acuerdo al valor de los índices de calidad de la Fundación Nacional de Saneamiento IFSN (Comisión conjunta, 2008). Esta subcuenca ha sido ampliamente estudiada a través de los índices INSF, que emplea nueve parámetros de calidad, tales como; porcentaje de saturación de oxígeno, coliformes totales, pH, DBO_5 , NO_3 , PO_4 , variación de la temperatura, turbiedad y sólidos totales, involucrando a cada uno un valor de ponderación de acuerdo a su importancia, de la misma forma que se realiza con los ICA. El INSF se determina en un rango de cero a 100, siendo cero la calidad más baja del agua (Contraloría municipal de Pereira, 2004). Dependiendo del valor de este índice, el agua puede ser calificada según lo presentado en la tabla 8.4.

Tabla 8.4. Rangos del INSF utilizados para la determinación de la calidad del agua.

Valor INSF	Clasificación	Señal de alerta
91 – 100	Excelente	
71 – 90	Buena	
51 – 70	Regular	
26 – 50	Mala	
0 – 25	Muy Mala	

Fuente: (Aguas & aguas de Pereira, 2003).

Con base en lo anterior, la CARDER para el período 2016 llevó a cabo la evaluación de calidad mediante la metodología del INFS del río Consotá, los resultados obtenidos en cada punto de monitoreo evaluado se presentan en la tabla 8.5 (CARDER, 2016).

De acuerdo con la lectura y el análisis de los datos de calidad, que se tiene para la cuenca del río Consotá, en su cuenca media y baja, la fuente presenta una calidad *regular*, lo que se ve reflejado en factores como los asociados a las grandes presiones antropogénicas en estas zonas, y las dinámicas urbanas y de expansión del territorio.

Tabla 8.5. Consolidado de calidad (INFS) para cuenca del río Consotá.

Punto de monitoreo de la cuenca del río Consotá	Calidad del recurso	
	INFS	Calidad
R. Consotá. Vereda El Manzano	76	Buena
R. Consotá. Estación CARDER, sector La Curva	76	Buena
Q. El Chochos en la desembocadura	70	Regular
Q. Boston en la desembocadura (Afluente R.Consotá)	54	Regular
R. Consotá después de la Q. Boston	59	Regular
Q. La Dulcera en la desembocadura	65	Regular
R. Consotá en el barrio San Fernando después de la Q. La Dulcera	55	Regular
Q. El Oso en la desembocadura	57	Regular
R.Consotá después la Q. El Oso	51	Regular
R. Consotá en el puente El Tigre	53	Regular
R. Consotá en la estación Villegas (K36+800)	63	Regular
R. Consotá en la desembocadura	64	Regular
R. La Vieja antes del R.Consotá	73	Buena
R. La Vieja después del R. Consotá	64	Regular

Fuente: Autor.

8.9. Evaluación del capítulo

1. ¿Considera usted que la calidad del agua influye en el aprovisionamiento de la misma?
2. ¿Para la determinación del ICA establecido por el IDEAM, las estaciones de monitoreo deben generar un análisis completo de todas las variables físico-químicas y microbiológicas del agua? Justifique su respuesta.
3. Aunque índices de contaminación del agua no se encuentran regulados ni adoptados en Colombia, ¿por qué es importante tenerlos en consideración en el estudio de aguas superficiales?
4. ¿Cuál considera técnica y financieramente más viable, un sistema a flujo abierto o a flujo cerrado?. Justifique su respuesta.
5. ¿En nuestro país se han actualizado los sistemas o redes hidráulicas para la conducción de aguas residuales?. Justifique su respuesta.
6. ¿Por qué es importante la modelación de los flujos o la hidrodinámica de los sistemas?. Justifique su respuesta
7. ¿Cuál de los procesos unitarios considera usted que se puede utilizar para remover los metales pesados de una muestra de agua residual?
8. ¿Cuál es el principal objetivo de un tanque de homogenización?
9. ¿Qué es DAF y para qué se utiliza?
10. ¿Con cuál tipo de sedimentación se remueve la biomasa?

Referencias

- Acevedo-Arias, G.I. (2016). *Saneamiento y resignificación del río Consotá*. Pereira, Colombia: Secretaria de Planeación Municipio de Pereira.
- Aguas y aguas de Pereira. (2003). *Plan de Saneamiento Hídrico de Pereira*. Pereira, Colombia: Aguas y aguas de Pereira.
- Alcaldía de Medellín. (2015). *Propuesta para la gestión integral de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos en Medellín*. Medellín, Colombia: Parque Expoflora
- Ardila-Cárdenas, F. (2015). *Aplicación del sistema Geoweb de confinamiento celular para revestimientos de canales abiertos de sección trapezoidal* (Tesis de pregrado). Universidad distrital Francisco José de Caldas, Bogotá D. C., Colombia.
- Arias C., (Ed). (2014). *Resignificación de la cuenca del Consotá. Perspectivas ambientales del municipio de Pereira en sus 150 años*. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Ciencias Ambientales.
- Bencala, Kenneth, E., & Walters, R. (1983). Simulation of solute transport in a mountain pool-and-rie stream: A transient storage model. *Water Resources Research*, 9(3), 718-724.

- Betancur-Vargas, T., García-Giraldo, D., Vélez-Duque, J., Gómez, A., Flórez-Ayala, C., Patiño, J., & Ortiz-Tamayo, J. (2017). Aguas subterráneas, humedales y servicios ecosistémicos en Colombia. *Biota Colombiana*, 18(1), 1-27.
- Bueno, J., Sastre, H., & Lavín, A. (1997). *Contaminación e ingeniería ambiental: Elementos para la evaluación y gestión de la contaminación*. Oviedo: Fundación para el fomento en Asturias de la investigación científica aplicada y la tecnología F.I.C.Y.T.
- CARDER. (2016). *Informes de Monitoreo del Recurso Hídrico del Departamento de Risaralda*. Pereira, Colombia: Corporación Autónoma Regional de Risaralda.
- Comisión conjunta. (2008). *Plan de ordenación y manejo, Cuenca hidrográfica del río La vieja*. Pereira.
- Comisión Nacional del Agua. (s.f). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Sistemas alternativos de alcantarillado sanitario*. 21, Tlalpan, México. Recuperado de: <http://mapasconagua.net/libros/SGAPDS-1-15-Libro21.pdf>
- Contraloría municipal de Pereira. (2004). *Informe del estado de los recursos naturales y del medio ambiente, vigencia 2003*. Pereira: Contraloría municipal de Pereira.
- Corredor ambiental Otún Consotá Pereira. (2012). *Open green map Río*. Recuperado de <https://www.opengreenmap.org/greenmap/corredor-ambiental-otun-Consotá-pereira/rio-Consotá-19061>
- Díaz-Giraldo, C. (2007). *Metodología interdisciplinaria desde el estudio de la problemática ambiental del tramo urbano de la cuenca del río Consotá: Hacia el fortalecimiento de la gestión ambiental local* (Tesis de maestría). Manizales, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- FAO. (2018). *Servicios ecosistémicos y de regulación*. Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura. Recuperado de: <http://www.fao.org/ecosystem-services-biodiversity/background/regulating-services/es/>
- Fernandez, N., & Solano, F. (2005). Índices de Calidad y de Contaminación del Agua. Universidad de Pamplona. Recuperado de: http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portallG/home_10/recursos/general/pag_contenido/libros/05082010/libros.jsp
- Findeter. (2017). *Informe sectorial: Agua potable y saneamiento básico*. Bogotá, D. C., Colombia: Financiera del Desarrollo.
- Fluiteco. (s.f). *Ingeniería a la medida de sus negocios*. GTR: Tamiz rotativo para canal. Recuperado de: <http://fluiteco-la.com/portfolio-item/gtr-tamiz-rotativo-para-canal/>
- García Serna, M. I., Morales Pinzón, T., & Guerrero Erazo, J. (2014). Análisis de flujos de agua en áreas metropolitanas desde la perspectiva del metabolismo urbano. *Luna azul*, 39, 234-249.
- Global Water Partnership. (2005). *Servicios ecosistémicos y seguridad hídrica*. Suecia: GWP. Recuperado de: https://www.gwp.org/globalassets/global/about-gwp/publications/briefing-notes/gwp_briefing_note_ecosystems_spanish_web.pdf
- González, J. (2017). *Evaluación de los indicadores de calidad ICA e ICO del Río Botello ubicado en el municipio de Facatativá* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Bogotá D. C., Colombia.
- IDEAM. (2011). Índice de calidad del agua en corrientes superficiales (ICA). Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Recuperado de: <http://www.ideam.gov.co/web/agua/indicadores1>

- IDEAM. (2014). *Evaluación del recurso hídrico*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Recuperado de: <http://www.ideam.gov.co/web/agua/indicadores1>
- Jaramillo Rojas, C., Molina, F., & Betancur, T. (2011). Índices de escasez y de calidad del agua para la priorización de cuerpos de agua en los planes de ordenación del recurso hídrico. Aplicación en la jurisdicción de Corantioquia. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 10(19), 33-46.
- Kosmus, M., Renner, I., & Ultrich, S. (2012). *Integración de los servicios ecosistémicos en la planificación del desarrollo. Un enfoque sistemático en pasos para profesionales basado en TEEB*. Bonn, Alemania: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). Recuperado de: <https://www.giz.de/expertise/downloads/giz2012-es-servicios-ecosistemicos.pdf>
- MADS. (2014). *Colombia lidera en la ONU negociación de objetivos de desarrollos sostenible*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Recuperado de: <http://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article?id=881:el-usosostenible-de-los-bosques-prioridad-de-minambiente-234>
- MADS. (2017). *Biodiversidad y Servicios Ecosistémicos en la planificación y gestión ambiental urbana*. Bogotá D.C.: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Instituto de Investigación de recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Metcalf & Eddy. (1998). *Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización*. Madrid, España: Mc Graw Hill.
- ONU. (2015). *Nota informativa sobre Implementación de mejoras para la calidad del agua y la protección de servicios ecosistémicos, Agua y Desarrollo Sostenible: de la visión a la acción*. Conferencia Anual 2015 de ONU, Zaragoza. Recuperado de http://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/waterandsustainabledevelopment2015/information_briefs.shtml
- Pérez-Vidal, A., Delgado-Cabrera, L., & Torres-Lozada, P. (2012). Evolución y perspectivas del sistema de abastecimiento de la ciudad de Santiago de Cali frente al aseguramiento de la calida del agua potable. *Ingeniería Sanitaria y Ambiental*, 14(2), 69-81.
- Ramalho, R. S. (1996). *Tratamiento de aguas residuales*. Quebec, Canada: Reverte S.A.
- Ramírez, A., Restrepo, R., & Viña, G. (1997). Cuatro índices de contaminación para caracterización de aguas continentales. Formulación y aplicación. *Ciencia, Tecnología y Futuro*, 1(3), 135-153.
- Ramírez, R., Restrepo, R., & Cardeñosa, M. (1999). Índices de contaminación para caracterización de aguas continentales y vertimientos. Formulaciones. *Ciencia, Tecnología y Futuro*, 1(5), 89-99.
- Romero-Rojas, J.A. (2005). *Tratamiento de aguas residuales, teoría y principios de diseño*. Bogotá D.C. Colombia: Escuela Colombiana de Ingenieros.
- Runkel, R. (1998). *One-dimensional transport with inflow and storage (OTIS): A solutetransport model for streams and rivers*. Geological Survey.
- Torres, P., Hernán, C., & Patiño, P. (2009). Índices de calidad de agua en efluentes superficiales utilizados en la producción de agua para consumo humano. Una revisión crítica. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 8(15), 79-94.
- Utrera-Caro, S., & Aura, A. (2013). *Agua, Trasvases y medio ambiente: Las cuentas fluviales y el nuevo plan hidrológico Nacional*. Madrid: Dykinson.
- Vörösmarty, C., Lévêque, C., & Revenga, C. (2005). Chapter 7: Fresh Water. En *Ecosystems and Human Well-being: Current State and Trends, Volume 1* (pp.165-206). London: Islandpres.