

INFRAESTRUCTURA PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE

Constanza Dorey García Puentes, Juan Pablo Villate Díaz,
Nelson Joman Vargas Ortiz, Edgar Ricardo Monroy Vargas,
Felipe Santamaría, Vanessa Rodríguez Rueda, Imán Rousta,
Haraldur Ólafsson, Nydia Margarita Habrán Esteban,
Paula Andrea Cifuentes Ruiz, Juan Pablo Londoño
Linares, Efraín Casadiego Quintero, Andrés
Giovany Gutiérrez Bayona, Cristina
Yanneth Barón Hernández



UNIAGRARIA
LA U VERDE DE COLOMBIA

INFRAESTRUCTURA PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE

Constanza Dorey García Puentes, Juan Pablo Villate Díaz, Nelson Joman Vargas Ortiz,
Edgar Ricardo Monroy Vargas, Felipe Santamaría, Vanessa Rodríguez Rueda, Imán Rousta,
Haraldur Ólafsson, Nydia Margarita Habrán Esteban, Paula Andrea Cifuentes Ruiz,
Juan Pablo Londoño Linares, Efraín Casadiego Quintero, Andrés Giovany Gutiérrez Bayona,
Cristina Yanneth Barón Hernández



UNIAGRARIA
Fundación Universitaria Agraria
de Colombia

LA U VERDE
DE COLOMBIA

Infraestructura para el desarrollo sostenible / Constanza Dorey García Puentes ... [et al.] (Aparecen los nombres de otros 16 autores). – Bogotá: Fundación Universitaria Agraria de Colombia – UNIAGRARIA, 2018.

ISBN en papel 978-958-5550-02-05

ISBN digital 978 -958-5550-03-2

177 páginas : il. Col.

Incluye índice.

1. DESARROLLO SOSTENIBLE 2. ASENTAMIENTOS HUMANOS 3. CEMENTO REFORZADO
4. FIBRAS VEGETALES 5. CONSTRUCCIONES SOSTENIBLES 6. DERECHO AL AGUA

Catalogación en la fuente Fundación Universitaria Agraria de Colombia (Bogotá)

333.7 – scdd20

© Fundación Universitaria Agraria de Colombia - UNIAGRARIA –

Copyrights reserved© Constanza Dorey García Puentes, Juan Pablo Villate Díaz, Nelson Joman Vargas Ortiz, Edgar Ricardo Monroy Vargas, Felipe Santamaría, Vanessa Rodriguez Rueda, Imán Rousta, Haraldur Ólafsson, Nydia Margarita Habrán Esteban, Paula Andrea Cifuentes Ruiz, Juan Pablo Londoño Linares, Efrain Casadiego Quintero, Andres Giovany Gutierrez Bayona, Cristina Yanneth Barón Hernández

Concepto Gráfico, Diseño, Composición e impresión

Entrelibros e-book solutions

www.entrelibros.co

Corrección de estilo

Diana Carolina Sánchez



Infraestructura para el desarrollo sostenible by Universidad Agraria de Colombia -Uniagraria is licensed under a Creative Commons Reconocimiento- NoComercialCompartirIgual 4.0 Unported License.

La publicación 'Infraestructura para el desarrollo sostenible' es producto de la Universidad Agraria de Colombia -Uniagraria- impreso bajo el ISBN en papel: 978-958-5550-02-05 en idioma español, ISBN digital 978 -958-5550-03-2 en idioma español.

Es un producto editorial protegido por el Copyright © y cuenta con una política de acceso abierto para su consulta, sus condiciones de uso y distribución están definidas por el licenciamiento *Creative Commons* (CC).

Los textos de los artículos de esta publicación pueden ser reproducidos citando la fuente. Los juicios emitidos por los autores son de su responsabilidad. Por tanto, no comprometen a la Fundación Universitaria Agraria de Colombia – Uniagraria, a la Facultad de Ingeniería ni al Comité Editorial.



UNIAGRARIA
Fundación Universitaria Agraria
de Colombia

LA U VERDE
DE COLOMBIA

**Fundación Universitaria Agraria de Colombia
- UNIAGRARIA -**

Asamblea General

Jorge Orlando Gaitán Arciniegas
(Presidente)

Consejo Superior

Álvaro Zúñiga García
(Presidente)

Teresa Arévalo Ramírez
Teresa Escobar de Torres
Jorge Orlando Gaitán Arciniegas
Álvaro Ramírez Rubiano
Héctor Jairo Guarín Avellaneda
Emiro Martínez Jiménez

Rector

Luis Fernando Rodríguez Naranjo

Vicerrector de Investigación

Álvaro Mauricio Zúñiga Morales

Contenido

INTRODUCCIÓN	7
ASENTAMIENTOS HUMANOS SOTENIBLES	9
1.1. Desarrollo sostenible	10
1.2. Hitos de los asentamientos humanos sostenibles.....	14
1.3. Asentamiento humano sostenible y sus particularidades.....	16
1.4. Referencias.....	19
PROCEDIMIENTO PARA ANÁLISIS DE COMPUESTO A BASE DE CEMENTO REFORZADO CON FIBRAS VEGETALES PARA CONSTRUCCIONES SOSTENIBLES	21
1. Introducción	21
2. Marco teórico	22
3. Desarrollo de matriz a base de cemento	25
4. Refuerzo vegetal	29
5. Desarrollo de compuesto a base de cemento reforzado con fibras vegetales	33
6. Conclusiones	35
7. Referencias	37
INTRUSIÓN SALINA EN EL CONTEXTO COSTERO COLOMBIANO	43
Resumen	43
1. Introducción	44
2. Antecedentes	45
3. Descripción del fenómeno e impacto ambiental	46
4. Estudio de casos de intrusión salina	51
5. Uso de modelos numéricos en el análisis de casos de intrusión salina	63
6. Caso de estudio: Acuífero Morrosquillo	65
7. Conclusiones y discusión	72
8. Referencias	74

NANOTUBOS DE TITANIO (TiO₂) COMO UNA SOLUCIÓN AMBIENTAL AUTOSOSTENIBLE PARA LA DEGRADACIÓN GASES NO_x EMITIDOS POR LA INDUSTRIA DEL PETRÓLEO 77

Referencias 85

ANÁLISIS DE PROXIMIDAD A INFRAESTRUCTURA COMO APOORTE AL DESARROLLO SOSTENIBLE 87

Resumen 87

Introducción 88

Análisis de la proximidad a equipamientos de la ciudad intermedia como aporte al estudio de la desigualdad urbana 89

Sistemas de Información Geográfica (SIG) una herramienta para medir la proximidad a equipamientos 91

Metodología 94

Conclusiones 103

Referencias 105

USO DE MATERIALES ALTERNATIVOS PARA CONSTRUCCIONES SOSTENIBLES 111

¿Qué son residuos estériles de minería? 112

Conceptualización sobre la normatividad 114

Características y propiedades de los Agregados de minería para construcción 117

Otros Materiales Alternativos 119

Conclusiones 120

Referencias 121

RECURSOS HÍDRICOS EN COLOMBIA: DE LA DISPONIBILIDAD A LA ESCASEZ 123

Marco Normativo de la Gestión Integral del Recurso Hídrico en Colombia 125

Disponibilidad de los Recursos Hídricos en Colombia 130

Uso del agua en Colombia 136

Conclusiones	145
Referencias	146

**EL DERECHO HUMANO AL AGUA GARANTE
DEL DESARROLLO SOSTENIBLE** 157

El derecho al agua en el ámbito internacional de los Derechos Humanos.....	158
El derecho al agua en Colombia	163
El desarrollo sostenible asociado al agua.....	165
Conclusiones	170
Referencias	171

INTRODUCCIÓN

El desarrollo sostenible se ha configurado hoy día en el eje central de la preservación del ser humano y el ecosistema. Así, ha impactado el ámbito social, económico, político, jurídico, psicológico, ambiental y cultural, entre otros. De este modo, la problemática ambiental que trasciende a nivel mundial debe abordarse con una visión holística e interdisciplinaria, que facilite soluciones integradoras y alternativas.

Los ODS plantean retos transformadores que, en lo concerniente a la infraestructura sostenible, permiten la inclusión social y el mejoramiento en la calidad de vida, y abren paso al crecimiento y desarrollo económico, especialmente en los países en vía de desarrollo que requieren urgentes medidas de protección al medio ambiente acorde con las necesidades regionales.

Los anteriores razonamientos conllevaron la realización de esta investigación, en la que se integraron diferentes disciplinas del conocimiento que tiene como resultado el presente libro: Infraestructura para el desarrollo sostenible. En él, se abordan temáticas como los asentamientos humanos sostenibles y, posteriormente, se hace una introducción a las fibras vegetales como compuesto alternativo para las construcciones sostenibles. Luego, en un tercer capítulo, se formulan las implicaciones ambientales de la intrusión salina en zonas costeras como agente contaminante para, seguidamente, en un capítulo cuatro, incursionar en la infraestructura petrolera, inspeccionando las

incidencias de los nanotubos de titanio como una solución ambiental autosostenible para la degradación de gases que afectan la calidad del aire. Los dos siguientes capítulos involucran un análisis de la aproximación a la infraestructura como un aporte al desarrollo sostenible. De este modo, se busca un equilibrio territorial en donde se den los mínimos en términos de prestación de servicios; así como la inclusión de materiales alternativos que favorezcan las construcciones sostenibles. Finalmente, los dos últimos capítulos propician un escenario de reflexión en términos de la normatividad aplicada a los recursos hídricos que impacta al desarrollo sostenible en sus distintas dimensiones, de tal suerte que pueda vislumbrarse jurisprudencia que coadyuve la formulación de nuevas estructuras legales.

A la luz de esta multiplicidad de temáticas asociadas a la infraestructura para el desarrollo sostenible, sin duda, los retos son aún mayores en aras de soportar verdaderas acciones. En especial, se busca que den cumplimiento a los ODS, ya que siguen siendo el punto de mira de la Agenda 2030 que insta día a día a distintos actores públicos y privados. En efecto, entre ellos se encuentra la Fundación Agraria de Colombia, a través de su programa de Ingeniería Civil y en cooperación con investigadores de otras instituciones educativas, ya que se propone seguir indefectiblemente contribuyendo a la construcción de un mejor país para todos.

Edgar Ricardo Monroy Vargas

ASENTAMIENTOS HUMANOS SOSTENIBLES

Constanza Dorey García Puentes¹

En este capítulo se presentará la definición, hitos históricos y particularidades de los asentamientos humanos sostenibles a nivel global. Para abordar los constructos teóricos de los asentamientos humanos sostenibles es imperante partir del concepto de desarrollo sostenible el cual es “aquel que satisface las necesidades del presente sin comprometer las necesidades de las futuras generaciones” (Naciones Unidas, 1987), del mismo modo para presentar los hitos más representativos es fundamental basarse en la historia de lo que hoy conocemos como UN- Hábitat (Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos) y también en los objetivos del desarrollo sostenible. Estos elementos permiten abordar tanto el sentido de un asentamiento humano sostenible, como sus particularidades, en esta época donde la migración a las ciudades ha aumentado y debe ser prioridad mundial pensar cómo se consolidarán las ciudades del futuro; se estima para el 2030 que cerca del 60% de la población mundial habitará las ciudades (CEPAL, 2017) (p. 25).

Palabras claves: Desarrollo sostenible, asentamientos sostenibles, ciudades amables, objetivos del desarrollo sostenible.

¹ Ingeniera Civil especialista en Construcción sostenible, profesor tiempo completo de la Corporación Universitaria Minuto de Dios- Sede Cundinamarca, Programa de Ingeniería Civil. cogarcia@uniminuto.edu

1.1. Desarrollo sostenible

Respecto a la definición o discusión sobre sostenibilidad se debe iniciar con recordar los hitos más representativos del desarrollo sostenible a nivel mundial. Primero, se debe resaltar que en el año 1966 la Organización de las Naciones Unidas- ONU, creó el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo – PNUD, cuya función principal es respaldar a los países socios para alcanzar los Objetivos del Desarrollo Sostenible “Agenda 2030”, que se centran en la erradicación de la pobreza. Su labor es desarrollada a través de tres áreas principales: desarrollo sostenible, gobernabilidad democrática y mantenimiento de la paz, y clima y resiliencia a los desastres. La primera tiene como meta.

“Ayudar a los países a crear las capacidades para integrar las consideraciones medioambientales en planes y estrategias de desarrollo, incluyendo el manejo y uso sostenible de los recursos naturales, promoviendo la recuperación económica y los medios de vida, y apuntando a mejores políticas y protección social para los más necesitados.” (PNUD, 2018)

Para el año de 1972 la ONU a través del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente PNUMA, desarrolló la primera Cumbre de la Tierra² de Estocolmo también conocida como Conferencia de las Naciones Unidas sobre el medio humano, la primera desarrollada en torno a temas ambientales a nivel mundial y donde se orientó a las naciones a incluir el tema ambiental en sus planes de desarrollo. Para este momento la preocupación por los impactos ambientales generados por la industrialización, crecimiento de la población y de los asentamientos humanos se convirtió en el tema del momento a nivel mundial, por ello, en el año 1983, la ONU estableció la Comisión Mundial Sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo.

2 Es como llama la Organización de las Naciones Unidas a la conferencia donde se reúnen todas las naciones para tratar temas sobre medio ambiente y de desarrollo.

Esta comisión emitió en 1987 el informe “Nuestro futuro común”, denominado también “informe Brundland” en el cual se define desarrollo sostenible como aquel “que satisface las necesidades del presente sin comprometer las necesidades de las futuras generaciones” (ONU, 2018).

Las acciones más importantes que se presentaron en torno al desarrollo sostenible entre los años 1976 y 1990, se enfocaron en la preocupación por el crecimiento acelerado de las ciudades, generado por el desarrollo industrial a nivel mundial que se vio reflejado en un alto porcentaje de desplazamiento de la población rural hacia las ciudades, que, a su vez, generó despoblamiento del campo, enfermedades, afectaciones negativas en el medio ambiente (emisiones atmosféricas perjudiciales, contaminación del agua, tala de bosques, entre otros), e incremento de la demanda de energía, agua y recursos naturales. Debido a ello, en el año de 1992 la organización de las Naciones Unidas organizó la “La cumbre de la tierra de Río de Janeiro”, en la cual se admitió el concepto de desarrollo sostenible a nivel mundial, y se estableció que las necesidades ambientales, económicas y sociales deben abordarse de manera equilibrada; en Río se aprobaron tres acuerdos de importancia los cuales fueron: programa 21 (plan de acción mundial para promover el desarrollo sostenible), declaración de Río sobre el medio ambiente y el desarrollo (conjunto de principios que definían derechos civiles y obligaciones de los países) y declaración de principios relativos de los bosques (directrices para la ordenación sostenible de los bosques del mundo). Así mismo, después de esta cumbre se estableció la Comisión sobre el Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas cuyo propósito es acompañar, asesorar y supervisar a los gobiernos locales y demás entes de organización civil, para el desarrollo de medidas que lleven al cumplimiento de los acuerdos, continuando con el fortalecimiento de los establecido en Río (ONU, 1992).

En 1997 se desarrolló una tercera conferencia de la ONU en New York, denominada “Cumbre para la tierra +5” en ella se realizó una evaluación de los logros alcanzados durante los cinco años desde la cumbre de Río, con el fin de establecer medidas correctivas y renovar el compromiso de los países entorno al desarrollo sostenible (ONU, 1997). Como se identificaron pocos avances desde la realización de esta conferencia, en el año 2000 se realizó la declaración de los objetivos de desarrollo del milenio, cuyo propósito es direccionar todas acciones de los países para construir una sociedad más justa, sustentable y pacífica para el siglo XXI. Se propusieron ocho (8) objetivos que incluyen la erradicación de la pobreza extrema y el hambre, educación primaria universal, igualdad de género y empoderamiento de la mujer, disminución de la mortalidad infantil, salud materna, combate de enfermedades infectocontagiosas (SIDA, malaria, entre otras), sostenibilidad ambiental y promoción de una alianza mundial para el desarrollo (ONU, 2000).

Debido al incremento de la pobreza y la degradación del medio ambiente, se decidió realizar otra conferencia convocada por la ONU en Johannesburgo en el 2002, llamada “Cumbre Mundial sobre el Desarrollo Sostenible”. En ella se reafirma el compromiso de las naciones con el desarrollo sostenible y se establece el plan de acción con indicadores de obligatorio cumplimiento y acciones concretas en tiempos delimitados, en torno a “aumentar rápidamente el acceso a los servicios básicos, como el suministro de agua potable, saneamiento, vivienda adecuada, energía, atención de la salud, seguridad alimentaria y protección de la biodiversidad”, además de disminuir la mala nutrición, los conflictos armados, la delincuencia organizada, la trata de personas, el terrorismo, el tráfico ilícito de drogas, entre otras. Como resultado de ello, se plasmaron dos documentos: la declaración de Johannesburgo sobre el desarrollo Sostenible y el plan de aplicación de las decisiones de la cumbre mundial sobre el desarrollo sostenible (ONU, 2002).

Para este momento la preocupación sobre los problemas ambientales que se han generado por la industrialización, el crecimiento de las ciudades, las inequidades sociales y el descontrol en la administración en los recursos naturales, hizo que la ONU nuevamente convocara una conferencia mundial que evoca la primera cumbre para la tierra en Río, esta nueva se desarrolló también en Río de Janeiro en el año 2012 y fue llamada “Conferencia de las Naciones Unidas sobre el desarrollo sostenible”, también denominada Río +20, en ella se discutió sobre los avances que han alcanzado las naciones para un desarrollo sostenible; las discusiones giraron en torno a economía verde, erradicación de la pobreza y la articulación de las naciones para fomentar el desarrollo sostenible, el documento resultado de esta reunión fue llamado “El futuro que queremos”, y se emprendió la formulación de los objetivos del desarrollo sostenible (ONU, 2012).

Los objetivos de desarrollo sostenible reemplazan los objetivos de desarrollo del milenio –ODM (establecidos en el año 2000), siguiendo con la experiencia y aprendizajes adquiridos con los ODM y ampliando los problemas que aquejan al mundo en la actualidad. En el 2015 se dieron a conocer, a través de la asamblea general de las Naciones Unidas llamada “Transformar nuestro mundo: la agenda 2030 para el desarrollo sostenible”, los 17 objetivos de desarrollo sostenible que se interrelacionan entre sí y cuya proyección de cumplimiento es el año 2030, donde el éxito o fracaso de uno afecta a los otros. En ellos se reafirma el compromiso de todas las naciones a seguir una senda más sostenible que contempla inversión en las generaciones futuras, servicios de salud, educación, fin al hambre, gestión de los recursos naturales, capacidad de respuesta al cambio climático, erradicación de la pobreza, fomento de la paz y la igualdad, entre otras.

Para efectos de este documento nos enfocaremos en el objetivo 11 lograr ciudades y asentamientos humanos que sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles (PNUD, 2017).

La mayoría de las iniciativas dadas a lo largo de la historia hasta el momento entorno al desarrollo sostenible contemplan mejora en los procesos de producción industrial, educación, consumo responsable, uso de tecnología ecológica, control en el crecimiento de la población, conservación y cuidado de los recursos naturales, uso racional de los recursos agua y energía, acciones para enfrentar el cambio climático, disminución de la pobreza, fomento de la agricultura sostenible, protección de la diversidad biológica y de los océanos, acceso a servicios públicos, vivienda digna, ciudades amables y seguras, entre otras.

Por lo anterior, para que se reconozca la sostenibilidad se deben tener en cuenta tres aspectos fundamentales, el ambiental, el económico y el social, que deben ser abordados de manera equitativa, bajo principios respeto por el entorno, eficiencia en el uso de los recursos, disminución de impactos ambientales, implementación de tecnología verde, transparencia y responsabilidad.

1.2. Hitos de los asentamientos humanos sostenibles

En el año 1975 se crearon las Naciones Unidas para el Hábitat y los asentamientos humanos (FNUHAH) y el año 1976 la Comisión de las Naciones Unidas de Asentamientos Humanos y el Centro de las Naciones Unidas para los asentamientos Humanos- UNCHS³, en el marco del desarrollo la conferencia Hábitat en Vancouver- Hábitat I, donde el tema principal fue el acelerado crecimiento de los asentamientos humanos. Allí se planteó la necesidad de fomentar y crear asentamientos humanos sostenibles, para esta época se generalizó la preocupación mundial sobre la migración y concentración de la población en las ciudades (ONU, 2018).

3 Hoy se conoce como ONU-HABITAT

Uno de los aspectos que impulsaron esta migración fue la consolidación de grandes industrias que demandaban una amplia mano de obra, esto ocasionó en las grandes ciudades del mundo problemas de hacinamiento, propagación de epidemias y enfermedades públicas. Por esta razón, el crecimiento de las ciudades llevó a plantear aspectos saludables para estos espacios, en donde la Organización Mundial de la Salud estableció estrategias para la promoción de la salud en la primera conferencia internacional desarrollada en Canadá en 1986, donde se trataron dos casos específicos el saneamiento básico y los entornos verdes.

Para el año de 1996 se celebró la segunda conferencia de las Naciones Unidas sobre asentamientos humanos Hábitat II en Estambul, la reunión enfatizó sobre sostenibilidad de los asentamientos humanos y los objetivos para lograr una vivienda adecuada para todos, es decir, que la población debe vivir en condiciones seguras, salubres y estables; allí se adoptó la “Agenda Hábitat”. En esta conferencia se planteó la reducción de la brecha entre el sector rural y el urbano a nivel de infraestructura y servicios básicos para disminuir la migración de la población hacia las ciudades (ONU, 1996).

Cinco años después de Hábitat II, en el marco de la asamblea general de las Naciones Unidas en Nueva York, se realizó la declaración sobre las ciudades y otros asentamientos humanos en el nuevo milenio, en donde se enfatizó en el urbanismo sostenible, las ciudades sin tugurios, el saneamiento básico, el agua potable para los más pobres y la dimensión rural del desarrollo sostenible (ONU, 2001).

Además, para el año 2002 la asamblea general de la ONU consolidó el Programa de las Naciones Unidas para los asentamientos humanos ONU-Hábitat, siendo este otro programa creado para disminuir la pobreza y la promoción del desarrollo sostenible.

De este modo se consolidó el Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos ONU-Hábitat, cuyo objetivo es la planeación adecuada y eficiente de ciudades y asentamientos humanos; entre los temas de importancia se encuentran la vivienda, el desarrollo de infraestructura, el acceso a servicios básicos y el saneamiento (ONU-Hábitat, 2012).

En el año 2016 se desarrolló la tercera conferencia de las Naciones Unidas sobre vivienda y desarrollo urbano sostenible- Hábitat III en Quito (Ecuador), cuyo informe se llama “Nueva agenda urbana”. Allí se planteó que el crecimiento de la población mundial se duplicará en el 2050, y tendrá una alta concentración en las ciudades; es por ello que los retos a los que se enfrenta la sostenibilidad están encaminados a la vivienda, la infraestructura, los servicios básicos, la seguridad, la salud y la educación, entre otros. Desde hábitat II se han desarrollado estrategias para mejorar las condiciones de vida de la población mundial de las zonas urbanas, específicamente en asentamientos informales, aun así, estos esfuerzos no han sido suficientes ya que cada vez se presentan más formas de pobreza, desigualdad y degradación ambiental. A partir de esa primicia se requiere de manera urgente reorientar la manera cómo se planifican, diseñan, desarrollan y gestionan las ciudades y los asentamientos humanos, de tal modo que estos sean inclusivos, seguros, sanos, accesibles, resilientes y sostenibles, con el propósito de promover la prosperidad y calidad de vida para todos. (ONU, 2017).

1.3. Asentamiento humano sostenible y sus particularidades

Los asentamientos sostenibles son un espacio integrado que propicia la calidad de vida de las personas en todas sus dimensiones, es decir, no solo se refiere a los espacios físicos sino a los aspectos que cumplen funciones sociales, de integración, de igualdad de derechos, etc., también en ellos se busca un equilibrio en los aspectos fundamentales de la sostenibilidad que son, el ambiental, económico

y social. En este espacio se presentarán algunas particularidades de los asentamientos humanos sostenibles y lo que significa cada una:

Dimensión social: se refiere a los aspectos de un asentamiento en torno a las acciones particulares y colectivas de las personas que lo conforman, donde puedan gozar igualmente de los derechos y oportunidades para tener un nivel de vida adecuado; esto se refiere a asentamientos humanos más inclusivos socialmente, accesibles, a favor de los más pobres, equitativos, sensibles a las cuestiones de género, lugares más seguros y sanos en donde se fomente la participación ciudadana y la cohesión social.

Dimensión física: esta dimensión está relacionada con la conformación física del asentamiento, es decir su tamaño, distribución y equipamiento. Para ello se tienen en cuenta los indicadores, crecimiento territorial controlado en las zonas periféricas urbanas y planificación; acceso cualitativo y cuantitativo de vivienda; equipamiento y servicios públicos adecuados y suficientes; infraestructura incluyente; movilidad eficiente y segura; espacios públicos seguros, inclusivos y accesibles para el esparcimiento; asentamientos con configuración espacial compacta; asentamientos conectados e integrados; protección del patrimonio arquitectónico; regulación de la construcción en zonas de alto riesgo, equipamiento e infraestructura que promueva la salud de las personas.

Dimensión ecológica: consiste en la conservación, cuidado, protección y restauración de ecosistemas naturales en el entorno construido del asentamiento humano, para lo cual se debe tener en cuenta la construcción de asentamientos humanos estables ecológicamente y eficientes en su emisión de carbono; adaptación al cambio climático; consumo responsable de recursos agua y energía; gestión del riesgo e implementación de tecnología verde.

Dimensión económica: en esta dimensión los asentamientos humanos deben ser lugares productivos donde se garantice el acceso equitativo a oportunidades y recursos para todos los habitantes y donde se tengan en cuenta aspectos para que sean más eficientes y mejores para asegurar el trabajo decente e inclusivo; donde haya un adecuado crecimiento económico y productividad de la población de manera equitativa; donde se fomenten las economías de aglomeración y de escala; que sean proclives al autofinanciamiento; con eficiencia en el uso de los recursos; con patrones sostenibles de producción, distribución y consumo; con la participación de asociaciones público privadas y cooperación internacional; donde haya innovación y creación de valor, e inversión en el capital humano.

Dimensión Política: consiste en el proceso de toma de decisiones y políticas encaminadas a responder y garantizar el cumplimiento de los derechos de las personas en los asentamientos humanos, para ello se considera una gobernanza descentralizada; planeación de asentamientos e inversión a largo plazo; capacidad de gestión y autorregulación de los asentamientos humanos; transparencia, rendición de cuentas y buen gobierno; regulación efectiva del suelo; gestión eficiente del financiamiento y la inversión; mecanismos inclusivos para la participación ciudadana; mecanismos para el diseño e implementación de procesos constructivos y visión compartida a largo plazo del asentamiento y el territorio.

1.4. Referencias

- CEPAL. (2018). Plan de acción regional para la implementación de la nueva agenda urbana en América Latina y el Caribe. 2016-2036". Santiago.
- CEPAL. (2017). Desarrollo sostenible, urbanización y desigualdad en América Latina y el Caribe "Dinámicas y desafíos para el cambio estructural". Santiago.
- Organización de Naciones Unidas (1987). Extraído de <http://www.un.org/es/ga/president/65/issues/sustdev.shtml>. Agosto de 2018
- OMS. (1986). Carta Ottawa para la promoción de la salud. Ottawa, Canada. Extraído de <https://www.paho.org/hq/dmdocuments/2013/Carta-de-ottawa-para-la-apromocion-de-la-salud-1986-SP.pdf> Agosto de 2018
- ONU. (1992). Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (cumbre para la tierra). Río de Janeiro, Brasil. Extraído de <http://www.un.org/es/development/devagenda/sustainable.shtml> Agosto de 2018
- ONU.(1996). Conferencia de las Naciones Unidas sobre los asentamientos humanos- Habitat II. Estambul, Turquía. Extraído de https://unhabitat.org/wp-content/uploads/2014/07/12040_Habitat_II_report_Spanish.pdf Agosto de 2018
- ONU. (1997). Cumbre para la tierra +5. Informe de la decimonovena sesión plenaria de la asamblea general de la ONU. New York, Estados Unidos. Extraído de <https://documents-dds-ny.un.org/doc/UNDOC/GEN/N97/857/89/PDF/N9785789.pdf?OpenElement> Agosto de 2018
- ONU. (2000). Objetivos de Desarrollo del Milenio. Extraído de <http://www.un.org/es/millenniumgoals/bkgd.shtml> Agosto de 2018

- ONU. (2001). Declaración sobre las ciudades y otros asentamientos humanos en el nuevo milenio. New York, Estados Unidos. Extraído de <http://habitat.aq.upm.es/boletin/n17/n17decl.html> Agosto de 2018
- ONU. (2002). Informe de la Cumbre Mundial sobre el Desarrollo Sostenible. Johannesburgo, Sudáfrica. Extraído de <https://undocs.org/es/A/CONF.199/20> Agosto de 2018
- ONU. (20 al 22 de Junio de 2012). Rio+20 “Conferencia de las naciones unidas sobre el desarrollo sostenible”. Río de Janeiro, Brasil. Extraído de http://www.un.org/es/sustainablefuture/pdf/spanish_riomas20.pdf Agosto de 2018
- ONU. (2017). Nueva Agenda Urbana. Quito: Naciones Unidas.
- ONU. (2018). Naciones Unidas. Extraído de <http://www.un.org/es/ga/president/65/issues/sustdev.shtml> Agosto de 2018
- ONU. (2018). Plan de acción regional para la implementación de la nueva agenda Urbana en América latina y el Caribe. Santiago: Naciones Unidas.
- ONU- Hábitat. (2012). ONU- Hábitat por un mejor futuro urbano. Extraído de <https://es.unhabitat.org/temas-urbanos/viviendas/> Agosto de 2018
- ONU-Hábitat. (2012). Historia, mandato y misión en el sistema de la ONU. Río de Janeiro, Brasil. Extraído de <https://es.unhabitat.org/sobre-nosotros/historia-mandato-y-mision-en-el-sistema-de-la-onu/> Agosto de 2018
- PNUD. (2018). Programas de las Naciones Unidas para el Desarrollo. Extraído de <http://www.undp.org/content/undp/es/home/about-us.html> Agosto de 2018.

PROCEDIMIENTO PARA ANÁLISIS DE COMPUESTO A BASE DE CEMENTO REFORZADO CON FIBRAS VEGETALES PARA CONSTRUCCIONES SOSTENIBLES

Juan Pablo Villate Díaz, Nelson Joman Vargas Ortiz⁴

1. Introducción

El objetivo de este capítulo es mostrar una guía para evaluar las propiedades, a partir de evidenciar las ventajas que poseen los materiales no convencionales como los compuestos a base de cemento reforzados con fibras vegetales, versus los materiales usados comúnmente en las obras de construcción como el acero y el concreto reforzado.

Según autores como (Dittenber & GangaRao, 2012) los materiales compuestos pueden atender las necesidades constructivas y adicional a esto se pueden aportar un beneficio ambiental y social. Diferentes autores como (Alida et al., 2011), (Bergström & Gram, 1984), (Boshoff, Mechtcherine, & van Zijl, 2009) han evaluado el comportamiento físico mecánico y logrado establecer que estos materiales novedosos cumplen con las sollicitaciones mecánicas, como resistencia a tracción directa,

⁴ Docentes tiempo completo del programa de Ingeniería Civil de la Fundación Universitaria Agraria de Colombia (Bogotá D.C, Colombia). villate.juan@uniagraria.edu.co, vargas.nelson@uniagraria.edu.co

flexión y compresión, cuyos resultados obtenidos en cuanto a esfuerzos y módulos de elasticidad fueron apropiados para dichos materiales.

La importancia de este capítulo radica en la necesidad de saber cómo evaluar nuevos materiales que tengan un impacto positivo ambiental y que sean un factor en el desarrollo social y económico de las regiones más vulnerables o comunidades rurales. Para esto, se mostrará cómo analizar la fibra, la matriz y el compuesto reforzado con fibras unidireccionales de cualquier especie vegetal, que cumplan con los parámetros de longitud y diámetro requeridos en los numerales siguientes.

Este trabajo tendrá como resultado una guía para que futuros investigadores puedan analizar cualquier compuesto a base de cemento reforzado con fibras de origen vegetal, que genere un material apropiado para la construcción.

2. Marco teórico

Los materiales convencionales como concreto y acero son los componentes actuales más usados en la construcciones, aunque sus costos son elevados y traen consigo un impacto negativo al medio ambiente (George, Sreekala, & Thomas, 2001). En los últimos años, materiales compuestos reforzados con fibras vegetales han sido una opción alternativa para el sector de la construcción, teniendo ventajas sociales, económicas y ambientales versus materiales convencionales (Hota & Liang, 2011). El uso de compuestos reforzados con fibras vegetales reduce el aumento de residuos de la construcción, optimiza la eficiencia del consumo de energía e insumos para la fabricación del material y ofrece una solución a la necesidad de infraestructura rural a partir de la promoción del concepto de sustentabilidad.

Otras de las ventajas de usar un material reforzado con fibras vegetales son los bajos costos, bajas densidades, propiedades mecánicas, acústicas y térmicas adecuadas, son fuentes renovables y están disponibles en cualquier parte del mundo (Dittenber & GangaRao, 2012). Por lo tanto, son accesibles a personas menos favorecidas o a zonas donde el acceso a materiales confesionales como el acero es difícil, como en el caso de las veredas rurales apartadas del casco urbano.

Algunas fibras vegetales, como las fibras de sisal, coco, bambú y chontaduro, han sido estudiadas para determinar su comportamiento mecánico. Estas tienen diferentes tipos de origen que pueden ser las hojas, tallos o del fruto. Su uso también varía, puesto que algunas son usadas en la industria textil, como refuerzo de vehículos o, como en el caso de este capítulo, para el refuerzo de compuestos a base de matrices poliméricas y cementicios para la construcción. Todas las fibras vegetales tienen propiedades diferentes, donde varían el diámetro, estructura, índice de cristalinidad y tipo de extracción (Marinelli, Monteiro, & Ambrósio, 2008).

Las fibras vegetales están compuestas por fibras huecas y una matriz donde su componente principal es lignina y hemicelulosa (Mukherjee & Satyanarayana, 1984). Cada fibra está constituida por cuatro paredes: la primera, segunda y tercera son compuestas por lumen como se muestra en el Gráfico 1 (Flavio de Andrade. Silva, Chawla, & Filho, 2008).

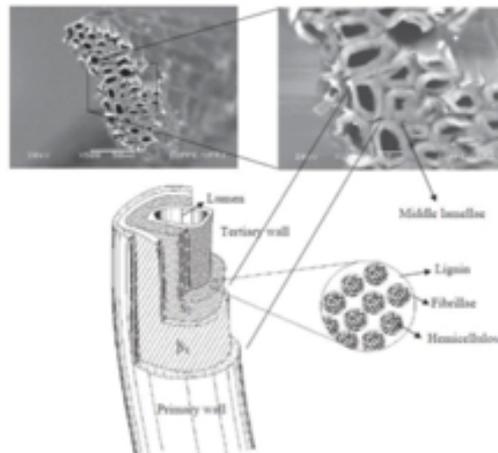


Gráfico 1. Composición de paredes de fibras vegetales

Los componentes químicos de una fibra vegetal son celulosa, hemicelulosa, lignina y pectina. La celulosa es un polímero cristalino lineal que proporciona resistencia a la fibra, mientras que la hemicelulosa forma la matriz, que proporciona el soporte para las microfibras. La lignina es un polímero hidrocarbonato complejo con componentes alifáticos y aromáticos totalmente amorfos y de naturaleza hidrofóbica que ayuda a la rigidez, las pectinas proporcionan flexibilidad a la planta. (Maya & Rajesh, 2008).

Diversos trabajos fueron realizados para proporcionar un comportamiento mecánico de las fibras vegetales y demuestran una resistencia a la tracción donde depende proporcionalmente del contenido de celulosa, así mismo, los ángulos de las microfibras contribuyen con la capacidad de deformación. Trabajos de (Defoirdt et al., 2010), muestran que la fibra de coco presenta valores bajos de resistencia a tracción de 131MPa y módulo de elasticidad de 2.6 GPa, versus la fibra de sisal que en trabajos como el de (Andrade et al., 2008), presentó resistencia a tracción de 546 MPA y módulos de elasticidad de 17.37 MPA, esto se debe a su contenido de celulosa en la fibra.

Las matrices a base de cemento, son una herramienta útil para generar un material que pueda sustituir un material convencional como por ejemplo los muros de carga, aunque las fibras, por ser un material orgánico, pueden sufrir una degradación temprana por el contenido de hidróxido Ca(OH)_2 de calcio presentado en la matriz (Maria Ernestina. Alves Fidelis, de Andrade Silva, & Dias Todelo Filho, 2014).

3. Desarrollo de matriz a base de cemento

Para el desarrollo de la matriz a base de cemento lo ideal es, primero, que cumpla los requisitos mecánicos tales como la resistencia mecánica a la compresión, y segundo, que aporte un contenido bajo del compuesto de hidróxido de Calcio (Ca(OH)_2), el cual degrada la fibra vegetal puesto que es un material orgánico (Bergström & Gram, 1984) (Tolêdo Filho, Scrivener, England, & Ghavami, 2000).

Según diferentes autores, lo ideal es realizar una sustitución porcentual hasta el 40% en el componente cementicio por metacaolín y ceniza volante (de Andrade Silva et al., 2010) (Tolêdo Filho et al., 2009). Estos componentes realizan una alteración en el comportamiento de la matriz que resulta en una adecuada durabilidad de la fibra sin reducir el comportamiento mecánico del compuesto.

3.1. Programa experimental

Para la creación de una matriz con bajo contenido de hidróxido de calcio (Ca(OH)_2) se debe seguir un procedimiento adecuado el cual se representa en el Gráfico 2:

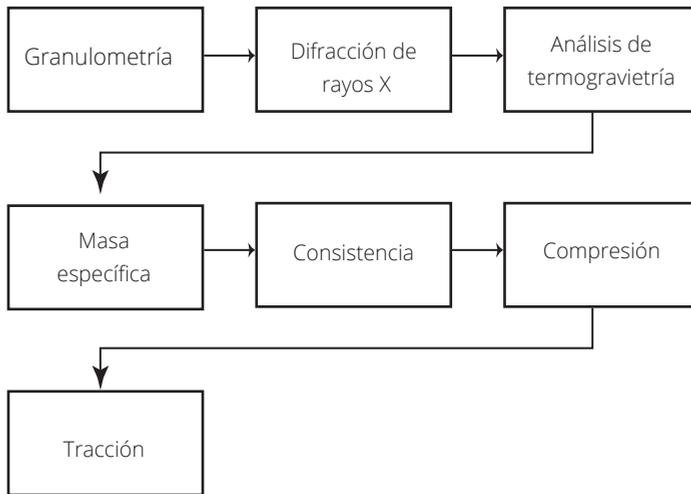


Gráfico 2. Programa experimental para desarrollo de matriz

La granulometría de los materiales es un método que se debe realizar para conocer los diámetros de los agregados usados en la mezcla a base de cemento. Los elementos adecuados para usar en este tipo de compuestos son arena de río, cemento portland tipo I, metacaolín y ceniza volante. Los granos de cemento, metacaolín y ceniza volante se deben analizar en un equipo de difracción láser, donde los granos de cemento deben ser disueltos en alcohol etílico para que no hagan reacción como lo que sucede con el agua de acuerdo con el Gráfico 3, un equipo usado por el autor (Villate Diaz, 2016). El análisis en este equipo se debe a que sus diámetros son dados en micras.

La granulometría de los materiales es un método que se debe realizar para conocer los diámetros de los agregados usados en la mezcla a base de cemento. Los elementos adecuados para usar en este tipo de compuestos son arena de río, cemento portland tipo I, metacaolín y ceniza volante. Los granos de cemento, metacaolín y ceniza volante se deben analizar en un equipo de difracción láser, donde los granos de cemento deben

ser disueltos en alcohol etílico para que no hagan reacción como lo que sucede con el agua de acuerdo con el Gráfico 3, un equipo usado por el autor (Villate Diaz, 2016). El análisis en este equipo se debe a que sus diámetros son dados en micras.



Gráfico 3. Equipo de difracción láser para análisis de granulometría cemento, metacaolín y ceniza volante (Villate Diaz, 2016).

La granulometría de la arena de río se puede realizar en tamices convencionales, según lo estipulado en las normas colombianas NTC, como se muestra en el Gráfico 4. Estos ensayos van a servir para definir las curvas granulométricas, las cuales van a alimentar el diseño de la mezcla.

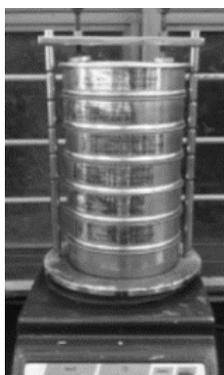


Gráfico 4. Equipo tamizador usado para granulometría de arena de río

Para definir el peso específico se pueden usar varios métodos, uno muy útil es el picnómetro de gas Helio, este determina el volumen verdadero de un sólido, por medio de una variación de presión de gas en una cámara espacial del equipo, donde el gas de helio penetra fácilmente los vacíos de la muestra a analizar.

El equipo usado para determinar la composición química de los agregados es el microscopio electrónico de barradura, donde, a partir del uso de una espectroscopia por energía dispersa (EDS), se pueden cuantificar los elementos constituyentes del elemento. Para el análisis de la cristalinidad se usa un difractómetro con radiación de cobre que analiza las fases cristalinas de los materiales.

El diseño de la mezcla se puede realizar por diferentes métodos; un ejemplo podría ser según la norma ACI, Fuller o Walker, aunque autores como (Villate Diaz, 2016) y (Maria Ernestina. Alves Fidelis, 2014) desarrollaron una matriz 1:1:0,4 (relación cemento: arena: relación Agua/cemento en peso) con un contenido de superplastificante del 1,4% y sustituyendo 50% de cemento por 40% de metacaolín y 10% ceniza volante. En los resultados obtenidos la fibra no se degradó y los resultados mecánicos no fueron afectados. Para determinar cuánto contenido se debe usar de superplastificante se debe realizar un ensayo de consistencia en una mesa vibratoria, como se muestra en la Gráfico 5, donde el diámetro de la mezcla sea aproximadamente de 40 cm (Villate Diaz, 2016). Lo anterior, para que sea una mezcla fluida y de trabajabilidad en el compuesto reforzado con la fibra.

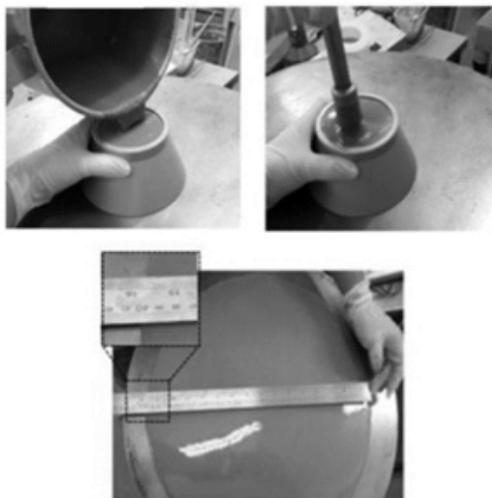


Gráfico 5. Ensayo de consistencia de matriz (Villate Diaz, 2016).

El comportamiento mecánico de la matriz es evaluado con ensayos de compresión y tracción directa, esto para comparar si, posteriormente, con el refuerzo vegetal, mejoran las propiedades con énfasis en tracción directa puesto que el mortero y los concretos son materiales frágiles que no soportan cargas grandes a tensión. La resistencia a tracción del concreto puede llegar aproximadamente al 10% de la resistencia a compresión, por consecuente se necesita un refuerzo (NSR-2010).

4. Refuerzo vegetal

El refuerzo vegetal será implementando para que pueda soportar las cargas a tensión, logrando dar los parámetros necesarios para que se pueda determinar la fibra más adecuada y que cumpla con los requisitos para un compuesto que se pueda llevar a la construcción de una vivienda unifamiliar y que pueda generar un impacto positivo en el medio ambiente y en las comunidades menos favorecidas, con énfasis en el concepto de sustentabilidad.

4.1. Programa experimental para análisis de fibra vegetal

Para determinar una fibra que cumpla con los requisitos de avalúos de carga de una construcción, es necesario someterla a unos ensayos que permitan caracterizar sus propiedades físico-mecánicas y realizar un comparativo en los resultados obtenidos por diferentes autores, para finalmente introducirla en un compuesto. Para llevar a cabo lo anterior, se desarrolla un programa experimental (ver Gráfico 6) para analizar fibras vegetales de diferente origen.

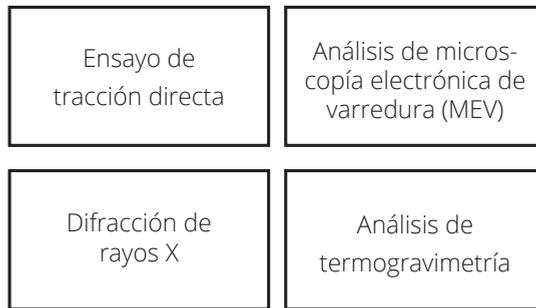


Gráfico 6. Programa experimental para análisis de fibra vegetal

Las fibras vegetales tienen un compuesto de celulosa y hemicelulosa, los cuales al tener planos cristalinos generan un índice de cristalinidad; este ensayo se determina mediante un equipo difractómetro con parámetros de radiación de cobre ($\text{Cu-K}\alpha$, $\lambda=1,5406 \text{ \AA}$), operando a 40kv e 30mA según trabajos realizados por (Villate Diaz, 2016). Para el análisis de los picos cristalinos, son tomados entre ángulos Bragg (2θ) de 5° a 70° , esperando un halo amorfo y los picos cristalinos acusados por la celulosa y la hemicelulosa. El índice de cristalinidad es calculado con la ecuación (1).

$$I_c = \frac{A_c}{A_c + A_a} \cdot 100\% \dots\dots\dots(1)$$

Donde: I_c es el índice de cristalinidad del material, A_c es el área sobre los picos cristalinos y A_a es el área del halo amorfo.

El comportamiento térmico de las fibras vegetales es analizado mediante ensayos de termogravimetría (TG), esta metodología es practicada para observar la degradación de las fibras vegetales con el aumento de temperatura. Esta práctica es realizada con parámetros de ensayo de atmósfera de nitrógeno y aumento de temperatura de $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Lo esperado en una fibra vegetal es que para los primeros 100°C tenga una pérdida de humedad natural del material, seguido por una descomposición de la hemicelulosa con una temperatura entre los $250^{\circ}\text{C} - 300^{\circ}\text{C}$ y finalmente, una descomposición de celulosa con temperaturas superiores a los 350°C . (de Souza & d'Almeida, 2014; Villate Diaz, 2016) (Carvalho, Mulinari, Voorwald, & Cioffi, 2010)

Uno de los ensayos más importantes es determinar la resistencia máxima de la fibra a tracción directa, y se debe comparar con diferentes autores (Alves Fidelis et al., 2013) (Belouadah et al., 2015) (Karmarkar et al., 2007) y (Villate Diaz et al., 2016). Se aconseja realizar el ensayo para diferentes longitudes con un promedio de 15 ensayos para cada longitud. La prueba se realiza en una máquina universal con una velocidad de deformación de $0,1 \text{ mm}/\text{min}$ como se muestra en el Gráfico 7. Los resultados esperados son Módulos de elasticidad de la fibra (E), esfuerzo máximo a tracción de la fibra (σ), deformación unitaria (ϵ) y área real (A). (Defoirdt et al., 2010) (d'Almeida, Aquino, & Monteiro, 2006) (de Andrade Silva et al., 2008) (Alves Fidelis et al., 2014) (Villate Diaz et al., 2016)



Gráfico 7. Ensayo a tracción directa de fibra vegetal (Villate Diaz, 2016)

El ensayo de tracción directa debe tener una correlación con el análisis microestructural realizado mediante microscopia electrónica por barradura, con la finalidad de determinar los esfuerzos reales de la fibra, puesto que la fibra presenta una estructura porosa establecida por unos ductos para el transporte de sábila o nutrientes de la planta como se muestra en la Gráfico 8. Para determinar el área real se debe practicar con un microscopio electrónico de barradura y la fibra vegetal, al ser un material orgánico, debe tener un recubrimiento en oro para lograr una imagen adecuada y para continuar con el análisis.

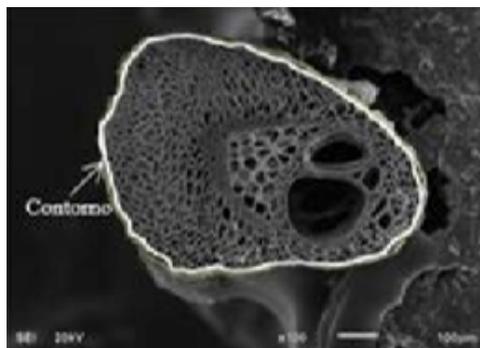


Gráfico 8. Sección transversal de fibra vegetal, con ductos para trasporte de nutrientes (Villate Diaz, 2016)

5. Desarrollo de compuesto a base de cemento reforzado con fibras vegetales.

Este capítulo está enfocado en la generación de compuestos a base de cemento con refuerzo en fibras vegetales unidireccionales a la carga impuesta, donde es necesario revisar la fracción volumétrica crítica (Lima, Toledo Filho, & Lima, 2012). Lo anterior, para determinar un comportamiento elevado en la resistencia a tracción y absorción de energía necesaria para la matriz.

La fibra debe presentar una buena interface con la matriz, esta adecuada adición entre fibra-matriz se debe a la superficie corrugada de la fibra, donde esas pequeñas estrías garantizan un acople entre las deformaciones de matriz y refuerzo producidas por la carga impuesta (de Andrade Silva et al., 2011).

El compuesto debe tener un número de capas y el cuerpo de ensayo puede realizarse en un molde de acrílico como se muestra Gráfico 9, esto con la finalidad de que las fibras interactúen y soporten los esfuerzos axiales que se generan en el ensayo a tracción directa.

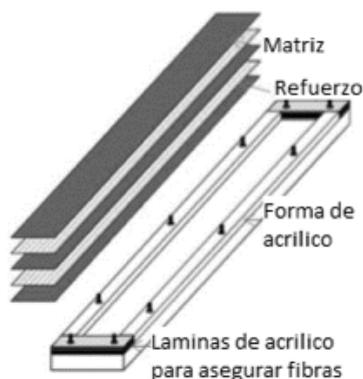


Gráfico 9. Formaleta para generación de compuesto a base de cemento reforzado con fibras vegetales (Villate Diaz, 2016)

El ensayo a tracción directa del compuesto es realizado en una maquina universal, donde la velocidad de deformación recomendable es de 0,5 mm/min. Se usan deformímetros para observar al detalle el gráfico esfuerzo versus deformación y así ver cómo mejora la respuesta al comportamiento mecánico el refuerzo en fibras vegetales. Lo más adecuado es que se formen múltiples fisuras como se muestra en Gráfico 10, esto es consecuencia al aporte dúctil de las fibras sobre el comportamiento frágil del concreto. Si las fibras no alcanzan un comportamiento dúctil se formará una sola fisura como consecuencia de un comportamiento frágil de acuerdo con el Gráfico 11, donde las fibras no aportan resistencia necesaria a tracción requerida para usar en un material compuesto adecuado

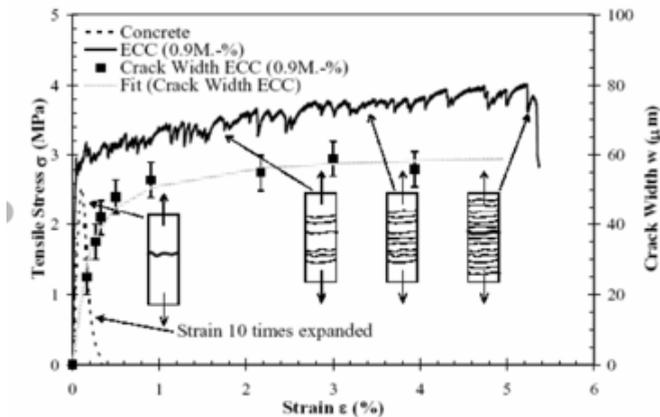


Gráfico 10. Formación de múltiples fisuras en compuesto reforzado con fibras vegetales (Li & Li, 2011)

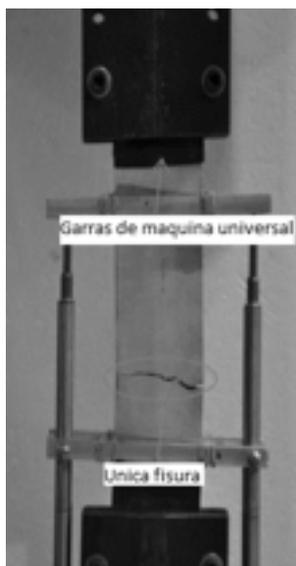


Gráfico 11. Formación de única fisura en compuesto frágil reforzado con fibras. (Villate Diaz, 2016)

6. Conclusiones

Los comportamientos dúctiles y frágiles son debido a varios factores, la baja fracción volumétrica es una de las principales. En el trabajo realizado por (de Andrade Silva et al., 2010) se demuestra que usar una fracción volumétrica de fibra de 10% sobre el volumen total del compuesto, resulta en la formación de múltiples fisuras aportando comportamiento dúctil. Por el contrario, en el trabajo de (Lopes Lima, 2004) el uso de una fracción volumétrica de 6%, resultó en la formación de una sola fisura, obteniendo un comportamiento frágil.

Adicionalmente, la interface entre la fibra y la matriz es un factor relevante para el comportamiento adecuado del compuesto, luego, si las fibras no contienen una superficie lateral corrugada, la adherencia será débil y al aplicar una carga axial, tendrán una deformación desigual en el rango elástico lineal donde, al llegar la matriz al esfuerzo límite, las fibras no trabajarán a tensión.

Este análisis del comportamiento mecánico del compuesto es vital, para que en futuros trabajos se pueda constituir un nuevo material que cumpla con los requisitos constructivos para las necesidades de las comunidades menos favorecidas, puesto que al usar un material vegetal con mayor disponibilidad que el acero, en sectores donde el acceso a estos materiales convencionales se dificulta, puede ser la solución a una gran problemática.

Estos materiales no convencionales aportan un impacto positivo al medio ambiente, puesto que son materia prima renovable, al contrario del acero que es material no renovable, y el porcentaje de energía e insumos necesarios para la fabricación del mismo, no es tan alto.

Bibliografía

- Alida, A., Mazlee, M. N., Shamsul, B. J., & Kamarudin, H. (2011). Composite cement reinforced coconut fiber: Physical and mechanical properties and fracture behavior. INSI-net Publications.
- Alves Fidelis, M. E. (2014). Desenvolvimento e caracterização mecânica de compósitos cimentícios têxteis reforçados com fibras de juta. Universidade Federal do Rio de Janeiro,
- Alves Fidelis, M. E., de Andrade silva, F., & Dias Todelo Filho, R. (2014). The Influence of Fiber Treatment on the Mechanical Behavior of Jute Textile Reinforced Concrete. *Key Engineering Materials* 600(469-474). doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.600.469
- Alves Fidelis, M. E., Pereira, T. V. C., Gomes, O. d. F. M., de Andrade Silva, F., & Toledo Filho, R. D. (2013). The effect of fiber morphology on the tensile strength of natural fibers. *Journal of Materials Research and Technology*, 2(2), 149-157. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2013.02.003
- Belouadah, Z., Ati, A., & Rokbi, M. (2015). Characterization of new natural cellulosic fiber from *Lygeum spartum* L. *Carbohydrate Polymers*, 134, 429-437. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.08.024
- Bergström, S. G., & Gram, H.-E. (1984). Durability of alkali-sensitive fibres in concrete. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 6(2), 75-80. doi:http://dx.doi.org/10.1016/0262-5075(84)90036-8
- Bertolino, L. C., Torem, M. L., Scorzelli, R. B., & Rossi, A. M. (2012). Caracterização mineralógica e beneficiamento do caulim de prado (ba). *Holos*, 5(28), 83-92.

- Boshoff, W. P., Mechtcherine, V., & van Zijl, G. P. A. G. (2009). Characterising the time-dependant behaviour on the single fibre level of SHCC: Part 2: The rate effects on fibre pull-out tests. *Cement and Concrete Research*, 39(9), 787-797. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.06.006>
- Carvalho, K. C. C., Mulinari, D. R., Voorwald, H. J. C., & Cioffi, M. O. H. (2010). Chemical modification effect on the mechanical properties of hips/ coconut fiber composites. *BioResources*; 5(2).
- de Souza, N. C. R., & d'Almeida, J. R. M. (2014). Tensile, Thermal, Morphological and Structural Characteristics of Abaca (Musa textiles) Fibers. *Polymers from Renewable Resources*, 5(2), 47.
- Defoirdt, N., Biswas, S., Vriese, L. D., Tran, L. Q. N., Acker, J. V., Ahsan, Q., Verpoest, I. (2010). Assessment of the tensile properties of coir, bamboo and jute fibre. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 41(5), 588-595. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.01.005>
- Dittenber, D. B., & GangaRao, H. V. S. (2012). Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 43(8), 1419-1429. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.11.019>
- d'Almeida, J. R. M., Aquino, R. C. M. P., & Monteiro, S. N. (2006). Tensile mechanical properties, morphological aspects and chemical characterization of piassava (*Attalea funifera*) fibers. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 37(9), 1473-1479. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.03.035>
- George, J., Sreekala, M. S., & Thomas, S. (2001). A Review on Interface Modification and Characterization. *Polymer engineering and science*, 41(9).
- Hota, G., & Liang, R. (2011). Advanced fiber reinforced polymer composites for sustainable civil infrastructures. Paper presented at the International Symposium on Innovation & Sustainability of Structures in Civil Engineering Xiamen University, China.

- Karmarkar, A., Chauhan, S. S., Modak, J. M., & Chanda, M. (2007). Mechanical properties of wood-fiber reinforced polypropylene composites: Effect of a novel compatibilizer with isocyanate functional group. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38(2), 227-233. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2006.05.005>
- Li, M., & Li, V. (2011). Behavior of ECC/Concrete Layered Repair System under Drying Shrinkage Conditions 12.
- Lima, P. R. L., Toledo Filho, R. D., & Lima, J. M. F. (2012). Mecanismo de fissuração sob tração direta de compósitos cimentícios reforçados com fibras curtas de sisal. *Engevista*, 15(1), 95-103.
- Lopes Lima, P. R. (2004). Análise teórica e experimental de compósitos reforçados com fibras de sisal (Tese de Doutorado), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Marinelli, A. L., Monteiro, M. R., & Ambrósio, J. D. (2008). Vegetais Naturais da Biodiversidade: Uma Contribuição para a Sustentabilidade Amazônica. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, 18, 92-99.
- Maya, J. J., & Rajesh, D. A. (2008). Recent Developments in Chemical Modification and Characterization of Natural Fiber-Reinforced Composites. *POLYMER COMPOSITES*, 187-207.
- Mukherjee, P. S., & Satyanarayana, K. G. (1984). Structure and properties of some vegetable fibres. *Journal of Materials Science*, 19(12), 3925-3934. doi:[10.1007/BF00980755](https://doi.org/10.1007/BF00980755)
- NSR-2010. Norma sismo resistente colombiana 2010. Colombia 2010.
- Silva, F. d. A., Chawla, N., & Filho, R. D. d. T. (2008). Tensile behavior of high performance natural (sisal) fibers. *Composites Science and Technology*, 68(15-16), 3438-3443. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.compscitech.2008.10.001>

- Silva, F. d. A., Filho, R. D. T., Filho, J. d. A. M., & Fairbairn, E. d. M. R. (2010). Physical and mechanical properties of durable sisal fiber–cement composites. *Construction and Building Materials*, 24(5), 777-785. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.030>
- Silva, F. d. A., Mobasher, B., Soranakom, C., & Filho, R. D. T. (2011). Effect of fiber shape and morphology on interfacial bond and cracking behaviors of sisal fiber cement based composites. *Cement and Concrete Composites*, 33(8), 814-823. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.05.003>
- Silva, F. d. A., Zhu, D., Mobasher, B., Soranakom, C., & Toledo Filho, R. D. (2010). High speed tensile behavior of sisal fiber cement composites. *Materials Science and Engineering: A*, 527(3), 544-552. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2009.08.013>
- Toledo Filho, R. D., Silva, F. d. A., Fairbairn, E. M. R., & Filho, J. d. A. M. (2009). Durability of compression molded sisal fiber reinforced mortar laminates. *Construction and Building Materials*, 23(6), 2409-2420. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.10.012>
- Tolêdo Filho, R. D., Scrivener, K., England, G. L., & Ghavami, K. (2000). Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibres in cement mortar composites. *Cement and Concrete Composites*, 22(2), 127-143. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S0958-9465\(99\)00039-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0958-9465(99)00039-6)
- Villate Diaz, J. P. (2016). *Comportamento Mecânico de Compósitos Cimentícios Reforçados com Fibras de Pupunha*. (P.-. Río Ed. 1322108/CA ed.).
- Villate Diaz, J. P., Silva de Andrade, F., & Morales d'Almeida, J. R. (2016). Effect of Peach Palm Fiber Microstructure on its Tensile Behavior. *BioResources*, 11(4), 18.

Winnefeld, F., Becker, S., Pakusch, J., & Götz, T. (2007). Effects of the molecular architecture of comb-shaped superplasticizers on their performance in cementitious systems. *Cement and Concrete Composites*, 29(4), 251-262. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.12.006>

INTRUSIÓN SALINA EN EL CONTEXTO COSTERO COLOMBIANO

Ricardo Monroy-Vargas⁵

Felipe Santamaría⁶

Vanessa Rodríguez-Rueda⁷

Imán Rousta⁸ Haraldur Ólafsson⁹

Resumen

La intrusión salina representa en la actualidad uno de los problemas ambientales más persistentes en las costas del mundo, a raíz de factores como la sobreexplotación de los acuíferos costeros en las barreras continentales, el cambio climático y cambios en el ciclo hidrogeológico derivados de las alteraciones en las zonas de recarga (urbanización), así como por, cambios en el curso natural de cuerpos superficiales y subterráneos. Debido al crecimiento acelerado de la población y al desarrollo de actividades turísticas en las costas este tipo de

5 Ph.D Universidad Católica de Colombia, Bogotá

6 M.Sc Universidad Católica de Colombia

7 Mc Universidad Antonio Nariño, Bogotá

8 Ph.D University YAZD, Irán

9 Ph.D University of Iceland, Islandia

perturbación en el ambiente se ha convertido en objeto de un interés creciente por la comunidad científica y más recientemente por los tomadores de decisiones. En el contexto internacional se pueden encontrar algunos esfuerzos por definir estrategias para el control y la mitigación de los efectos de la intrusión salina sin embargo en Colombia solo existen algunas iniciativas que buscan apenas tratar de entender de manera conceptual el fenómeno.

Palabras clave: intrusión salina, cambio climático, modelos numéricos.

1. Introducción

La explotación del recurso hídrico ha variado de manera significativa históricamente. Una de las prácticas que más ha incrementado corresponde a la extracción de pozos subterráneos localizados en las proximidades de las costas en donde se encuentran acuíferos de agua dulce, que son fuente principal de sustento para la población existente, para los procesos industriales en la zona y para la población flotante en temporada de vacaciones. Este tipo de captación, en la mayoría de los casos, ha crecido sin ningún tipo de control por parte de las autoridades regionales. Particularmente, en el contexto colombiano se han reportado diversos problemas para la comunidad y el ambiente, el más notable ha sido la contaminación del acuífero a causa de la presencia de sales provenientes del mar.

La presencia de estas sales se debe a la sobreexplotación de la masa de agua dulce contenida en un acuífero costero, el agua de mar irrumpe en el continente para completar el balance que ha sido interrumpido por la explotación excesiva. De este modo, se genera una zona de mezcla en la que se encuentran las aguas saladas y dulces que, producen aguas salobres que llegan a ocupar gran extensión del acuífero.

En la actualidad una de las herramientas que podría proveer información más detallada sobre este fenómeno son los modelos numéricos que permiten la simulación de casos de intrusión salina en diversos contextos. Gracias a estos modelos se pueden generar diferentes casos hipotéticos que permitirían llegar a aproximaciones reales para conocer su estado y llegar a establecer medidas de control.

2. Antecedentes.

Los océanos contienen el 70% del agua en el planeta desde su formación hace 4000 millones de años. Por lo tanto albergan en su inmensidad el ecosistema más grande y diverso. que corresponde a 1322 millones de km³ de agua. Esta agua cubre la superficie del planeta hasta alcanzar su nivel más alto, y llega a cubrir gran extensión de las placas continentales y dejar en la barrera de su encuentro las costas. Estas costas son de características propias, como lo es su diversidad, clima, recursos, y de un llamativo cultural y económico que las hace susceptibles a factores positivos, como los generados económicamente en el sector, y negativos, como los deterioros en el medio ambiente circundante (Brossard et al., 2003).

Estos impactos son principalmente (Vélez y Marín, 2001):

- Sobreexplotación de los recursos naturales no renovables.
- Sobreexplotación de los recursos pesqueros.
- Deterioro o desaparición de humedales y/o manglares.
- Vertimientos o descargas no controladas en el mar.
- Afectación del hábitat de especies endémicas.
- Generación de residuos sólidos.
- Contaminación atmosférica.
- Disminución en la calidad del agua costera.
- Intrusión salina.

- Otros causados por el cambio climático como: aumento en el nivel del mar, acidificación de océanos, cambio en las corrientes marinas, blanqueamiento de corales.

3. Descripción del fenómeno e impacto ambiental.

Los acuíferos costeros se localizan en proximidad a las barreras continentales y establecen diferentes relaciones a partir del comportamiento físico del mar, los cuales determinan la geología del lugar que se caracteriza por tener diversas dimensiones y propiedades. Por ello, se consideran uno de los sistemas más interesantes, dada su complejidad y sensibilidad. Estos costeros cuentan con la existencia de una zona de mezcla o de difusión, donde los dos tipos de líquidos (agua dulce y agua salada) establecen una relación delimitada por el vértice, y la existencia de una cuña de agua salada que corresponde a una gran extensión de agua de mar apoyada sobre el vértice del acuífero costero, punto en el que se evidencian los procesos de dispersión y difusión (Morell, 2003).

La intrusión salina se define como el proceso (temporal o permanente) en el que las aguas marinas desplazan el agua dulce, y se adentran en el continente y dan avance del agua salada en los acuíferos costeros, afectando la calidad de dicha agua, en la mayoría de los casos sobreexplotada (Hernández y Llanusa, 2010).

Los estudios de casos de intrusión salina se soportan principalmente en análisis hidrogeológicos, químicos, geológicos, y oceanográficos, esto dada la necesidad de caracterizar las zonas de estudio por medio de una serie de parámetros relacionados con cada una de estas áreas.

Para determinar, explicar o describir el movimiento de cualquier clase de fluido a través de un medio poroso, se utiliza la ecuación de la ley de Darcy, que nos permite conocer su velocidad de movimiento (Cienfuegos, Durán y Muñoz 2000):

$$V_D = -\frac{k}{\mu} (\nabla p - \rho g) \quad (1)$$

En donde:

K = tensor de permeabilidad.

μ = viscosidad.

∇p = gradiente de presiones.

ρ = densidad del fluido.

g = gravedad.

La otra ecuación de importancia es la ecuación de flujo que se describe como:

$$\frac{d(\epsilon p)}{dt} = -\nabla(pq) + pQ \quad (2)$$

En donde:

$\frac{d(\epsilon p)}{dt}$ = la derivada o razón de cambio de la porosidad y densidad del flujo con respecto al tiempo.

$-\nabla(pq)$ = variación de masa por los flujos entrantes y salientes.

pQ = presión y caudal de recarga.

Por ello, para casos en los que se estudia el movimiento de la intrusión salina de un punto a un área determinada, es de importancia construir un modelo que no integre el movimiento de los dos flujos como uno solo el modelo de interfaz neta, sino como dos diferentes que generen dependencia en el flujo en relación a la densidad; por tanto, se emplea un modelo de densidad variable.

Entonces, el flujo de agua subterránea con densidad variable puede ser descrito por la siguiente ecuación (Bart et al., 1988):

$$\rho S \frac{\partial h_f}{\partial t} + n \frac{\partial \rho}{\partial c} \frac{\partial c}{\partial t} - \rho q = \nabla \rho K + \left(\nabla h_f + \frac{(\rho - \rho_f)}{\rho_f} \nabla z \right) \quad (3)$$

En donde:

Z = es la coordenada alineada con la gravedad, ρ es la densidad del fluido.

K = conductividad hidráulica del medio poroso.

H_f = es la cabeza hidráulica de agua dulce.

ρ_f = densidad del agua dulce.

S : coeficiente de almacenamiento.

t = tiempo.

n = porosidad.

$\partial c / \partial t$ = cambio de concentración de los solutos que afectan la densidad de los fluidos (sal) con respecto al tiempo.

Para resolver la ecuación de flujo de agua subterránea de densidad variable es necesario resolver la ecuación de transporte de solutos ya que la densidad del fluido es una función de la concentración del soluto y la concentración puede cambiar como respuesta a cambios en el campo de flujo subterráneo. Para solutos conservativos (como aplica para esos presentes en el agua de mar), la ecuación de transporte de solutos puede ser expresada como:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \nabla(D\nabla c) - \nabla(\mathbf{vc}) \frac{q_s}{n} C_s \quad (4)$$

En donde:

D = coeficiente de dispersión.

V = velocidad de flujo.

Q_s = fuente o sumidero de agua

C_s = es la concentración del agua de esa fuente o sumidero.

Para desarrollar el análisis de intrusión salina en un acuífero costero se deben solucionar las dos ecuaciones de manera acoplada. Esto es, para cada paso de tiempo se debe resolver el campo de velocidades y luego la concentración (Bart et al., 1988).

3.1 Tipos de modelos en que interviene la variación de la densidad

Para analizar el contexto de un problema que busque analizar el comportamiento de una cuña de agua salada sobre un acuífero costero, es necesario partir de l tipo de agua salada o salobre en relación al agua dulce, el cual podemos definir como:

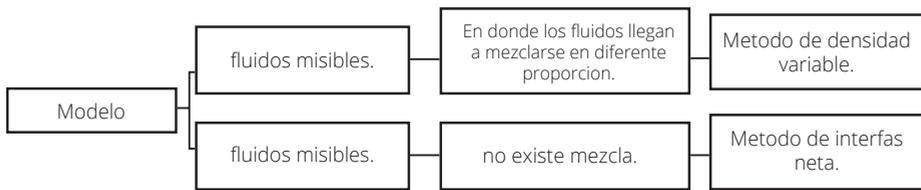


Figura 1. Modelo de definición de tipo de movimiento del flujo.

Fuente: elaboración propia.

Por ello que para casos en los que estudiamos el movimiento de la intrusión salina en un punto a un área determinada, es de importancia construir un modelo que no integre el movimiento de los dos flujos como uno solo el modelo de interfaz neta, sino como dos diferentes que generen dependencia en el flujo en relación a la densidad. Por tanto, se emplea un modelo de densidad variable (Renau, 2013).

3.2 Impactos del fenómeno de intrusión salina

La intrusión salina, en la mayoría de los casos, no llega a ser considerada como un evento de contaminación dado que es apreciado en algunos casos como un evento normal por el comportamiento físico del mar frente a la costa. Su mayor impacto es la afectación de la calidad del agua, que es captada por las poblaciones aledañas, mientras que las causas de intrusión salina sí están estrechamente relacionados con otros impactos. Según Post et al (2018), son los siguientes:

- La sobreexplotación del acuífero que afecta el equilibrio de agua dulce que es vertida al mar y que genera abatimiento en el nivel freático.
- El cambio climático que en temporadas secas implica una mayor sobreexplotación del acuífero; un aumento en las temperaturas intensifica la evaporación del agua y por ello, la presencia de sales es mayor, seguido del aumento en el nivel de los mares en las costas.
- Afectación del ciclo hidrológico del área determinada, causada por la disminución de la zona de recarga (urbanización), disminución de precipitaciones, afectación a cuerpos de agua superficiales (contaminación o cambios en su cauce) e interrupción del flujo de agua dulce hacia el mar, entre otras.

3.3 Medidas de amortiguamiento

La intrusión salina se considerada la principal causa de contaminación de acuíferos costeros en el mundo; por lo tanto, determinar las medidas más acertadas para remediar esta problemática es uno de los retos en la actualidad. Algunas de las principales medidas que se han examinado en casos de intrusión salina corresponden, según Pendás (2008), a:

Disminución de bombeos

- Reubicación de captaciones
- Barreras de inyección
- Barreras de depresión
- Recarga artificial
- Colectores costeros

El estudio del avance de la cuña salina en un acuífero costero es muy complejo, por una parte, por el gran número de variables físicas y socioeconómicas que intervienen en su estudio, por otro, por la influencia de la densidad del fluido en los campos de velocidad. Para enfrentar esta complejidad se han usado diversas metodologías de estudio desde diferentes disciplinas (Evangelista, 2008):

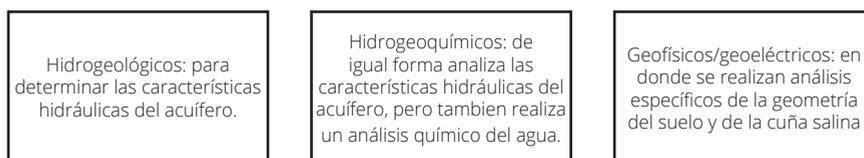


Figura 2. Disciplinas en que se enfoca el estudio de la intrusión salina.

Fuente: elaboración propia.

4. Estudios de casos de intrusión salina

El estudio de la intrusión salina no es un tema actual, como muchos tenderían a pensar, ya que desde inicios del siglo XX se empezaron a desarrollar pruebas para determinar modelos matemáticos que permitieran evaluar el avance de una posible contaminación. Uno de los primeros ejemplos se presenta en Huyakorn et al., (1987), el cual se concentra en el desarrollo de un modelo de elementos finitos que se encuentre en la capacidad de simular casos de intrusión salina, para diversos casos de geometría costera, que incluya variables geomorfológicas y condiciones particulares del acuífero (tipo).

El modelo se centra en dos sistemas de ecuaciones, uno para el fluido y otro para el transporte del soluto (sales). Se emplea un algoritmo que permite una solución secuencial y que permite realizar una serie de simulaciones tridimensionales de flujo y transporte. Se emplea una geometría lineal a partir de cuadros, triángulos, prismas, hexaedros y pentaedros. En el trabajo se valida el modelo a partir del desarrollo de 4 ejemplos de simulación (Huyajorn et al., 1987).

Bachu, (1995) presentó una revisión de métodos aplicados a dos casos de estudio en que se busca estimar el flujo de densidad variable en la cuenca Albetc en Canadá y los llanos orientales en Colombia. compone una serie de métodos y parámetros que buscan analizar las propiedades químicas de estos acuíferos con pendiente. A partir de los niveles piezométricos, su ubicación y topografía del lugar, se busca caracterizar las zonas para iniciar la construcción de un modelo que permita simular el comportamiento del flujo de densidad variable a partir de la representación de un caudal específico dado por el flujo y su velocidad.

Para concluir, a partir de los valores analizados y supuestos a causa de la inexistencia de datos, en gran parte de los casos, el estado de los acuíferos es:

Acuífero Wabamun en la cuenca de Alberta, en el oeste de Canadá, la densidad del agua de formación aumenta debido al aumento de la salinidad con la profundidad.



En acuífero Mirador- Guadalupe en Colombia la densidad del agua de formación disminuye debido al bajo incremento de la salinidad y de la temperatura con la profundidad.

Figura 3. Estado de los acuíferos en estudio de acuerdo a la presencia de sales.

Fuente: elaboración propia

Zhou et al, (2000) presentan la simulación del avance de caso de intrusión salina en el acuífero perteneciente a la costa de Beihai en la costa de la república de China. A partir de estudios realizados de 1988 a 1993 se ha evaluado la presencia de sales a lo largo de pozos de observación.



Figura 4. Área de estudio. Fuente: Google earth 2014.

La intrusión en el área se atribuye principalmente a la extracción intensiva de aguas subterráneas cerca a la costa sin ningún tipo de regularización hasta 1988. aguas subterráneas cerca a la costa sin ningún tipo de regularización hasta 1988. Para el verano de 1993, se observó una disminución en la presencia de cloruro dada la baja extracción de agua, producto de un largo periodo lluvias de ese año.

A partir de este comportamiento, se replantea conocer el estado actual del avance o retroceso de la intrusión, por lo que se generó un modelo matemático para describir simultáneamente el flujo de agua de subterránea y el transporte de solutos en el sistema del acuífero, que se espera que la intrusión de agua a lo largo de la costa norte siga avanzando, si las tasas actuales de las aguas subterráneas siguen aumentando. En uno de los resultados

presentado en la Figura 3, se observa la simulación de avance del caso intrusión a dos años (Zhou et al., 2000).

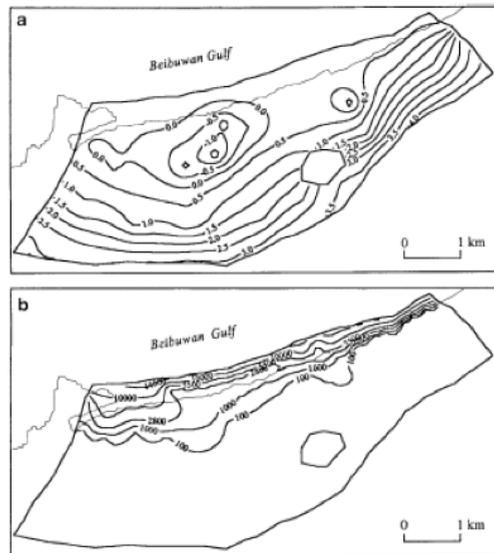


Figura 5. a) Nivel del agua (m) y b) concentraciones de cloruro (mg / l) simuladas para diciembre de 2002.

Essink, (2001) inicia la investigación de la intrusión salina en las aguas subterráneas de las costas al norte de Holanda, a través de la utilización de MOCDENS3D, que permite simular el flujo de agua subterránea con variaciones de densidad. Así se indica que el área ya se encuentra un caso de intrusión irreversible y difícilmente se puede hablar de su remediación, el cual se ha impulsado por la sobreexplotación del acuífero desde hace décadas.

Medina et al. (2001) estudiaron el acuífero de la costa Hermosillo, que se encuentra localizado en el mar de Cortés en el océano Pacífico el estado de Sonora, en México. Se caracteriza por tener un acuífero costero cuya extracción ha venido disminuyendo, ya que para 1965 se extraían alrededor de 1100 millones de $m^3/año$, hasta los 400 millones de $m^3/año$, que se extraen en la

actualidad. Para determinar el avance de la cuña de agua salada, se propuso la perforación de pozos a distintas profundidades, así como la realización pruebas de bombeo, toma de muestras, levantamientos topográficos y la realización de sondeos geofísicos electromagnéticos. A partir de los procedimientos anteriormente practicados en campo se procede a caracterizar el área de estudio, que cual comprende: geología (subsuelo, suelo, estructural), geofísica, hidrogeología e hidro-geoquímica. La colección de datos de campo permitió la delimitación las áreas intrusionadas en el continente, que se calculó como un área de 17 km de ancho y una longitud de 65 km, con una franja resultante de 1113 km² como se observa en la Figura 6.

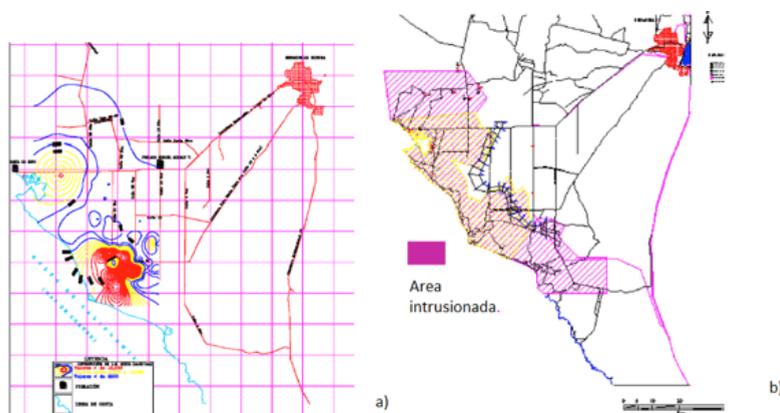


Figura 6. A) conductividades tomadas y redes de flujo de agua de mar. B) Área intrusionada en el acuífero. Fuente: (Monreal et al., 2001)

Ruiz et al, (2003) estudiaron el caso de la laguna Fuente de Piedra (Figura 5) que se encuentra localizada en Málaga (España), a 50 km aproximadamente del mar de Alborán. Este humedal fue uno de los primeros en ser incluidos en el convenio de Ramsar y es considerado como uno de los humedales más importantes de España. Este representa adicionalmente una reserva natural que es de vital importancia al ser el segundo mayor resguardo de flamencos en el mediterráneo occidental.

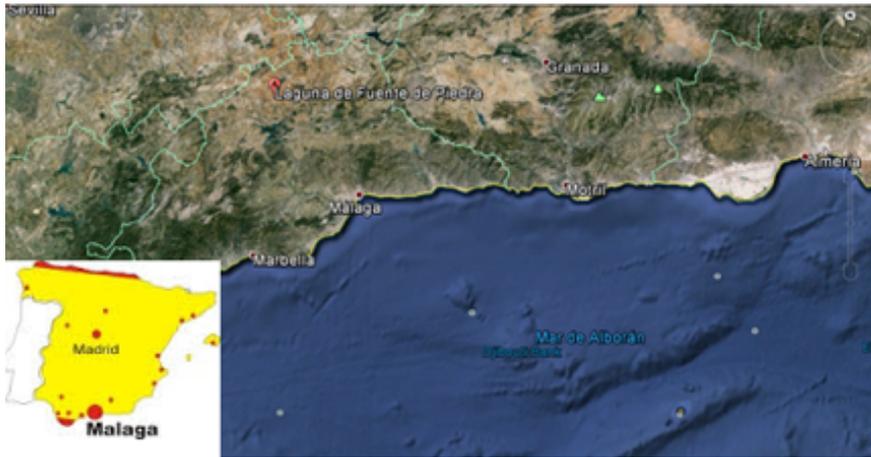


Figura 7. Laguna de fuente de piedra, Málaga, España.

El objetivo del estudio era caracterizar el sistema hidrogeológico de la zona a partir de la aplicación de técnicas hidrogeoquímicas y el análisis de isótopos ambientales. En particular, el estudio incluyó el análisis de la distribución espacial de la salinidad de las aguas subterráneas, ensayos de flujo mediante el marcado de la columna de agua, toma de muestras para análisis químicos e isotópicos y análisis químicos de las muestras recolectadas. Los resultados de los estudios permitieron diferenciar 4 familias de aguas subterráneas: (i) aguas en los paquetes calizos jurásicos caracterizados por un menor grado de mineralización y con una conductividad eléctrica (CE) de 1 mS/cm, (ii) agua de la zona intermedia en la que predominan los materiales miocenos y cuaternarios, la cual tiene una CE más alta (12 – 7 mS/cm), (iii) salmuera localizada debajo y alrededor de la laguna que presenta contenidos de sales entre 20 y 250 mg/l y (iv) aguas localizadas fuera de la cuenca de la laguna que representan zonas de recarga de la cuenca subterránea y que están en contraste con las características químicas comparadas con los otros 3 grupos.

4.1 Estudios de caso en el contexto colombiano

De acuerdo con su geografía, Colombia cuenta con dos océanos que conforman las costas caribe (Océano Atlántico) y pacífica (Océano Pacífico), Se trata del único país del continente suramericano que cuenta con esta condición.

Tabla 1. Características principales de las costas colombianas

Componentes	Costa pacífica.	Costa atlántica.
Departamentos que le conforman	Chocó, Valle del Cauca, Cauca, Nariño y Antioquia	Choco, Antioquia, Córdoba, Sucre, Bolívar, Atlántico, Magdalena y Guajira.
Golfos	Cupica. Tribuga.	Urabá. Morrosquillo.
Bahías	Humboldt. Malasa. Buenaventura. Tumaco.	Cartagena. Santa Marta y Parque Tayrona. De la península de la Guajira. San Andrés y Providencia.
Extensión	1300 km	1600 km

Estas áreas son de gran importancia para desarrollo del país ya que son puntos estratégicos de comercialización, debido a la cantidad de exportaciones e importaciones que realizan a diario en sus principales puertos: Santa Marta, Puerto Bolívar, Barranquilla, Cartagena, Málaga, Buenaventura, y Tumaco. En la que en la actualidad, el 90% de las exportaciones efectuadas en el país se realizan por este medio. Teniendo en cuenta de igual forma la importancia sectorial que tiene como fuente de empleo para sus habitantes y como centro de negociación para la ampliación de productos internos en el extranjero (Gallegos, 1997).

El otro atractivo que hace de las costas colombianas un punto estratégico, es la llegada de turistas de todas partes del mundo, ya que ven en Colombia un destino apropiado para aprovechar los dones dados a esta tierra por su posición cercana a la línea del ecuador, que le proporciona cualidades climáticas propicias para el ocio de millones de personas. Igualmente, alberga una diversidad de fauna y flora única en el planeta, que frente a todas las actividades que se desarrollan en su entorno las hace susceptibles a enfrentar cambios en su ecosistema a causa de diversas fuentes de contaminación. Entre las principales fuentes contaminantes que alteran las dinámicas de los ecosistemas costeros se encuentran (Maganda, 2008):



Figura 8. Principales fuentes de contaminación en zonas costeras.

En Colombia existen diferentes problemáticas ambientales que en la actualidad ponen en riesgo la estabilidad costera y se encuentran generalizados en las dos costas colombianas y en la isla de San Andrés y Providencia.

Estas problemáticas asociadas a vertimientos de residuos de origen doméstico (aguas servidas sin tratamiento), residuos industriales, descargas realizadas por barcos comerciales e industriales, y a través de los afluentes que descargan sus aguas

en las costas, han generado gran preocupación en la comunidad y los tomadores de decisiones (Maganda, 2008).

Existe otro tipo de contaminación costera que, por su naturaleza, resultan imperceptible para la comunidad, ya que no pueden apreciarse a simple vista como sucede en el caso de un residuo sólido flotando sobre el mar. Uno de estos casos de contaminación imperceptible a los ojos de las comunidades es la intrusión salina, ya que solo se puede apreciar a partir de la medición de elevadas concentraciones de sal en pozos de extracción.

La caracterización de este fenómeno requiere de un importante volumen de información, que es típicamente inexistente para el caso de las costas colombianas. Esto ha hecho muy difícil investigar el avance de la contaminación en acuíferos costeros por intrusión salina.

A continuación, se presenta la situación de los principales cuerpos costeros del país en los cuales se han reportado problemas de intrusión salina.

4.1.1. Golfo de Urabá

El golfo de Urabá se encuentra localizado en la costa caribe en la frontera con Panamá, específicamente en los departamentos de Antioquia y Chocó. La zona se caracteriza por los cultivos de diversos alimentos, entre los que se destaca el banano.

La intrusión salina en la zona se ha detallado gracias al registro de niveles de salinidad y estudio de explotación de pozos activos que se encuentran registrados y, por ende, son aptos para que realicen captaciones.

Zúñiga, et al., (2010), realizó una campaña de muestreo en la que se pusieron a disposición 16 pozos activos y 10 piezométricos para el análisis de variables que permitieran monitorear un avance de la intrusión salina el golfo de Urabá. Para el año en que se realizó este estudio, se registraban en la zona un total de 550 pozos activos que alimentan principalmente el área agroindustrial, que es la principal fuente económica de la costa antioqueña. Seguido del inventariado de pozos se dispuso un análisis de conductividades a partir de la heterogeneidad del acuífero, que tuvo como resultado:

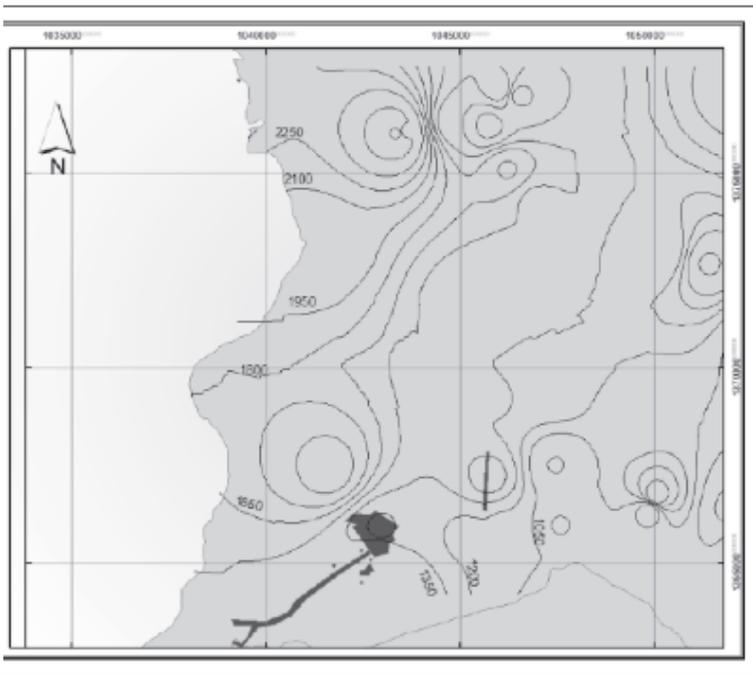


Figura 10. Conductividad eléctrica en el área de estudio. Fuente: (Zúñiga et al., 2010)

Se evaluaron, en cada uno de los pozos, las distintas relaciones de iones como magnesio/calcio, sodio/óxido de carbono, cloro/bicarbonato, sulfatos/cloro, entre otros, para determinar las concentraciones de sal en cada uno de los pozos de los que obtuvieron mediciones.

De acuerdo con estos resultados, se determinó que, por ejemplo, en la zona norte del acuífero se presentan elevadas concentraciones de sal en el agua, que no concuerdan con la baja tasa de extracción de los pozos en la zona. Además, hay bajos niveles de salinidad en el costado sur, en donde sí se realiza una extracción constante por la presencia de industrias en el sector.

Por ello, no se evidenció una relación ligada a los efectos de una sobreexplotación con la presencia de intrusión marina, aunque ahora debe intensificar su análisis hidrogeológico para la explicación de la presencia de sales en algunas partes del acuífero.

Así, lo ideal es la realización de estudios específicos sobre la geología del lugar, ya que lo más probable es que en las zonas con mayores presencias de sales exista una dilución de minerales que se encuentran por formaciones naturales en el acuífero que ocupa 1030 km² de extensión.

En el golfo de Urabá no se registran estudios específicos que permitan determinar si existe este tipo de contaminación, dado que tampoco se aplican medidas sobre la gestión del recurso hídrico de acuíferos cercanos a las costas.

4.1.2. Bahía de Santa Marta.

Santa Marta es uno de los destinos por predilección en Colombia, por sus ventajas sociales, ambientales y culturales, que también hacen susceptible la costa a albergar distintos tipos de problemas ambientales, la mayoría de ellos de origen humano.



Figura 11. Santa Marta Colombia, centro urbano. Fuente: Google Earth

De acuerdo al estudio realizado por García et al (2012), se busca analizar la calidad de las aguas costeras de Santa Marta a partir de 18 estaciones de monitoreo distribuidos en tres anillos con profundidades de 100, 200 y 300 metros que buscan evaluar parámetros como oxígeno, amonio, organofosforados, silicatos, salinidad, coliformes, entre otros.

De acuerdo con ello, y respecto a la salinidad, se analizó la variación de este parámetro en relación a la temperatura en 12 tiempos, evaluando dichos parámetros en la zona de mezcla:

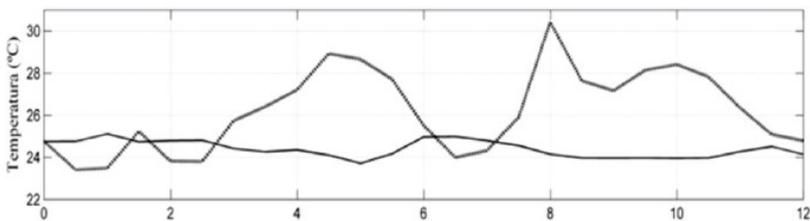


Figura 12. Variación de la temperatura en los puntos de control en la zona de mezcla. Fondo (línea continua) y superficie (Semicontinua)

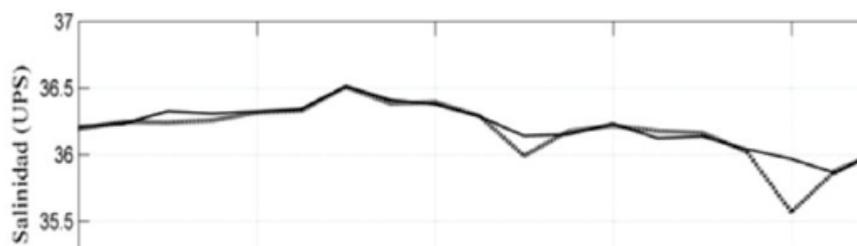


Figura 13. Variación de la salinidad en los puntos de control en la zona de mezcla. Fondo (línea continua) y superficie (Semicontinua)

El comportamiento de la temperatura es natural de acuerdo con las temperaturas diarias registradas en un lugar tan cálido, como lo es Santa Marta al igual que la salinidad en la zona de mezcla de la interfaz de agua dulce y salada. Aunque se evalúa este parámetro, no se realizan mediciones exactas en los puntos de monitoreo para determinar si existe un avance de dicha masa de agua salada en el continente.

5. Uso de modelos numéricos en el análisis de casos de intrusión salina

Un modelo se define como la representación de un escenario en el cual se quiere plasmar una idea o llegar a plantear un problema para buscar una solución, y que nos ayuda a entender de manera más clara cada una de las variables que pueden intervenir en él.

Los modelos numéricos se pueden clasificar en:

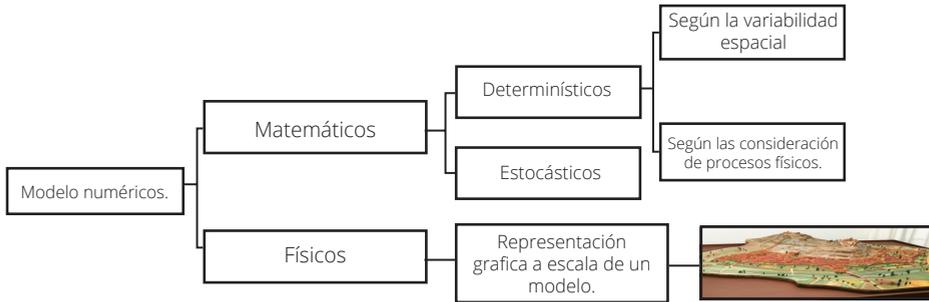


Figura 14. Modelos numéricos. Fuente: Mayorga (2002)

La solución de los anteriores sistemas de ecuaciones implica el uso de modelos numéricos aplicados, encaminados a la solución aproximada de las variables de estado. Los parámetros requeridos de manera espacial son hallados por medio de técnicas estadísticas tales como la interpolación. Los códigos numéricos están en la capacidad de solucionar las ecuaciones diferenciales que describen las dinámicas del flujo bajo condiciones de densidad variable.

Por tanto, los métodos de solución pueden mostrar de acuerdo a su escala un bajo o alto nivel de error, por ejemplo, si se estudia un caso en el que el flujo de contaminación de agua salada pasa a través de las aguas subterráneas de un acuífero de gran tamaño, este posee una franja de estudio muy grande, se pueden presentar más errores a diferencia de casos locales con resultados más precisos.

Por estas razones, el método de solución numérica cobra una importancia definitiva, que pueden ser (Bart et al., 1988):

- **Diferencias finitas:** caracteriza el acuífero en celdas, utilizando en cada una de ellas un balance independiente del movimiento del soluto.
- **Modelo de elementos finitos:** usa una solución de tanteo por medio de una interpolación.

En la actualidad son diversos los tipos de programas que permiten realizar este tipo de modelaciones, algunos de los más utilizados son, según Bart et al., (1988): FEEFLOW, HGS, MODFLOW, SEAWAT y SIMTRA.

6. Caso de estudio: acuífero Morrosquillo

El golfo de Morrosquillo se ubica en el Océano Atlántico en la costa de Colombia en los departamentos de Córdoba y Sucre, en las ciudades costeras de Tolú, Coveñas y San Antero. Su rasgo principal es un largo de unos 70 km litoral semicircular que se extiende de manera casi continua desde Punta San Bernardo hasta la bahía de Cispatá (INVEMAR, 2002). Detrás del litoral, la cuenca hidrográfica del golfo de Morrosquillo es de aproximadamente 2100km² (INVEMAR, 2002).



Figura 15. Golfo de Morrosquillo, Sucre, Colombia. Fuente: Carlos Castaño (2002).

- Drena el río Sinú (415 km).
- Se estima a partir del censo que en el área comprendiente al golfo habitan aproximadamente 310.000 personas.
- Sus dimensiones son de 40 km de longitud por 25 km de ancho.
- Se localiza en las latitudes 9°24' N 9°43' N y longitudes 75°35' W 75°78' W
- Se registran profundidades entre 15 y 55 metros, con un promedio de 35 m.
- Es de gran importancia para la región, dadas sus cualidades turísticas, sociales y económicas.
- La costa del acuífero de Morrosquillo está compuesta por los siguientes municipios (Hernández, 2006):
 - San Antonio de Palmito.
 - San Anofre.
 - Santiago de Tolú
 - Coveñas.
 - San José de Tolú viejo
 -

El área costera del golfo de Morrosquillo está compuesta por tres acuíferos principales (Molina et al., 1994).

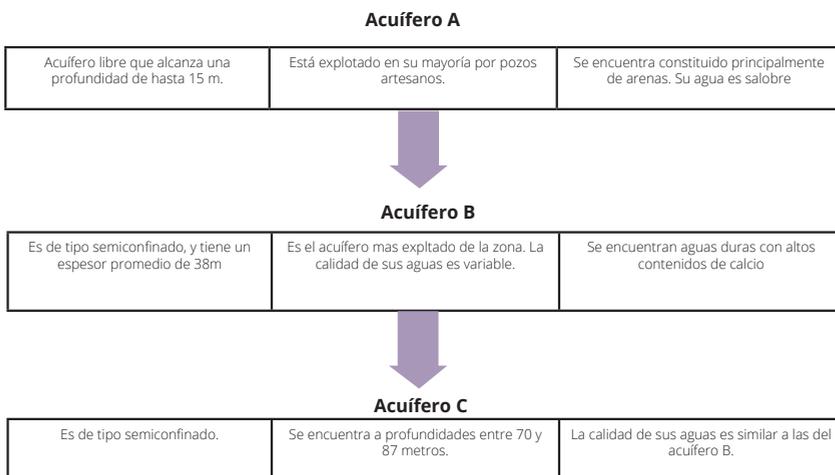


Figura 16. Acuíferos presentes en la zona. Fuente: elaboración propia

La costa perteneciente al municipio de Sucre está dada por un desarrollo portuario y turístico que implica una mayor demanda de los recursos naturales que brinda el espacio a sus habitantes.

6.1. Modelo conceptual

Consiste en la elaboración de un esquema del área definida para ser estudiada, en la cual se busca describir cada uno de los procesos, variables y parámetros que intervienen en el caso de estudio. Para el presente caso se establece como lugar de estudio el golfo de Morrosquillo en el sector de Coveñas, zona en que se evidencian problemas de sobreexplotación en el acuífero de la zona.

De acuerdo con el área seleccionada, esta corresponde a la mostrada en la imagen, situada en las coordenadas $9^{\circ} 24' 20.48''$ N y $75^{\circ} 39' 54.85''$, la altura máxima en el área de estudio es de 5m, aunque para el caso no tiene relevancia que estudiamos el flujo subsuperficial:

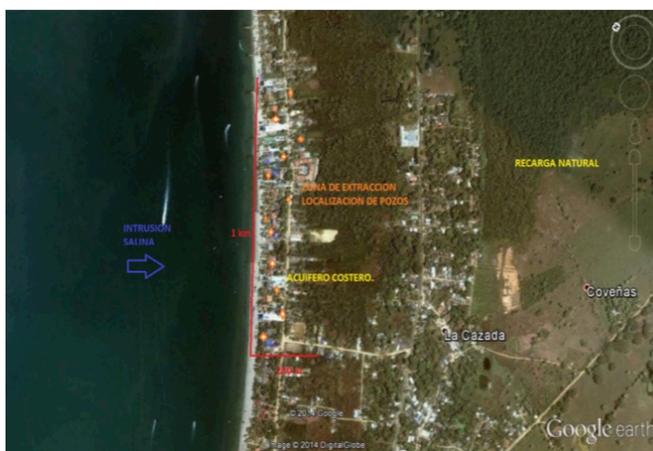


Figura 17. Área de estudio en Coveñas, Sucre. 6.2.

6.2. Selección del modelo computacional

El modelo computacional empleado es Visual Mod flow 2010.1, que fue desarrollado por el servicio geológico de los Estados Unidos para simular el flujo de aguas subterráneas, en diversos contextos como bombeos, ríos, drenes, e infiltración. Se adapta a la simulación de casos de intrusión salina y se adapta al objetivo que es describir el proceso de intrusión salina en el acuífero de Morrosquillo.

6.3. Diseño del modelo

Para la construcción del modelo se siguieron los siguientes pasos.

1. Asignación de valores iniciales. Inicialmente el programa nos pide indicar el tipo de simulación, para nuestro caso consiste en densidad variable y, como se especificó anteriormente es SEAWAT, así como las unidades que se van emplear en el uso de propiedades y resultados.
2. Creación de la grilla.
3. Después de la creación de la grilla a partir del modelo conceptual se inicia la asignación de valores y parámetros de acuerdo con el escenario, son los siguientes:



Figura 18. Variables a asignar de acuerdo con el escenario a evaluar. Fuente: Manual de uso SEAWAT

6.4. Calibración del modelo y validación.

Consiste en comprobar que los resultados arrojados por el modelo se ajustan a valores en campo, para así darle confiabilidad al modelo. Por ello, dado el objetivo del presente estudio que pretende demostrar el fenómeno en el contexto colombiano, no se tendrá que calibrar ni validar, ya que no se pretende ajustar ningún valor a la realidad. El modelo de calibración busca demostrar que el modelo está en capacidad de comprobarse a partir de la reproducción de la realidad con valores de campo, en donde se corrigen los valores dados por el modelo hasta llegar a aquella que se aproxime a la realidad (Hjorth, 2017).

$$Q = ap^2 + bp + c$$

$$V1 = [a, b, c]$$

$$V2 = [a, b, c]$$

$$V3 = [a, b, c]$$

*Iterando los parámetros hasta llegar
al más cercano a la realidad*

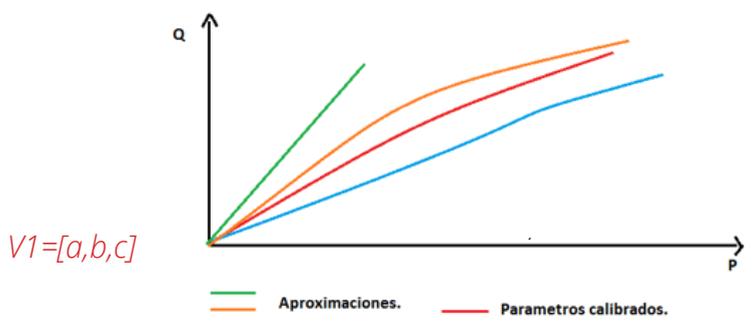


Figura 19. Calibración del modelo a partir de la aproximación de los parámetros calibrados. Fuente: elaboración propia.

6.5. Simulación de escenarios

6.5.1. Escenario de cambio climático

Los efectos del cambio climático sobre el nivel del mar, no son los mismos en todas las costas, ni se dan en igual medida alrededor de todo el mundo, ya que este fenómeno se da por la expansión térmica de los océanos y el descongelamiento de los polos del planeta. Por ende, según su intensidad y su localización, hacen más vulnerables unas partes del planeta que otras. Se estimó que el nivel del mar desde el año 1860 hasta el año 1900 había aumentado 1,7 mm/año, mientras que tan solo de 1993 a 2003 su aumento fue de 3,1 mm/año.

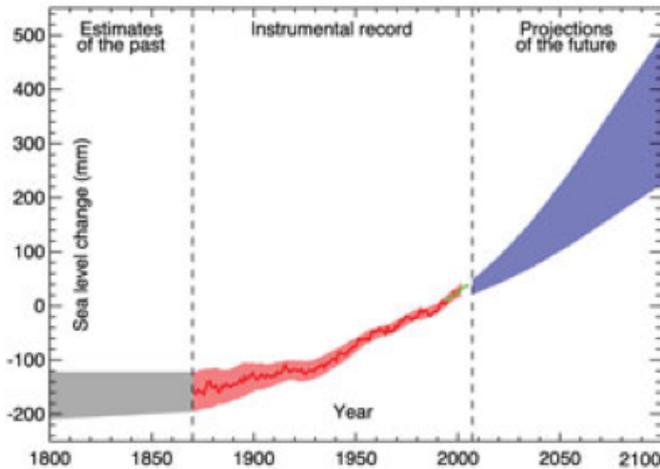


Figura 20. Nivel proyectado del nivel de aumento del nivel de mar.

Fuente: (Bindoff et al., 2007)

Resultado de la simulación:

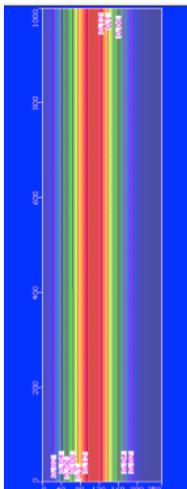


Figura 21. Concentración de sal en el área de estudio. Fuente: : elaboración propia.

En la anterior figura se evidencia cómo el aumento del nivel del mar incide en la intrusión salina en el borde costero.

Resultados de las simulaciones:

Comportamiento del fenómeno de intrusión salina en los distintos escenarios		
1. En el escenario en que se observa el aumento del nivel del mar a causa del cambio climático se evidencia como los niveles en las concentraciones de sal en un simulación de 130 días llegan a ocupar 190 m de los 250 m estudiados en el caso de estudio. Por lo que el efecto del cambio climático bajo las condiciones del modelo, muestra la capacidad de avance de la contaminación causada por la intrusión salina en el acuífero del golfo de Morrosquillo en Coveñas, Sucre.	2. Una extracción habitual o normal de aguas a través de pozos en la región muestra como de acuerdo a la tasa de extracción, muestra como las aguas pertenecientes al acuífero ya se encuentran contaminadas por la presencia de sales que alteran la calidad de las aguas.	3. Una extracción excesiva del recurso hídrico a causa de la población flotante que suele llegar a Coveñas en distintas temporadas del año muestra el avance de las concentraciones de sal y como se hace más susceptible de contaminarse en la mayoría de pozos y como se ven afectadas la calidad de sus aguas.

Figura 22. Resultados de los escenarios simulados

7. Conclusiones y discusión:

Los acuíferos costeros son formaciones localizadas en las barreras continentales que se forman a partir de las características hidrogeológicas de la zona en que se ubican y su interacción directa con el mar; contado con la existencia de una zona de mezcla en la que se dan distintas relaciones entre el agua dulce y salada. Una de estas relaciones corresponde con la intrusión salina que se presenta por la sobreexplotación del acuífero que hace que el agua de mar se adentre en el continente generando cambios en la calidad de las aguas del acuífero, en donde una relación de agua dulce con un 2% de agua de mar la hace no apta para consumo humano.

La determinación del avance de la masa de agua salina en un acuífero costero es de suma complejidad, debido a la necesidad de que existan estudios hidrogeológicos que caractericen el acuífero presente en la costa, así como mediciones específicas de niveles de salinidad en distintos puntos del acuífero. Por ello, la complejidad radica en la poca caracterización de estos ambientes a nivel mundial y nacional.

En Colombia, la presencia del fenómeno de intrusión salina no se ha evaluado de forma eficaz, primero, porque aún no se ve como un tipo de contaminación y, segundo, porque no existe información clara sobre su presencia o no. Por ende dada la inexistencia de información certera, son pocos los casos conocidos y estudiados sobre una posible contaminación por intrusión salina. La detección de sales en un acuífero no puede ser atribuida del todo a una intrusión salina, ya que pueden existir sedimentos o formaciones geológicas con presencias de sales que son erosionadas y llegan a las aguas del acuífero.

El cambio climático en la actualidad representa uno de los problemas que más atañen a la humanidad, por los cambios de temperatura a nivel mundial que tiene efectos sobre el nivel del mar, dado que este fenómeno se da por la expansión térmica de los océanos y el descongelamiento de los polos del planeta, que de acuerdo con la intensidad de estos factores y su localización hacen más vulnerables las costas del planeta. Se estimó que el nivel del mar desde 1860 hasta el año 1900 había aumentado 1,7 mm/año, mientras que tan solo de 1993 a 2003 su aumento fue de 3,1 mm/año.

El uso de modelo numéricos y la simulación de casos de intrusión salina en diversos contextos representan una herramienta de gran importancia al permitir la generación de resultados futuros que facilitan la comprensión del fenómeno, así como la predicción de posibles comportamientos. Esto último podría contribuir de manera definitiva hacia al diseño de estrategias para mitigar y controlar la intrusión salina.

En la actualidad, es fundamental el desarrollar planes y medidas de mitigación para casos de intrusión salina en las costas colombianas, dado que esta problemática no ha sido estudiada, por lo que no existen métodos de análisis y mucho menos de avance frente a una posible contaminación. Por ello, la calidad de las aguas costeras pertenecientes a los acuíferos se están viendo alteradas en su calidad por la presencia de sales. Entonces, es fundamental en estos casos la aplicación de simulaciones para determinar el estado actual de los acuíferos costeros el país.

8. Referencias

- Bart, T. (1988). Modelación de la intrusión salina. Revisión de métodos. Recuperado a partir de <http://aguas.igme.es>
- Bindoff, N, et al. (2007). Observations: oceanic climate change and sea level. Recuperado de <http://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/15400>
- Castaño, C. (2002). Golfos y bahías de Colombia. Banco de Occidente.
- Cienfuegos, R., Durán, M., y Muñoz, J. (2000). Modelamiento y simulación numérica de la intrusión salina en acuíferos. Recuperado de <http://www.emfimin.usach.cl/2000/trabajos/duran.pdf>
- De Brossard, M., Haffner, L., y García, M. (2003). Historia marítima del mundo: un apasionante viaje por océanos, descubrimientos y conquistas marinas. Edimat.
- Essink, G. (2001). Salt water intrusion in a three-dimensional groundwater system in the Netherlands: a numerical study. *Transport in porous media*, 43(1), 137–158.
- Gallegos, A., y Czitrom, S. (1997). Aspectos de la oceanografía física regional del mar Caribe. *Monografía*, 3, 225-242.
- Fernando Pendás Fernández. (2008). Acuíferos costeros e intrusión salina. Universidad de Oviedo. Recuperado a partir de <http://aguas.igme.es>
- García, F., Palacio, C., y García, U. (2012). Calidad del agua en el área costera de Santa Marta (Colombia). *Dyna*, 173, 85-94.

- Grupo de investigación de recursos hídricos (2008). Lección acuíferos costeros. Instituto Universitario de Plaguicidas y Aguas (IUPA) de la Universidad Jaime I de Castellón. Recuperado de: <http://www.agua.uji.es/pdf/leccionRH08.pdf>
- Hernández, A. O., & Llanusa, H. (2010). La modelación matemática y la explotación de los acuíferos costeros. In Memorias del XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Cuba.
- Hernández, A. y Llanusa, H. (2010). La modelación matemática y la explotación de los acuíferos costeros. Memorias del XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Cuba.
- Hjorth, J. (2017). Computer intensive statistical methods: Validation, model selection, and bootstrap. Routledge.
- Huyakorn, P., Andersen, P., Mercer, J., y White, H. (1987). Saltwater intrusion in aquifers: Development and testing of a three-dimensional finite element model. *Water Resources Research*, 23(2), 293-312.
- INVEMAR. (2002). Formulación del plan de manejo integrado de la unidad ambiental costera estuarina del río Sinú y golfo de Morrosquillo. Informe técnico. Fase 1, caracterización y diagnóstico.
- INVEMAR. (2002). Formulación del plan de manejo integrado de la unidad ambiental costera.
- Maganda, C. (2008). ¿Agua dividida, agua compartida? Acuíferos transfronterizos en Sudamérica, una aproximación. *Estudios Políticos*, (32), 171-194.
- Mayorga, F. (2002). Simulación numérica de vertimientos en suelos. Perspectiva en Colombia. Universidad Antonio Nariño, Bogotá.
- Medina, M., Monreal, R., Morales, M., y Gurrola, J. (2004). Estimation of the vulnerability to saline intrusion of the coast of Hermosillo aquifer, Sonora, Mexico. *Geofísica Internacional*, 43(4), 611-621.

- Morell, I. (2003). Acuíferos detríticos costeros. *Hidrogeología y Aguas Subterráneas*, 1(8), 31-44.
- Morell, I. (2008). *Procesos de salinización*. Universidad Jaume I de Castellón.
- Molina, A., Molina, C., Giraldo, L., Parra, C., y Chevillot, P. (1994). Dinámica marina y sus efectos sobre la geomorfología del golfo de Morrosquillo. *Boletín Científico del CIOH*, 15, 93-113.
- Pendás, F. (2008). *Acuíferos costeros e intrusión salina*. Universidad de Oviedo.
- Renau, A. (2013). Nueva herramienta para la gestión de las aguas subterráneas en acuíferos costeros. Volumen ecológico de remediación (VER). Metodología y aplicación a la plana de Oropesa-Torreblanca (MASub 080.110). Tesis doctoral. Universitat Jaume I.
- Ruiz, J. y Araguas, L. (2003). Definición del modelo conceptual de flujo del sistema hidrogeológico de densidad variable en la laguna de puente de piedra, sur de España. Instituto Geológico y Minero de España.
- Vélez, A y Marín, B. (2001). *Contaminación marino costera en Colombia*. Informe del Estado de los Ambientes Marinos y Costeros en Colombia, INVEMAR.
- Zhou, X., Chen, M., Ju, X., Ning, X., y Wang, J. (2000). Numerical simulation of sea water intrusion near Beihai, China. *Environmental Geology*, 40(1-2), 223-233.
- Zúñiga, V., Azofeifa, I., Quintero, M. y Hartig, F. (2010). Hidrogeoquímica en el acuífero costero del eje bananero de Urabá. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 9(17), 51-61.

NANOTUBOS DE TITANIO (TiO_2) COMO UNA SOLUCIÓN AMBIENTAL AUTOSOSTENIBLE PARA LA DEGRADACIÓN GASES NO_x EMITIDOS POR LA INDUSTRIA DEL PETRÓLEO.

Nydia Margarita Habrán Esteban¹⁰

Nelson Joman Vargas Ortiz¹¹

La contaminación atmosférica afecta principalmente la calidad del aire que se respira e interfiere de forma negativa sobre la salud de los ecosistemas y del ser humano. Los principales contaminantes asociados a los problemas de salud, son el material particulado (PM), óxido de azufre (SO_x) y los óxidos de nitrógeno NO_x . Estudios recientes llevados a cabo en Europa, América del Norte y Asia señalan la relación entre la contaminación del aire en las grandes ciudades y el número de internaciones hospitalares atribuido principalmente a enfermedades pulmonares, respiratorias y cardiovasculares (Brunekreef, 2007; Lucas & Peres, 2006; Pope & Dockery, 2006). Los óxidos de nitrógeno, NO_x , son considerados los mayores contaminantes atmosféricos que participan en la formación de lluvia ácida, en conjunto con los óxidos de azufre, del efecto invernadero y de la contaminación fotoquímica en presencia del monóxido de carbono. Sobre la salud humana el NO_x causa problemas del tracto respiratorio

10 Química, M. Sc., Ph. D. Docente tiempo completo Ingeniería Mecánica Universidad ECCI

11 Ingeniero Civil, M. Sc. Fundación Universitaria Agraria de Colombia

incluyendo edemas pulmonares y la reducción de la capacidad de la sangre de transformar la hemoglobina en metahemoglobina (Toma, Bertrand, Klein, & Coddet, 2004).

Los óxidos de nitrógeno (NO_x) consisten principalmente en las especies NO y NO_2 emitida por los tubos de escape de los carros, combustión del carbón y en plantas industriales, principalmente en la industria del refino del petróleo (M. Abreu, Morgado, Jardim, & Marinkovic, 2012). El impacto medio ambiental provocado por los combustibles fósiles es más relevante debido a que el petróleo contiene grandes cantidades de compuestos aromáticos y nitrogenados que resultan en una gran emisión de NO_x , proveniente de grandes fuentes estacionarias durante los procesos de craqueamiento catalítico fluidizado de este mineral.

Las reglamentaciones medioambientales actualmente son más restrictivas, y obligan a proveer mejores procesos convencionales y alternativos para la degradación de estos contaminantes. De esta forma surgió el interés en el desarrollo de métodos alternativos autosustentables con potencial suficiente para la descontaminación de dichos compuestos. La remediación ambiental es abordada hace décadas por métodos convencionales para la degradación o transformación de sustancias tóxicas tales como incineración a altas temperaturas, digestión por lodo activo y tratamientos fisicoquímicos convencionales (Lucas & Peres, 2006).

Una alternativa para la remediación ambiental de forma autosustentable, con elevado potencial en el tratamiento de contaminantes atmosféricos, es la fotocatalisis heterogénea también conocida como proceso oxidativo avanzado (POA). Dicho proceso fue sugerido por primera vez en 1977 para la degradación de cianatos (Ether, Tse, & Tamres, 1977).

La fotocatalisis heterogénea es una alternativa enfocada a

causar una degradación foto-oxidativa y mineralización de gases y líquidos contaminantes. Se basa principalmente en la formación de radicales $\cdot\text{OH}$, por la excitación de los electrones de la banda de valencia (BV) para la banda de conducción (BC) en materiales semiconductores cuando irradiados por el espectro de luz visible o ultravioleta UV. Los radicales $\cdot\text{OH}$ reaccionan con los contaminantes inorgánicos u orgánicos generando su degradación como está descrito en la figura 1. Entre los semiconductores más estudiados se destaca el TiO_2 en la forma de anatasa debido a su elevado desempeño fotocatalítico frente a otros materiales semiconductores. Atribuido, entre otros motivos, al alto poder oxidativo de su BV, además de no ser tóxico y de bajo costo cuando comparado con otros semiconductores (Etacheri, Di Valentin, Schneider, Bahnemann, & Pillai, 2015)

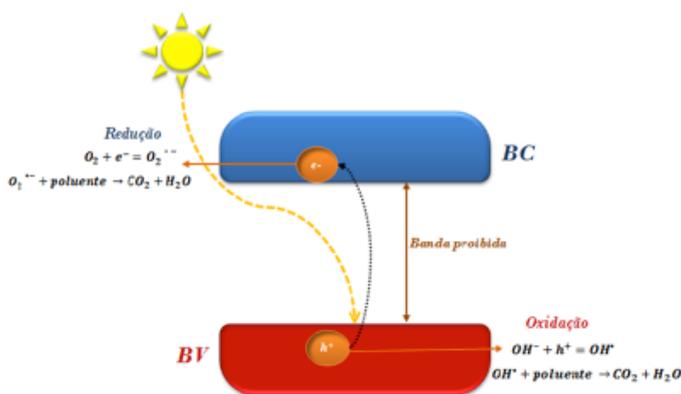
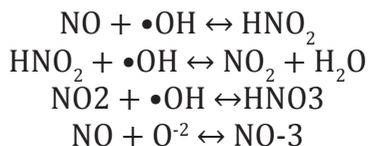


Figura 1-Esquema del mecanismo de reacción fotocatalítica en un semiconductor para la degradación a CO_2 y H_2O de contaminantes orgánicos

El proceso fotocatalítico para la degradación de los gases inorgánicos se da principalmente por la interacción de las especies activas OH^\bullet e $\text{O}_2^{\cdot-}$ con las moléculas de NO adsorbidas en la superficie del fotocatalizador como se describe a continuación (M. Abreu et al., 2012):



Existen tres formas polimórficas cristalinas principales del TiO_2 : siendo estas anatasa, rutilo y brookita. La estabilidad de las formas polimórficas del semiconductor depende del tamaño de los cristales. Por ejemplo, el rutilo es la fase de equilibrio termodinámico, pero el anatasio es la fase más estable para nanopartículas con los tamaños inferiores a 11 nm, en cuanto la brookita fue determinada más estable cuando sus nanopartículas están entre 11 y 35 nm. Las formas polimórficas de rutilo y anatasa son comúnmente usadas en fotocatalisis siendo la anatasa la que presenta mayor actividad fotocatalítica (Fujishima Zhang, & Trik, 2008; Khaki, Shafeeyan, Raman, & Daud, 2017)

La formación de TiO_2 nanométrico puede generar un incremento de la banda de energía prohibida aumentando el potencial redox y favoreciendo la fotodegradación de los gases inorgánicos. De este modo, cuando el dióxido de titanio TiO_2 es sintetizado en la forma nanométrica puede facilitar la interacción y la reacción con los compuestos del medio ambiente. Las reacciones fotocatalíticas ocurren en la superficie del nanomaterial, dependiendo ampliamente de la extensión del área superficial específica, resaltando que el proceso fotocatalítico es favorecido por el aumento del área superficial específica cuando el TiO_2 es sintetizado en la forma nanométrica (Miyachi & Nakajima, 2002).

Fue sintetizado, por primera vez, a través de un proceso relativamente simple, de síntesis alcalina hidrotérmica (Kasuga, Hiramatsu, Hoson, Sekino, & Niihara, 1998), nanotubos de titanio ($\text{Na}_{2-x}\text{H}_x\text{Ti}_3\text{O}_7 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) con una estructura cristalina en capas con una elevada área superficial (~ 250-350 m²/g) y banda de energía

prohibida de 3,3 eV que cuando son tratados térmicamente a temperaturas relativamente bajas (550 °C) son transformados en anatasa que es la especie cristalina del TiO_2 más activa fotocatalíticamente hablando. De esta forma, dicho material de TiO_2 se tornó un candidato natural para ser empleado en fotocatalisis heterogénea para la fotooxidación de los gases contaminantes de NO_x . El material o nanopolvo de TiO_2 es sintetizado y caracterizado mediante la ruta de síntesis alcalina hidrotérmica partiendo de un precursor de uso comercial en la industria brasilera, principalmente como aditivo para pinturas y de bajo costo conocido como anatasa KA-100.

La caracterización por difracción de rayos X del producto KA-100, usado como precursor para la síntesis de nanotubos de titanio (TTNTs) muestra una composición correspondiente a la fase de anatasa, así como la presencia en poca cantidad de la fase rutilo. De este modo, la anatasa se identifica como predominante con un porcentaje de 98,4%, con un tamaño medio de cristalito calculado en 97 nm y para el rutilo de 135 nm y un área específica determinada experimentalmente de 3,9 m^2/g . El tamaño medio de cristalito calculado para cada uno de los componentes del material empleado como precursor, muestra la naturaleza de material no nanométrica con un elevado porcentaje de anatasa que es considerada la especie más activa fotocatalíticamente.

De la misma forma los TTNTs obtenidos del proceso de síntesis alcalina hidrotérmica con una conversión total verificada por DRX exhiben una morfología de nanotubos confirmada por microscopia electrónica de transmisión (MET) (Figura 2), con un área superficial de 283 m^2/g .

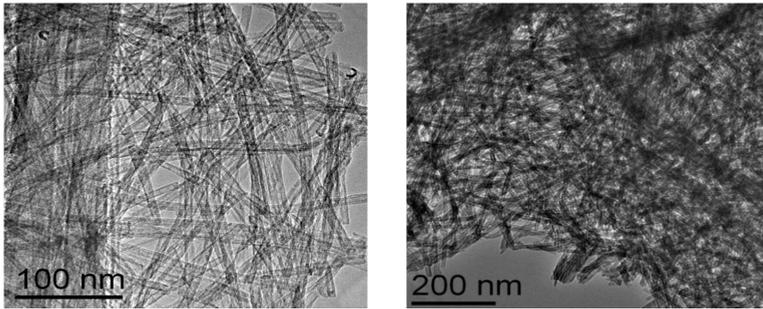


Figura 2. Imagen de MET de los TTNTs productos de la síntesis alcalina hidrotérmica.

La anatasa en la forma nanométrica denominada experimentalmente como AM-1 es obtenida mediante el proceso de calcinación a 550 °C de los TTNTs en atmósfera de aire. El perfil de difracción de rayos-X muestra la predominancia de la fase anatasa con una línea de difracción principal de mayor intensidad en la posición $2\theta = 25,35^\circ$ correspondiente a la familia de planos cristalográficos $\{101\}$, así como otros picos característicos de la anatasa con menor intensidad como los observados en la figura 3. El tamaño medio de cristalito de 11 nm. Estos Análisis indican que la ruta propuesta donde se inicia con un precursor comercial de bajo costo genera la formación de partículas de anatasa nanoestructuradas.

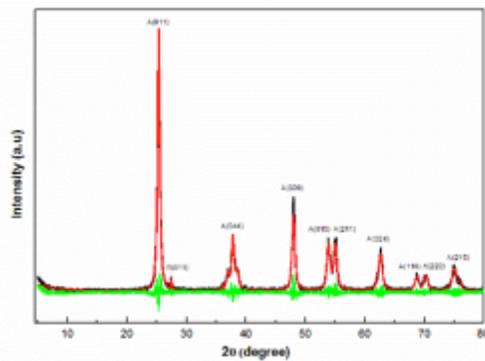


Figura 3- Difractograma de la nanopartículas de TiO_2 obtenidas del precursor comercial KA 100.

Es bien documentado en la literatura la transformación completa para anatasa de los TTNTs cuando tratados térmicamente en aire a 550 °C, como en el caso de las nanopartículas sintetizadas AM-1 (M. a. S. Abreu, Morgado, Jardim, & Marinkovic, 2012; Morgado et al., 2007). La morfología en la forma de nanobastones exhibida por la anatasa en la muestra AM-1 (ver figura 4) es considerada como una consecuencia de la morfología de las fases precedentes a la anatasa a lo largo de la secuencia de transformación de la fase que inicia como estructura laminar de titanato en los TTNTs (M. a. S. Abreu et al., 2012). De la misma forma, es relevante resaltar que la morfología de nanobastones no coincide con la morfología de equilibrio de la anatasa que es de bipirámide troncada (M. a. S. Abreu et al., 2012; Yoshida, Suzuki, & Yoshikawa, 2005).

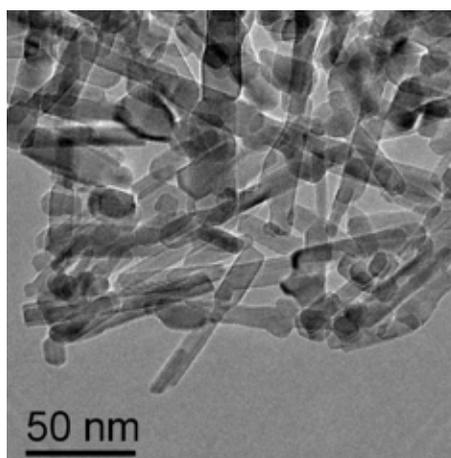
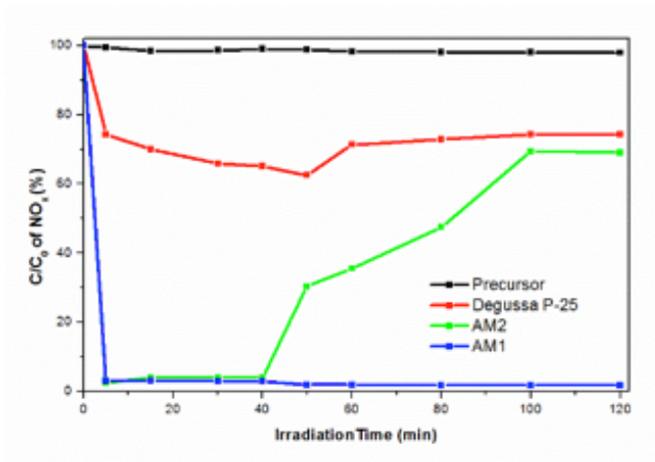


Figura 4- micrografías de MET de las nanopartículas de TiO_2 AM-1.

El análisis de fotodegradación del gas contaminante inorgánico NO es mostrado en el gráfico de la figura 5 durante un tiempo de 120 minutos. El nanopolvo de AM-1 analizado exhibe una elevada actividad fotocatalítica comparado con el padrón de comparación Degussa P-25, a lo largo de 120 minutos se registra su

desactivación. La eficiencia fotocatalítica de dicho material de TiO_2 está relacionada con los siguientes parámetros: fase cristalina, morfología de superficie, área superficial específica y tratamiento térmico (Toma et al., 2004). El material de AM-1 en la forma de nanobastones de anatasa, obtenida mediante la transformación en el estado sólido de los TTNTs tratados térmicamente a $550\text{ }^\circ\text{C}$, poseen un área superficial específica mayor que el patrón de comparación. Un área superficial específica mayor permite una mejor absorción del contaminante gaseosos en la superficie del fotocatalizador que contribuye en el aumento de la eficiencia fotocatalítica (Habran, Krambrock, Maia da Costa, Morgado, & Marinkovic, 2018).

Este proceso de síntesis para la obtención de nanopartículas AM-1 permite la producción de nuevos materiales con propiedades fotocatalíticas en la degradación de gases contaminantes, bien superiores con relación al patrón de comparación Degussa P-25, representado una alternativa promisoría de remediación ambiental no convencional con posibles aplicaciones tales como revestimientos de superficies autosustentables.



Referencias

- Abreu, M. a. S., Morgado, E., Jardim, P. M., & Marinkovic, B. a. (2012). The effect of anatase crystal morphology on the photocatalytic conversion of NO by TiO₂-based nanomaterials. *Central European Journal of Chemistry*, 10(4), 1183–1198.
- Abreu, M., Morgado, E., Jardim, P., & Marinkovic, B. (2012). The effect of anatase crystal morphology on the photocatalytic conversion of NO by TiO₂-based nanomaterials. *Open Chemistry*, 10(4), 1183–1198.
- Brunekreef, B. (2007). Health effects of air pollution observed in cohort studies in Europe. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 17 Suppl 2, S61-5.
- Etacheri, V., Di Valentin, C., Schneider, J., Bahnemann, D., & Pillai, S. C. (2015). Visible-light activation of TiO₂ photocatalysts: Advances in theory and experiments. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 25, 1–29.
- Ether, D., Tse, H., & Tamres, M. (1977). Vapor-Phase Charge-Transfer Complexes . I O . Iodine Complexes, 81(21).
- Fujishima, A., Zhang, X., & Tryk, D. (2008). TiO₂ photocatalysis and related surface phenomena. *Surface Science Reports*, 63(12), 515–582.
- Habran, M., Krambrock, K., Maia da Costa, M. E. H., Morgado, E., & Marinkovic, B. A. (2018). TiO₂ anatase nanorods with non-equilibrium crystallographic {001} facets and their coatings exhibiting high photo-oxidation of NO gas. *Environmental Technology*, 39(2), 231–239.
- Kasuga, T., Hiramatsu, M., Hoson, A., Sekino, T., & Niihara, K. (1998). Formation of Titanium Oxide Nanotube. *Langmuir*, 14(12), 3160–3163.

- Khaki, M. R. D., Shafeeyan, M. S., Raman, A. A. A., & Daud, W. M. A. W. (2017). Application of doped photocatalysts for organic pollutant degradation - A review. *Journal of Environmental Management*, 198, 78–94.
- Lucas, M., & Peres, J. (2006). Decolorization of the azo dye Reactive Black 5 by Fenton and photo-Fenton oxidation. *Dyes and Pigments*, 71(3), 236–244.
- Miyauchi, M., & Nakajima, A. (2002). Photocatalysis and photoinduced hydrophilicity of various metal oxide thin films. *Chemistry of ...*, (24), 2812–2816. Retrieved from
- Morgado, E., de Abreu, M. a. S., Moure, G. T., Marinkovic, B. a., Jardim, P. M., & Araujo, A. S. (2007). Effects of thermal treatment of nanostructured trititanates on their crystallographic and textural properties. *Materials Research Bulletin*, 42(9), 1748–
- Pope, C. A., & Dockery, D. W. (2006). Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines that Connect. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 56(6), 709–Toma, F. L., Bertrand, G., Klein, D., & Coddet, C. (2004). Photocatalytic removal of nitrogen oxides via titanium dioxide. *Environmental Chemistry Letters*, 2(3), 117–121.
- Yoshida, R., Suzuki, Y., & Yoshikawa, S. (2005). Effects of synthetic conditions and heat-treatment on the structure of partially ion-exchanged titanate nanotubes. *Materials Chemistry and Physics*, 91(2–3), 409–416.

ANÁLISIS DE PROXIMIDAD A INFRAESTRUCTURA COMO APORTE AL DESARROLLO SOSTENIBLE

*Paula Andrea Cifuentes Ruiz¹²
Juan Pablo Londoño Linares¹³*

Resumen

El rol espacial de las ciudades intermedias y su papel en el equilibrio territorial está en buena parte relacionado con la capacidad de estos centros de ofrecer un mínimo de servicios y equipamientos a la población (Llop, J.; Bellet, C., 1999). Teniendo en cuenta que la medición de las condiciones de sostenibilidad de una ciudad intermedia deben hacerse a partir de la escala local, se propone una metodología simplificada para efectuar mediciones como proxy a lecturas de accesibilidad. Se tomó la medición de las distancias a equipamientos como contribución al análisis de problemas como la exclusión social y espacial, visualizando la distribución de los equipamientos en la ciudad y a su vez, identificando el déficit de los mismos en determinadas zonas como aporte a la toma de decisiones.

12 Arquitecta. Magíster en Medio Ambiente y Desarrollo. Doctora en Urbanismo, Territorio y Sostenibilidad. Profesora Asociada. Universidad de La Salle.

13 Ingeniero Civil. Magíster en Medio Ambiente y Desarrollo. Doctor en Sostenibilidad. Director Programa de Ingeniería Civil. Universidad de La Salle.

Introducción

La accesibilidad geográfica a un equipamiento resulta de gran importancia para la población (Geurs & van Wee, 2004). En cualquier tipo de zona, rural o urbana, tener accesibilidad a un centro educativo, un parque, un hospital, movilidad, una parada de autobús, una vía, y al lugar de trabajo, etc. (Agbenyo, Marshall Nunbogu, & Dongzagla, 2017; Chen, Ni, Xi, Li, & Wang, 2017; Combs, 2017; Dai, Liu, Liao, & Cai, 2018; Guzman & Bocarejo, 2017; McGrail & Humphreys, 2014; Rosero-Bixby, 2004; Yin, He, Liu, Chen, & Gao, 2018), además de un derecho (Harvey, 2012; Lefebvre, 1968), es un factor que incide en la calidad de vida de las personas pues les evita largos recorridos y en algunos casos como los hospitales, puede ser trascendental para salvar una vida; del mismo modo, desde el punto de vista económico representa, para personas de bajos ingresos, la necesidad permanente de desplazamiento a costos elevados.

Según Sabatini, Cáceres y Cerdá (2001) “el grado de proximidad espacial o de aglomeración territorial de las familias pertenecientes a un mismo grupo social, ya sea en términos étnicos, étnicos, de preferencias religiosas o socioeconómicas, entre otras posibilidades” (p. 27) define la segregación residencial. Así mismo, la estructura urbana influye en la distribución de oportunidades para los habitantes, como en las condiciones de su localización asociadas a formas diferenciales de acceso al suelo, a los servicios, a los equipamientos urbanos, a los lugares de trabajo, etc. (Di Virgilio, 2011; Pinkster, 2007; Salazar-Cruz, 1999), constituyéndose en un factor crítico de estratificación. Los flujos, las circulaciones e interacciones influyen directamente en las características, calidad y condiciones de acceso de los espacios públicos, del equipamiento social, de los servicios sociales básicos (salud y educación) y del sistema de transporte urbano (Gledhill & Hita, 2014).

Frente a un panorama de desigualdad recurrente en cualquier ciudad latinoamericana, aparece el concepto de Derecho a la ciudad de Henri Lefebvre (Lefebvre, 1968), retomado por David Harvey (Harvey, 2012); ambos autores cuestionan acerca de “la forma en que se hacen y rehacen nuestras ciudades” (Harvey, 2012, p. 21), es allí donde cobra importancia el campo de estudio de las ciudades intermedias, las cuales se considera pueden ofrecer mejor calidad de vida en función de su escala urbana (Bellet & Llop, 2004).

El proceso de urbanización en las ciudades latinoamericanas es consecuencia de la implantación de modelos externos en regiones con particularidades naturales y contrastes sociales y económicos propios, los cuales generan grandes desigualdades. En el caso colombiano, después de la colonia, la mayoría de las ciudades han experimentado un crecimiento acelerado por las migraciones internas debidas a múltiples causas, entre ellas la violencia y el conflicto armado. Adicionalmente, los sistemas de planificación urbana no han superado la linealidad y el cartesianismo heredados de la modernidad, situación que ha generado desequilibrios en el sistema natural y el sistema urbano, y que constituyen una prueba de la insostenibilidad del modelo de desarrollo urbano actual.

Análisis de la proximidad a equipamientos de la ciudad intermedia como aporte al estudio de la desigualdad urbana

A mediados de 2015 la población mundial alcanzó los 7.300 millones de personas, lo que significa que, en 12 años, el número de personas en el mundo ha aumentado en 1.000 millones (United Nations, 2018).

En el año 2009, por primera vez en la historia la población mundial que habitaba en ciudades superaba a la población rural, con procesos acelerados de urbanización en Asia y África. En el año 2015, la población urbana mundial alcanzó el 54%, con proyecciones para los años 2030 y 2050 del 60% y 66,4% respectivamente (Llop Torné & Hoeflich de Duque, 2010). La mayoría de la población urbana habita en ciudades de tallas medianas y pequeñas que son consideradas notablemente numerosas. Según ONU-Hábitat (2012), se afirma que estas ciudades con más de 500.000 habitantes, reciben a más del 60% de la población urbana mundial, cifras que permiten reconocer la creciente importancia de las mismas. Pero no solamente se deben tener en cuenta a partir de su tamaño y talla, cabe agregar la tendencia de redistribución de la población y las actividades económicas hacia estas ciudades, cuyas funciones regionales las ubican en una posición privilegiada en comparación tanto con las ciudades de gran tamaño, como con las ciudades pequeñas.

Según la Declaración de Lleida “Frente a la accesibilidad y las comunicaciones, las CIMES pueden aportar las ventajas implícitas en su escala intermedia y desarrollar formas de movilidad y accesibilidad territorial más sostenibles” (Union Internacionale des Architectes, 1999, p. 2). Se considera que el crecimiento de ciudades intermedias puede ser menos caótico que el crecimiento de una megalópolis, debido a las características inherentes a este tipo de ciudades consideradas como centros que pueden contribuir a un proceso de urbanización mundial más sostenible y territorialmente más equilibrado y próximo, en función de su escala urbana porque pueden ofrecer mejor calidad de vida (Bellet, Carme; Llop, 2000; Bolay & Rabinovich, 2004; Llop, J.; Bellet, C., 1999).

La gran importancia de las ciudades intermedias radica en la idea de que esta trasciende la dimensión física, base tradicional

del concepto de ciudad media o mediana (Bellet & Llop, 2004); se trata de entender la ciudad a partir de las funciones que desarrolla, el papel que tiene en la mediación de flujos (bienes, información, innovación, administración, etc.) entre los territorios rurales y urbanos de su área de influencia y los otros centros o áreas, más o menos alejados (Bellet et al. 2004).

Sistemas de Información Geográfica (SIG) una herramienta para medir la proximidad a equipamientos

Lograr identificar el déficit de equipamientos en determinadas zonas es esencial para la toma de decisiones como aporte a la solución de problemas como la exclusión social y espacial, teniendo en cuenta que el logro de la equidad en la distribución de los equipamientos públicos urbanos es un objetivo primordial para los planificadores. Es así como en la literatura se encuentran estudios que abarcan por medio de SIG el estudio de: equidad espacial en la distribución y accesibilidad a equipamientos públicos (McDonald et al., 2009; Oh & Jeong, 2007; Partridge, Rickman, Ali, & Olfert, 2010; Ritsema Van Eck & De Jong, 1999; Talen & Anselin, 1998; Tsou, Hung, & Chang, 2005).

Así mismo, es de interés en el estudio de las ciudades intermedias por el rol espacial de estas ciudades y por su papel en el equilibrio territorial, que está relacionado con su capacidad de ofrecer un mínimo de equipamientos a la población. Llegar a medir las distancias de proximidad (Llop, 2010) a equipamientos mediante la visualización de su distribución en la ciudad, destaca a los SIG como una herramienta poderosa (Gar-On Yeh, 1991), porque mediante su utilización se pueden integrar y analizar bases de datos e información espacial.

La solución de problemas espaciales complejos como los problemas urbanos son una prioridad para este tipo de tecnología (Goodchild, 2009), más aun para aquellos sectores que requieren la gestión y análisis de la información espacial de una forma rápida y eficaz, como podría ser el caso de una ciudad intermedia de un país en desarrollo, en donde la adquisición de información procesada es escasa. Los SIG pueden entenderse como una “caja de experimentación” lo que permite al analista o al gestor territorial trabajar o plantearse diferentes escenarios virtuales (Bosque 1997) de una determinada región, para la ejecución de ciertas políticas o para poder seguir determinadas tendencias.

En la mayoría de las definiciones prevalece la operatividad de los SIG como en la que hace Burrough (Burrough, 1986, p. 6): “Conjunto de herramientas para reunir, almacenar [...], recuperar, transformar y representar datos espaciales del mundo real para un grupo particular de propósitos” o como la que hacen desde el National Center of Geographical Information Systems Applications in Developing Countries NCGIA en la cual definen los SIG como un sistema de hardware, software y procedimientos elaborados para facilitar la obtención, gestión, manipulación, análisis, modelado, representación y salida de datos espacialmente referenciados, para resolver problemas complejos de planificación y gestión (Mennecke & West Jr, 2001).

El interés en la distribución equitativa de los equipamientos públicos ha prevalecido desde los años 80 y 90 (Talen et al. 1998, Kirby et al. 1983, Jones et al. 1982). Hasta entonces no se había producido ningún mecanismo que pudiera integrar los resultados de proximidad a instalaciones públicas urbanas mediante un uso fácil para los planificadores. A falta de la posibilidad de una investigación espacial detallada, con la capacidad de procesamiento de datos o el apoyo en la literatura, la investigación empírica previa sobre la equidad espacial (Cingranelli 1981, Mladenka 1980) utilizaba índices agregados para comparar y analizar

grandes unidades espaciales de análisis, tales como ciudades y municipios.

En un intento por obtener resultados más precisos e impulsar la capacidad de procesamiento de datos espaciales se ha incrementado el interés en la definición, cálculo, interpretación y visualización de la accesibilidad en la literatura de análisis espacial y SIG (Talen et al. 1998, Partridge et al. 2010, McDonald et al. 2009, Oh et al. 2007, Tsou et al. 2005, Ritsema van Eck et al. 1999, Frost et al. 1995, Geertman et al. 1995, Arentze et al. 1994). Es así como en la literatura se encuentran estudios que abarcan por medio de SIG el estudio de: patrones temporales de crecimiento urbano, equidad espacial en la distribución y accesibilidad a equipamientos públicos.

Reconociendo la importancia de los SIG en la identificación de problemas urbanos de proximidad y accesibilidad y a partir de la literatura existente, este documento propone analizar la distribución de los equipamientos públicos de Manizales, ciudad intermedia andina con base en una perspectiva de análisis espacial. Manizales, es una ciudad intermedia colombiana que, por su topografía abrupta y montañosa, presenta problemas de desigualdad reflejados en la urbanización, por la falta de acceso a equipamientos y servicios. De acuerdo con la normativa, en la ciudad se han establecido los planes de ordenamiento y desarrollo correspondientes. No obstante, en la actualidad el crecimiento de la ciudad se enfrenta a conflictos como: segregación socioespacial, inequidad y pobreza. Estos problemas se mantienen vigentes a pesar de la aplicación de la normativa y de los planes y programas de desarrollo; aún se conservan las prácticas de urbanización en sitios inadecuados que generan comunidades altamente vulnerables, y serios impactos sobre el medio ambiente al privilegiar la necesidad de vivienda a costa de las reservas ambientales de la ciudad.

Metodología

A partir de un análisis multitemporal (Tabla 1), utilizando un mapa temático (raster) por períodos de años de la ciudad de Manizales, mediante el SIG (ArcView 10), se hizo un análisis de los equipamientos por periodos a partir de la información suministrada por la Alcaldía de Manizales (base cartográfica y perímetro urbano).

La identificación de los periodos históricos objeto de análisis obedeció a interpretaciones (Cifuentes-Ruiz, 2013), ya que no existen consolidados históricos que permitan determinar la evolución de la ciudad de Manizales a través de su historia.

Tabla 1. Periodos de crecimiento urbano analizados en Manizales

Número	Periodo	Años
1	Periodo 1884	1854-1884
2	Periodo 1924	1885-1924
3	Periodo 1935	1925-1935
4	Periodo 1949	1936-1949
5	Periodo 1966	1950-1966
6	Periodo 1979	1970-1979
7	Periodo 1999	1970-1979
8	Periodo 2003	1999-2003

Se consideró como área de estudio específica el perímetro urbano de Manizales del año 2003. Los datos espaciales se manejaron en formato raster, con tamaños de píxel de 10 metros por 10 metros. Lo anterior significa que el terreno se dividió en celdas cuadradas, y toda la información disponible, en mapas temáticos. Cada mapa constituye en realidad una matriz con los datos (un dato para cada celda) de cada factor, fácilmente exportable a otros formatos de archivo (como texto plano .txt, por ejemplo) para su análisis numérico. Conociendo las

dimensiones de cada celda, se obtuvo el área para cada período, se establecieron relaciones entre el aumento del área construida y el incremento de la población.

Mapas Vectoriales de equipamientos por años

A partir de la información recopilada se lograron mapificar en el ArcView 10 los tipos de equipamientos (Tabla 2) que se consideraron fundamentales para el crecimiento de Manizales (Cifuentes-Ruiz, 2009).

Tabla 2. Listado de equipamientos estudiados por años

Nº	Tipos Equipamientos	Año inicial	Año final
1	Equipamientos Educativos	1924	2003
2	Equipamientos de Salud	1924	2003
3	Equipamientos	1935	2003
4	Culturales Parques	1884	2003
5	Equipamientos Administrativos	1884	2003
6	Universidades	1949	2003
7	Equipamientos Industriales	1935	2003
8	Equipamientos de Transporte	1924	2003
9	Vías	1884	2003
10	Ferrocarriles	1935	1949

Después de tener identificados los equipamientos por años, se elaboraron los mapas correspondientes. A continuación, se muestra un ejemplo para el año 2003 (Figura 1) del análisis de equipamientos realizado por medio del SIG, los cuales se representan en un mapa vectorial.

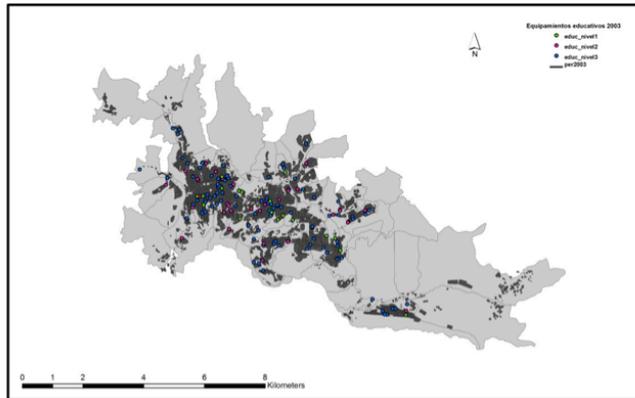


Figura 1. Mapa de equipamientos educativos 2003

Proximidad a Equipamiento

Después de tener los mapas vectoriales de equipamientos y su distribución en la ciudad, por medio del SIG se calcularon las distancias a dichos equipamientos, para explicar los mapas calculados se muestra como ejemplo los equipamientos Educativos (Figura 5), con los resultados de estos cálculos y con la capa de los barrios de la ciudad, se identificaron cuáles barrios tienen más accesibilidad a cada equipamiento y así mismo, cuáles se encuentran más alejados.

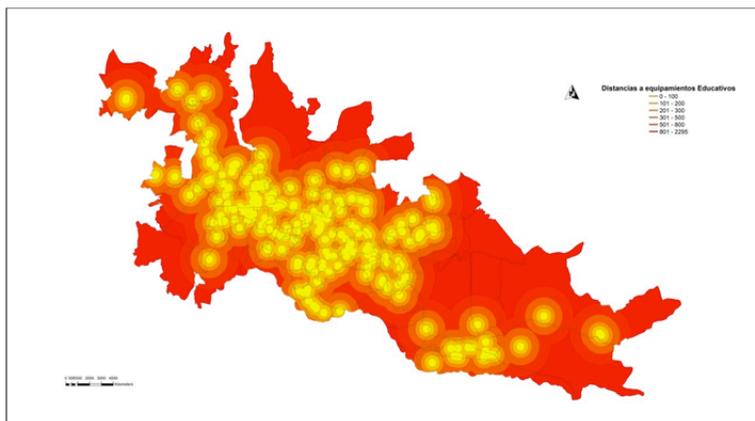


Figura 2. Ejemplo proximidad a equipamientos educativos 2003

Los criterios para determinar los radios de distancia de cada equipamiento (Tabla 4) fueron establecidos de acuerdo a las distancias establecidas a partir del Damero en las Leyes de Indias (manzanas de 100mX100m) esta fue la trama inicial de la ciudad, la frecuencia en el uso del equipamiento, la cobertura o tipo de persona que lo utiliza: por ejemplo, los jardines infantiles, las escuelas de primaria (equipamientos educativos nivel 1 y 2), de cobertura a escala de vecindario o barrio requieren mayor proximidad que los colegios (equipamientos educativos nivel 3) o las universidades. Así mismo los radios de proximidad de los parques utilizados por niños y ancianos requieren mayor proximidad que otros equipamientos como los administrativos.

Equipamiento	Distancias recomendadas	Equipamiento	Distancias recomendadas
Educativos	0-100	Universidades	0-200
	101-200		201-400
	201-300		401-600
	301-500		601-800
	501-800		801-1000
	801-2295		1001-4507
Salud	0-200	Industriales	0-1000
	201-400		1001-2000
	401-600		2001-3000
	601-1000		3001-4000
	1001-5959		4001-6096
Culturales	0-100	Transporte	0-100
	101-300		101-200
	301-500		201-300
	501-800		301-500
	801-1000		501-1000
	1001-2000		1001-2927
Parques	0-100	Vías	0-100
	101-300		101-200
	301-500		201-300
	501-1000		301-500
	1001-3048		501-1000
Administrativos	0-500	Ferrocarriles	1001-2927
	501-1000		0-300
	1001-2000		301-1000
	2001-3000		1001-3001
	3001-5000		3001-6000
	5001-7000		6001-9280
	7001-9000		
	9001-11443		

Tabla 3. Distancias recomendadas a equipamientos

Cálculo de centroides de los barrios

Se calcularon los centroides (Figura 3) de los polígonos que componen cada barrio (o distrito, o su equivalente).

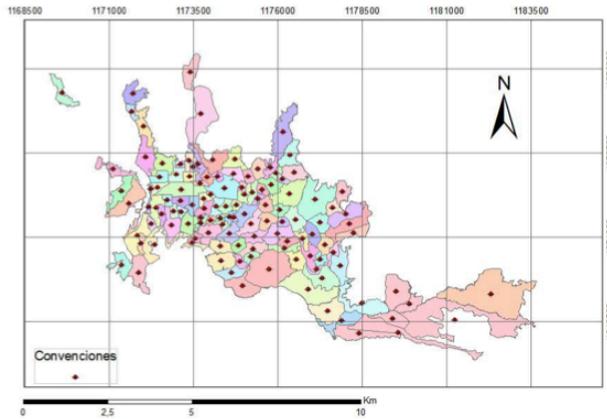


Figura 3. Cálculo de centroides de barrios

Distancia a equipamiento

A partir de la ubicación de los equipamientos, se calcula la distancia de los diferentes puntos de la ciudad a los mismos.

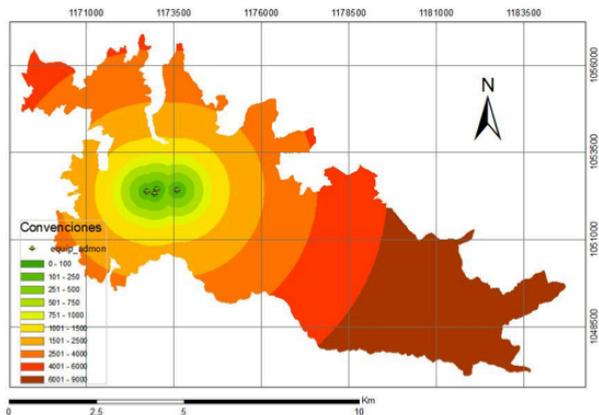


Figura 4. Cálculo de distancias a equipamientos administrativos

Para cada uno de los equipamientos estudiados por periodos históricos, se pudieron conocer los primeros equipamientos de cada tipo (Educativos, de Salud, Administrativos, etc.) y se hizo su clasificación de acuerdo a la tipología correspondiente. Teniendo la información de los equipamientos educativos suministrada por la Alcaldía de Manizales, esta se desagregó para los años mencionados y se clasificó por niveles 1, 2 y 3 de acuerdo a la Tabla 4. Para la clasificación de los equipamientos educativos se tuvieron en cuenta: guarderías, jardines infantiles, escuelas y colegios.

Tabla 4. Equipamientos Educativos de Manizales 2003

Tipo de Equipamiento Educativo	Nivel de Equipamiento	Cantidad	Cobertura
Guarderías y jardines infantiles	Equipamientos Educativos Nivel 1	44	Barrio
Centros educativos y primaria	Equipamientos Educativos Nivel 2	62	Comuna
Centros educativos secundarios	Equipamientos Educativos Nivel 3	118	Municipio

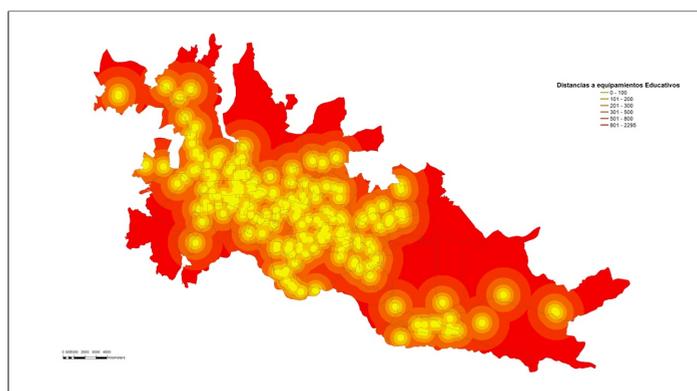


Figura 5. Ejemplo Proximidad a Equipamientos Educativos 2003

Distancias de Barrios a Equipamientos

Mediante el cruce de los mapas 4 y 5 es posible obtener la distancia de cada centroide al equipamiento administrativo más cercano.

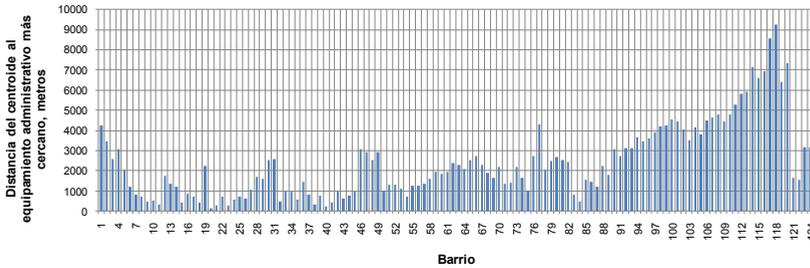


Figura 6. Distancia del centroide de cada barrio al equipamiento administrativo más cercano

Ordenando los valores de menor a menor se obtiene:

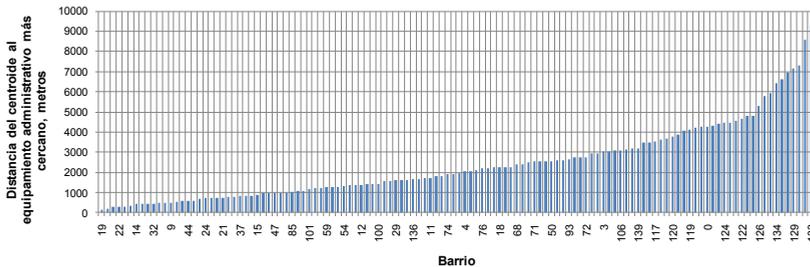


Figura 7. Distancia del centroide de cada barrio al equipamiento administrativo más cercano (orden ascendente)

Propuesta de un Índice de Proximidad

Con lo anterior es posible proponer un índice que mida la concentración de distancias para todo el municipio (Índice de Proximidad IPR), similar al índice de GINI que se obtiene de la curva de Lorenz para medir la distribución del ingreso.

El valor de este índice varía entre 0,5 que significa distribución uniforme (todos los barrios se encuentran a igual distancia de los equipamientos), y 1,0 que significa alta concentración (pocos barrios acumulan las mayores distancias a equipamientos).

$$IPR = \frac{\sum_{i=1}^{M-1} q_i}{2 \sum_{i=1}^{M-1} p_i} \quad (1)$$

donde

$$q_i = \frac{Z_i}{Z_M} \quad (2)$$

cuyos valores se obtienen de las ecuaciones 3,

$$Z_i = \sum_{j=1}^i dist_j barr_j \quad y \quad Z_M = \sum_{j=1}^M dist_j barr_j \quad (3)$$

previo ordenamiento de los valores de $dist_j$ en forma descendente, manteniendo la correspondencia con el respectivo barrio $barr_j$, y

$$p_i = \frac{N_i}{N_M} \quad (4)$$

que es la relación que resulta de la posición del barrio con respecto al total de barrios de la ciudad. La Figura 8 presenta el cálculo de este índice para la proximidad a equipamientos administrativos de los diferentes barrios (sus centroides) de una ciudad.

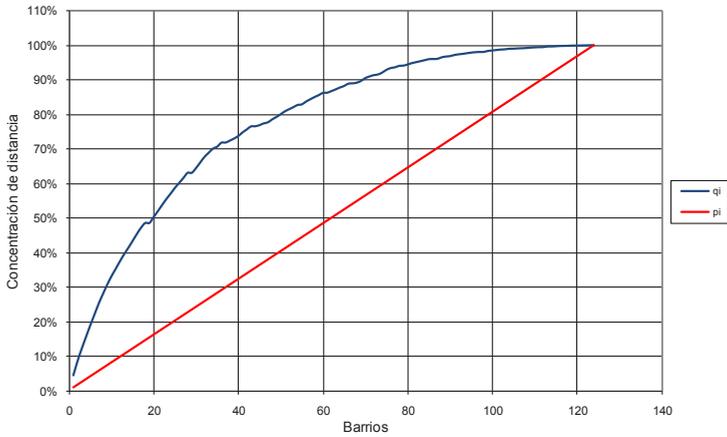


Figura 8. Ejemplo del cálculo del Índice de Proximidad a equipamientos administrativos

En este caso, el valor del índice es $IPR=0,77$

La formulación de estos índices tiene especial interés porque permite comparar de manera razonable ciudades de diferentes tamaños.

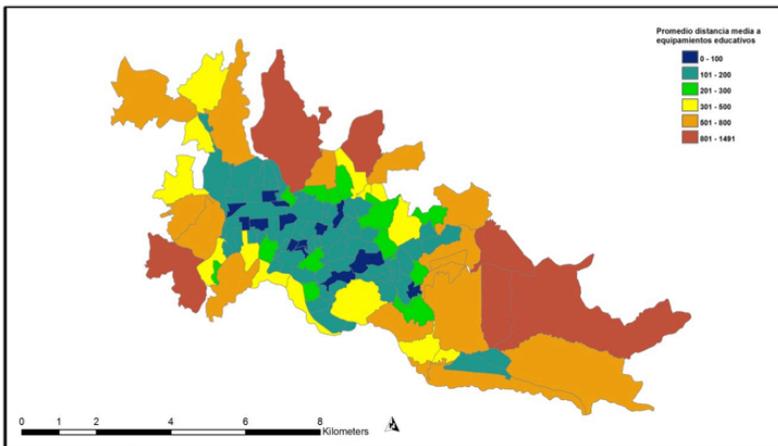


Figura 9. Ejemplo Promedio distancia media de Equipamientos Educativos por barrio 2003. Fuente: elaboración propia

Conclusiones

Las dinámicas de crecimiento en ciudades intermedias evidencian que han sido estimuladas por la localización de equipamientos, pues a través de los años estos han ido generando nodos de tensión hacia los cuales se han incrementado los asentamientos y se han ido definiendo nuevas zonas de crecimiento de la ciudad. Determinar espacialmente la cobertura de equipamientos en una ciudad a partir de la medición de distancias de proximidad a dichos equipamientos resulta de gran ayuda para los tomadores de decisiones de la ciudad, para conocer los sectores de la ciudad que se encuentran segregados, y para contribuir en la toma de medidas de mejoramiento para la accesibilidad a dichos equipamientos y la focalización de proyectos comunitarios específicos basados en la inclusión urbana de los sectores más necesitados.

Conocer en detalle espacial las necesidades de la comunidad, permite mejorar el desempeño, más eficiente y basado en la realidad, de la ciudad, de los tomadores de decisiones y de la administración local.

A partir de la medición de proximidad a los equipamientos, se ha evidenciado que algunos sectores de la ciudad poseen menor cobertura y accesibilidad a los mismos, principalmente en zonas periféricas. Se requiere la implementación de políticas de participación ciudadana en la toma de decisiones de la ciudad para conocer de primera mano las necesidades reales de la comunidad y así proponer soluciones eficaces.

La proximidad a los equipamientos contribuye a definir el nivel de compacidad de la ciudad, así mismo, se considera útil para determinar niveles de desigualdad urbana y segregación socioespacial.

Teniendo en cuenta el derecho a la ciudad promulgado en Hábitat III, se busca que a medida que se conforman los asentamientos humanos, estos puedan tener acceso a equipamientos.

Se observa que gran parte de los barrios de la ciudad presentan un mejoramiento en su proximidad a los equipamientos estudiados. Sin embargo, estos equipamientos en su mayoría, demuestran una dispersión en el territorio pues los índices disminuyen en el año 2003; excepto los parques que registran una mayor concentración en la ciudad en relación al crecimiento de la misma. De igual manera, se destacan los equipamientos de transporte, los cuales presentan deficiencias en el cubrimiento de paradas de autobús frente al aumento de barrios a los cuales no llega este servicio.

Por el contrario, la construcción de vías aumentó entre el año 1999 y el 2003, esto se refleja en la disminución del índice de proximidad para estos equipamientos y para los equipamientos educativos y las universidades los cuales aumentan su dispersión en la ciudad para el año 2003.

Referencias

- Agbenyo, F., Marshall Nunbogu, A., & Dongzagla, A. (2017). Accessibility mapping of health facilities in rural Ghana. *Journal of Transport and Health*, 6(April), 73–83. <https://doi.org/10.1016/j.jth.2017.04.010>
- Bellet, Carme; Llop, J.-M. (2000). Documento 4 - Ciudades intermedias y urbanización mundial. Presentación del Programa de Trabajo de la Unión Internacional de Arquitectos (UIA). In Milenio (Ed.), *Ciudades intermedias. Urbanización y sostenibilidad*. Barcelona. Recuperado de <http://www.ceut.udl.cat/wp-content/uploads/D4.pdf>
- Bellet, C., & Llop, J. M. (2004). *Miradas a Otros Espacios Urbanos: Las ciudades intermedias*. Scripta Nova.
- Bolay, J. C., & Rabinovich, A. (2004). Intermediate cities in Latin America risk and opportunities of coherent urban development. *Cities*, 21(5), 407–421. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2004.07.007>
- Burrough, P. A. (1986). *Principles of geographical information systems for land resources assessment*. Oxford: Oxford University Press.
- Chen, J., Ni, J., Xi, C., Li, S., & Wang, J. (2017). Determining intra-urban spatial accessibility disparities in multimodal public transport networks. *Journal of Transport Geography*, 65(November), 123–133. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2017.10.015>
- Cifuentes-Ruiz, P. A. (2009). Modelización de los factores de crecimiento urbano como aporte a la sostenibilidad. Estudio de caso: Manizales – Colombia. *RevistaSTH*, (4), 81–96. Recuperado de http://www.urv.cat/media/upload/arxiu/catedra-desenvolupament-sostenible/InformesVIP/unesco_-_revista_ds_unesco_2009.pdf

- Cifuentes-Ruiz, P. A. (2013). La modelización como herramienta para el análisis urbano de las ciudades intermedias. Estudio de caso usando sistemas de información geográfica en Manizales, Colombia. Politénica de Catalunya. Retrieved from <https://www.tdx.cat/handle/10803/129849>
- Combs, T. S. (2017). Examining changes in travel patterns among lower wealth households after BRT investment in Bogotá, Colombia. *Journal of Transport Geography*, 60, 11–20. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2017.02.004>
- Dai, T. qi, Liu, Z. bing, Liao, C., & Cai, H. yu. (2018). Incorporating job diversity preference into measuring job accessibility. *Cities*, 78(October 2017), 108–115. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2018.02.003>
- Di Virgilio, M.-M. (2011). La movilidad residencial: una preocupación sociológica. *Territorios*, 25, 173–190.
- Gar-On Yeh, A. (1991). The development and applications of geographic information systems for urban and regional planning in the developing countries. *International Journal of Geographical Information Systems*, 5(1), 5–27. <https://doi.org/10.1080/02693799108927828>
- Geurs, K. T., & van Wee, B. (2004). Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: Review and research directions. *Journal of Transport Geography*, 12(2), 127–140. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2003.10.005>
- Gledhill, J., & Hita, M. G. (2014). ¿Las redes de organización popular aún pueden cambiar la ciudad? El caso de Salvador, Bahía, Brasil. *Ciudades latinoamericanas: desigualdad, segregación y tolerancia*.
- Goodchild, M. F. (2009). Geographic information systems and science: today and tomorrow. *Procedia Earth and Planetary Science*, 1(1), 1037–1043. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2009.09.160>

- Guzman, L. A., & Bocarejo, J. P. (2017). Urban form and spatial urban equity in Bogota, Colombia. *Transportation Research Procedia*, 25, 4495–4510. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.345>
- Harvey, D. (2012). *Ciudades rebeldes: Del derecho de la ciudad a la revolución urbana*. City. <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>
- Lefebvre, H. (1968). *Le Droit à la ville*. (Anthropos, Ed.) (2nd ed.). Paris: Editorial du Seuil, Collection "Points".
- Llop, J.; Bellet, C. (1999). *Intermediate Cities and World Urbanisation*.
- Llop, J. M. (2010). Medir la sostenibilidad urbana a escalas intermedias: Compacidad-proximidad y habitabilidad-accesibilidad. *Sostenible?*, 11, 56–57.
- Llop Torné, J. M., & Hoeflich de Duque, S. (2010). *Ciudades intermedias*, 58. [https://doi.org/10.1016/S0141-0229\(03\)00220-5.L](https://doi.org/10.1016/S0141-0229(03)00220-5.L)
- McDonald, R. I., Forman, R. T. T., Kareiva, P., Neugarten, R., Salzer, D., & Fisher, J. (2009). Urban effects, distance, and protected areas in an urbanizing world. *Landscape and Urban Planning*, 93(1), 63–75. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2009.06.002>
- McGrail, M. R., & Humphreys, J. S. (2014). Measuring spatial accessibility to primary health care services: Utilising dynamic catchment sizes. *Applied Geography*, 54, 182–188. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.08.005>
- Mennecke, B. E., & West Jr, L. A. (2001). Geographic Information Systems in developing countries: issues in data collection, implementation and management. *Journal of Global Information Management (JGIM)*, 9(4), 44–54. <https://doi.org/10.4018/jgim.2001100103.This>
- Oh, K., & Jeong, S. (2007). Assessing the spatial distribution of urban parks using GIS. *Landscape and Urban Planning*, 82(1–2), 25–32. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2007.01.014>

ONU-Hábitat. (2012). Planificación y diseño. Retrieved July 25, 2018, from <https://es.unhabitat.org/temas-urbanos/planificacion-y-disenho/>

Partridge, M. D., Rickman, D. S., Ali, K., & Olfert, M. R. (2010). Recent spatial growth dynamics in wages and housing costs: Proximity to urban production externalities and consumer amenities. *Regional Science and Urban Economics*, 40(6), 440–452. <https://doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2010.05.003>

Pinkster, F. (2007). Localised social networks, socialisation and social mobility in a low-income neighbourhood in the Netherlands. *Urban Studies*, 44(13), 2587–2603. <https://doi.org/10.1080/00420980701558384>

Ritsema Van Eck, J. R., & De Jong, T. (1999). Accessibility analysis and spatial competition effects in the context of GIS. *Computers, Environment and Urban Systems*, 23, 75–89. [https://doi.org/10.1016/S0198-9715\(99\)00016-2](https://doi.org/10.1016/S0198-9715(99)00016-2)

Rosero-Bixby, L. (2004). Spatial access to health care in Costa Rica and its equity: A GIS-based study. *Social Science and Medicine*, 58(7), 1271–1284. [https://doi.org/10.1016/S0277-9536\(03\)00322-8](https://doi.org/10.1016/S0277-9536(03)00322-8)

Sabatini, F., Cáceres, G., & Cerda, J. (2001). Segregación residencial en las principales ciudades chilenas: Tendencias de las tres últimas décadas y posibles cursos de acción [Residential segregation in the main Chilean cities: Trends during the last three decades and possible courses of action]. *Revista Eure*, XXVIII(82), 21–42. <https://doi.org/10.4067/S0250-71612001008200002>

Salazar-Cruz, C.-E. (1999). Espacio y vida cotidiana en la ciudad de México. (Centro de Estudios Demográficos y de Desarrollo Urbano, Ed.). México D.F.: El Colegio de México.

Talen, E., & Anselin, L. (1998). Assessing spatial equity: An evaluation of measures of accessibility to public playgrounds. *Environment and Planning A*, 30(4), 595–613. <https://doi.org/10.1068/a300595>

- Tsou, K. W., Hung, Y. T., & Chang, Y. L. (2005). An accessibility-based integrated measure of relative spatial equity in urban public facilities. *Cities*, 22(6), 424–435. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2005.07.004>
- Union Internacionale des Architectes. (1999). Declaración De Lleida Sobre Las Ciudades Intermedias Y La Urbanización Mundial, 3–6.
- United Nations. (2018). Una población en crecimiento. Retrieved July 30, 2018, from <http://www.un.org/es/sections/issues-depth/population/index.html>
- Yin, C., He, Q., Liu, Y., Chen, W., & Gao, Y. (2018). Inequality of public health and its role in spatial accessibility to medical facilities in China. *Applied Geography*, 92(January), 50–62. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2018.01.011>

USO DE MATERIALES ALTERNATIVOS PARA CONSTRUCCIONES SOSTENIBLES

*Efrain Casadiego-Quintero y
Andres Giovany Gutierrez Bayona¹⁴*

Cada vez más aumenta la demanda de materiales de construcción, lo cual conlleva a que los últimos años también haya aumentado la sobre explotación de canteras que cambian el paisaje, generan zonas en riesgo de deslizamientos y deforestación que terminan dañando algunos acuíferos. También han aumentado en menos proporción la explotación de material pétreo de los afluentes, que puede generar daños ambientales y erosión.

Colombia presenta una amplia variación de suelos y geomorfología, que se han visto afectados por la explotación excesiva de recursos no renovables como el suelo. Por esta razón institutos como el IDEAM, han realizado monitoreos a partir de los cuales se ha podido observar el daño a las capas superiores de suelo que generan la incapacidad de la tierra para cultivos y/o las funciones ecológicas originales (Sánchez, et al., 2012). La explotación continua de los suelos y el daño a las fuentes hídricas han generado desertificación en algunas zonas del país como lo que se está viendo actualmente en el Amazonas (UNCCD, 2005).

14 Fundación Universitaria Agraria de Colombia / casadiego.efrain@uniagraria.edu.co

Estos suelos se vuelven infértiles para cultivar y su recuperación puede tardar varias décadas. Los bosques también son barreras naturales para movimientos de masa, y además contribuyen con la estabilización de los terrenos y la absorción del agua subterránea ayudado a que los niveles de las aguas superficiales no suban tan bruscamente; la deforestación podría ser una de las causas de las súbitas inundaciones de Mocoa en Colombia (Cardona, 2017).

¿Qué son residuos estériles de minería?

Son los residuos que se originan durante las actividades mineras a pequeña o gran escala, para que el oro sea rentable se propone que se puede obtener 12 gramos por tonelada (gpt). Los residuos estériles son procedentes de las etapas de prospección, extracción y almacenamiento de recursos minerales, pudiendo ser sólidos o líquidos. Este estéril de mina es todo material sin valor económico extraído para permitir la explotación del mineral útil, la granulometría de estos residuos varía desde tamaño arcilla hasta bloques de 20 a 40 cm.

En el caso de la minería de oro los residuos estériles son las rocas encajantes que rodean los filones o roca ígnea intrusiva. El oro se encuentra en filones de cuarzo o vetas madre desde parte por millón, hasta generalmente, y muy rara vez, aglutinado (pepita de oro), comúnmente contenido en sulfuros básicos metálicos (Oyarzun, 2011; Indepaz, 2012). Por esta razón, se hace un trabajo de exploración previo a la producción con el fin de encontrar la roca con el mayor contenido de oro, pero aun así la mayor parte del material extraído pasa ser residuo estéril. En las minas estudiadas en Vetas-Santander, nororiente de Colombia, se producen más de 10 toneladas diarias de residuos estériles. Los residuos gruesos tamaño bloques (mayores a 20 cm) son apilados en laderas de alta pendiente como gaviones, pero esto

genera inestabilidad en el terreno y riesgo de deslizamientos (Figura 1). En la Figura 1 se observa cómo el apilamiento de carga en el talud, generó deslizamiento del material acumulado.

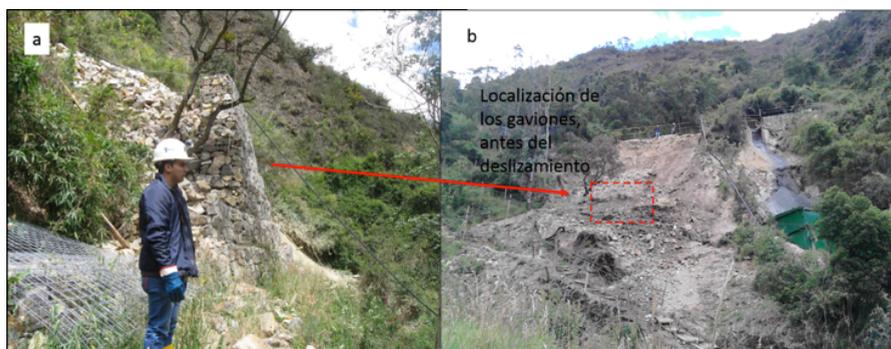


Figura 1. a) Apilamiento de material grueso en gaviones.
b) Deslizamiento por sobre carga del talud.

El material fino, cuyo tamaño oscila desde arcilla hasta arena media, que se forma después de la trituración y molienda de los bloques, es lavado y utilizado para extraer el oro. De estos sedimentos finos solo el 1% tiene alta probabilidad de contener oro económicamente rentable, el 20% del sedimento tamaño arena no alcanza las concentraciones necesarias para generar rentabilidad, por ellos es empacado en costales y vendido a terceros con mejor tecnología para la extracción. El porcentaje restante es separado por un proceso hidráulico y gran parte del sedimento tamaño arena es acumulado; mientras los limos y arcillas son llevados a un tanque y posteriormente vertidos en la quebrada (Figura 2).



Figura 2. Vertimiento de sedimento fino a fuentes hídricas.

Los filones contienen partículas del oro que están unidas con las de cuarzo, por eso gran parte de la composición de los residuos estériles finos son minerales de cuarzo, mineral con buena resistencia mecánica y química, resistente a las alteraciones.

Para poder utilizar los residuos estériles como agregados de construcción es necesario que el material esté libre de químicos utilizados habitualmente para la extracción, como cianuro y mercurio, dado que estas sustancias conllevan a enfermedades al personal que los manipula y pueden generar reacciones químicas si son mezcladas con otros agregados como el cemento o la cal. Las minas donde se hacen los estudios se caracterizan por no usar estos químicos y por aplicar una minería sostenible que utilice la innovación como herramienta de extracción.

Conceptualización sobre la normatividad

A partir del 2015 se han propuesto normas para minería segura y sostenible (Tranchard, 2015), como las propuestas por el comité

International Organization for Standardization que propone la norma ISO/TC 82/SC 7 para proponer estándares internacionales que pueden ayudar a minimizar el daño potencial a largo plazo de las actividades mineras. Con este tipo de normas se espera ayudar a las empresas mineras a desarrollar minería sostenible y a incrementar la vigilancia sobre el daño ambiental y a las poblaciones vecinas. Colombia por medio de pilares de política y líneas estratégicas (Ministerio de Minas, 2016), busca generar leyes que ayuden a controlar el cuidado del medio ambiente e incentiven la minería sostenible, como lo expuesto en la Ley 1658 de julio de 2013, que propone erradicar el uso de mercurio para la extracción de oro.

El apoyo que brindan las universidades y centros de investigación consiste en mejorar los procesos de producción a partir de la formulación de métodos técnicos y de innovación que incentiven el no uso de químicos como el cianuro y el mercurio. Las empresas que han cambiado el sistema de extracción usan nuevas tecnologías sin dejar de utilizar métodos ancestrales como el bateo; aunque ya se utilicen en menor proporción los químicos para extracción, se siguen generando una gran cantidad de sedimentos que son acumulados de manera insegura o vertidos en las fuentes hídricas, aumentando la erosión de los cauces y oxidación de los minerales que componen las rocas de donde se extrae el oro (Casadiego, et al, 2017).

Se ha estado estudiando la recuperación de los sedimentos considerados como residuos estériles de minería y su aprovechamiento como agregados de construcción. Para eso, se hace un muestreo de las diferentes granulometrías y teniendo en cuenta la normatividad se propone un uso específico o se descarta su utilización. Las normas utilizadas para la caracterización de los materiales se presentan a continuación:

En el caso de material para **afirmado**, estos deberán cumplir con las especificaciones de acuerdo a las tablas 311-1, 311-2 y 311-3 del Artículo 311, Capítulo 3 de Normas y Especificaciones INVIAS 2013.

Los materiales agregados para **base y sub-base** granular deberán cumplir los requisitos de calidad de dureza, durabilidad, limpieza y resistencia del material indicados en las tablas 320-2 de las normas y especificaciones INVIAS 2013. Además, deberá ajustarse a las franjas granulométricas de la tabla 320-3 y de la tabla 330-3 del artículo 320 del capítulo 3 de las normas y especificaciones INVIAS 2013.

Los materiales para pavimentos de concreto hidráulico, como agregados finos, deberán cumplir los requisitos de calidad de durabilidad, limpieza y absorción del material indicados en las tablas 505-1y 500-2 de las normas y especificaciones INVIAS 2013. Además, deberá ajustarse a las franjas granulométricas de la tabla 500-3 del artículo 500 del capítulo 5 de las normas y especificaciones INVIAS 2013 (Herrera y Villanueva, 2016).

El ensayo de granulometría determina cuantitativamente la distribución de los tamaños de las partículas de un suelo, la cual se estipula por medio del proceso de tamizado y se realiza bajo la norma I.N.V. E – 123 – 13 para determinación de los tamaños de las partículas de los suelos. El ensayo de la degradación de un agregado pétreo con una composición granulométrica definida, es el resultado de una combinación de acciones que incluye abrasión, impacto y molienda, y se utiliza la norma I.N.V. E – 218 – 13 que estipula el método que se debe seguir para medir la resistencia a la degradación de los agregados gruesos de tamaño menor a 37,5 mm (1½") por medio de la máquina de Los Ángeles. Además, utilizar la norma I.N.V. E – 238 – 13 estipula el procedimiento que debe seguir para medir la resistencia a la abrasión de una muestra de agregado grueso utilizando el aparato Micro-Deval.

También se realizó análisis petrográfico a las muestras gruesas utilizando un microscopio petrográfico de luz transmitida marca Carl Zeiss modelo Axioplan y realizando el conteo estadístico de 300 puntos, siguiendo el modelo de clasificación sugerido por diagramas ternarios de Folk, 1964, 1974 (Boggs, 2009).

Características y propiedades de los Agregados de minería para construcción

Una vez obtenidas las muestras de cada tamaño de agregado desde fino a grueso, se llevan al laboratorio para aplicarle las pruebas especificadas por INVIAS. En el caso de los residuos estériles de minería de oro se obtuvieron buenos resultados debido a que del 50-60% de la mineralogía de los Gneis pertenece a cuarzo (Figura 3).

El análisis óptico del material fino con un microscopio binocular, muestra que la mayoría de granos que quedan después del lavado es cuarzo tamaño fino a medio, de forma subredondeada a subangulares, (Tabla 1), el porcentaje de arcilla es bajo porque es lavado y vertido. El cuarzo (SiO_2) es un mineral de buena resistencia química, que no se altera fácilmente, y alta resistencia mecánica.

Muestra	Descripción	%Arcillas	%Cuarzo	%Feldespato K	Otros
1	Arena con Limo	5	85	5	5
2	Arena	0	87	8	5
3	Lodo	5	85	5	5

Tabla 1. Composición mineralógica, descripción óptica.

El análisis en la caracterización mineralógica confirma la presencia de cuarzo primario, feldespato potásico que presenta alteración argílica formando caolinita, plagioclasas tipo albita ($6\text{SiO}_2\text{Al}_2\text{O}_3\text{Na}_2\text{O}$) que se altera formando sericita, hornblenda, mica biotita que se encuentra parcialmente alterada (Figura 3a). También se observaron minerales opacos identificados

principalmente como piritita (FeS_2), en menos proporción calcopirita, hematita y epidota $\text{Ca}_2(\text{Al,Fe})_3(\text{SiO}_4)_3(\text{OH})$ en cantidades traza. Los cristales prismáticos de plagioclasas presentan maclado polisintético (Figura 3b), y las micas son prismas de forma alargada.

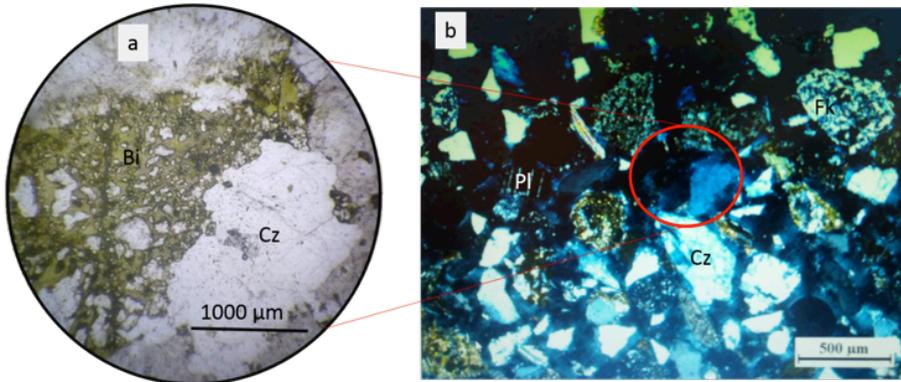


Figura 3. Petrografía de muestra de gneis. a) muestra en nicols paralelos; b) minerología en nicols cruzados.

El análisis granulométrico clasifica las muestras trituradas tamaño arena según SUCS como arenas con gravas, mal graduadas con pocos finos o sin ellos, y según AASTHO con predominancia arena fina (Figura 4). En general el material es resistente a la abrasión y la degradación. Los minerales que presentan alteraciones o caolinitización se fracturan en partes más pequeñas y terminan siendo lavados y vertidos.

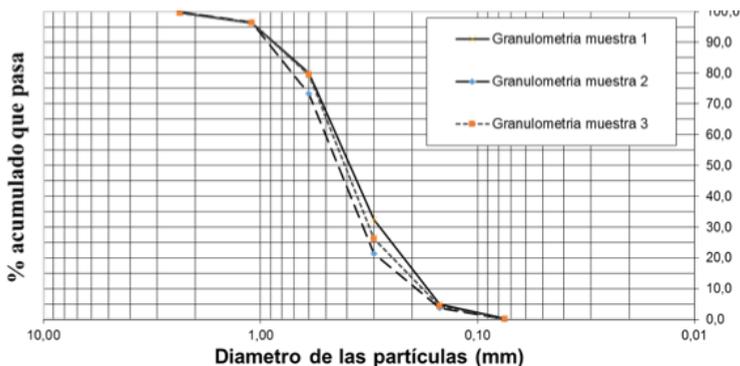


Figura 4. Curva granulométrica de arena. Modificado de (Herrera y Villanueva, 2016).

Los resultados mineralógicos, de desgaste y degradación definen que las muestras se pueden utilizar como agregados para base o sub-bases granulares, también para construcción afirmados y agregado grueso para pavimento de concreto hidráulico.

Otros Materiales Alternativos

Este tipo de pruebas se realizó también para residuos estériles de minería de carbón y de esmeralda, la escoria de estos materiales es vertida en los ríos o acumulados, en el caso del estéril de carbón las partículas de cenizas que desprende genera enfermedades pulmonares. Para saber si los residuos estériles cumplen con la norma INVIAS para los residuos de carbón se les hacen pruebas como el contenido de cenizas, materia volátil y poder calorífico para su clasificación, de esta forma se puede concluir si aún es útil o se puede utilizar como agregado para base; a los residuos de esmeraldas se les realizan las mismas pruebas que al residuo de la minería de oro, debido a que su proveniencia es similar; son rocas que pueden contener alto contenido de cuarzo hidrotermal.

Conclusiones

Al usar los residuos estériles de minería se puede disminuir el uso de agregado proveniente de canteras, se incentiva a las empresas mineras a innovar en la producción sin necesidad de que utilicen químicos como cianuro y mercurio. También se utiliza el material que puede terminar vertido en los ríos o acumulado en laderas que generan deslizamientos y daño a los suelos.

Con las diferentes pruebas realizadas a los residuos se puede concluir que la roca estéril, como gravas, son apropiadas según las especificaciones del Instituto Nacional de Vías, para adoptarlo como un agregado para la fabricación de afirmados de acuerdo a la tabla 311-1 requisitos para los agregados para afirmados, Sub-base granular, cumpliendo con los tres tipos de tránsito de acuerdo a la tabla 320-2; requisitos de los agregados para sub-bases granulares, bases granulares de tipo B y C de acuerdo a la tabla 330-2; requisitos de los agregados para bases granulares; agregado grueso para pavimentos de concreto hidráulico de acuerdo a la tabla 500-4 y agregado grueso para bases de concreto hidráulico de acuerdo a la tabla 505-2 según las especificaciones del Instituto Nacional de Vías.

Se debe apoyar a las empresas para que cada vez mejoren su producción con menos impacto al ambiente y estudiar los residuos estériles de otro tipo de minería como níquel o zinc.

Referencias

- Boggs, S. (2009). *Petrology of Sedimentary Rocks*. Cambridge University.
- Cardona, A. P. (2017). Hace 9 meses estudios advertían de tragedia en Mocoa. *Revista Semana*. Tomado de <https://sostenibilidad.semana.com/medio-ambiente/articulo/mocoa-corpoamazonia-advirtio-de-la-tragedia-por-deforestacion/37471>
- Casadiago Quintero, E., Gutiérrez Bayona, A., Herrera López, M., & Páez Rojas, M. (2017). Manejo estratégico de la producción de residuos estériles de minería sustentable, utilizando prácticas mineras eco-eficientes en Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 8(2), 107 - 118. doi:<http://dx.doi.org/10.22490/21456453.2035>
- Indepaz. (2012). *Minería: ¿Del Extractivismo a una Nueva Era?*
- Herrera, M.A. & Villanueva, M.L. (2016). Caracterización Físico Mecánica de los Residuos Estériles Extraídos de la Mina la Elsy Ubicada en el Municipio de Vetas- Santander con el Fin de Implementarlo como Agregado en Pavimentos y Concreto Hidráulico. Trabajo de Grado. Uniagraria. Bogotá D.C.
- Ministerio de Minas. (2016). *Política Minera de Colombia: Bases para la minería del futuro*. Colombia.
- UNCCD (2005). *Evaluación de la Degradación de Tierras en Zonas Secas*. Comité de Ciencia y Tecnología. Recuperado de United Nations Convention to Combat Desertification: <http://www.unccd.int/cop/officialdocs/cop7/pdf/cst8spa.pdf>.
- Sánchez López, R; Gómez Sánchez, C., Palacios Fernández, A., Otero García, J., Cocomá Arciniega, N., Bejarano Soto, M.C. (2012). Programa Nacional de Monitoreo y Seguimiento de la Degradación de Suelos y Tierras en Colombia. IDEAM.

Oyarzun, R. (2011). Introducción a la Geología de Minas. Ediciones GEMM. España.

Tranchard, S. (2015). Normas ISO para una minería segura y sostenible. ISO

RECURSOS HÍDRICOS EN COLOMBIA: DE LA DISPONIBILIDAD A LA ESCASEZ

Edgar Ricardo Monroy Vargas¹⁵
Cristina Yanneth Barón Hernández¹⁶

Colombia se enmarca en una diversidad de características hidrográficas que lo convierten en un país con potencialidad en recursos hídricos; en otras palabras, posee una riqueza de aguas superficiales y subterráneas, pero a pesar de ello, no es considerado como una fortaleza en el tema, por la desigualdad en la disponibilidad de los recursos hídricos y el manejo inadecuado de los mismos, con zonas donde la demanda es mayor a la disponibilidad existente y viceversa. Esta situación ha empujado hacia la escasez del agua, trayendo consigo múltiples complicaciones de orden social, económico y político, visible en la inadecuada distribución de la riqueza, indebida satisfacción de necesidades básicas y, un parsimonioso desarrollo sostenible.

El agua es un impulsor clave del desarrollo económico y social, teniendo a la par una función básica en el mantenimiento de la integridad del medio ambiente natural. Sin embargo, el agua es solo uno de varios recursos naturales vitales y es imperativo que los problemas del agua no se consideren de manera aislada (WHO y UNICEF 2013).

15 Ph. D. Universidad Piloto de Colombia.

16 Abogada. Mg. Investigadora. UniSangil, Colombia.

Los entes gubernamentales y el sector privado, tienen que tomar decisiones difíciles sobre la asignación de los recursos encaminados a la satisfacción del mínimo vital. Cada vez más tienen que distribuir provisiones decrecientes entre demandas cada vez mayores. Controladores como los cambios demográficos y climáticos aumentan aún más el estrés en los recursos hídricos.

La Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH), se acepta internacionalmente como una forma de otorgar desarrollo y gestión eficiente, equitativa y sostenible a los recursos hídricos que, para muchas poblaciones es limitado, pero para otros muchos países se ha convertido en un fenómeno de demandas y conflictos sociales.

A nivel mundial, 768 millones de personas carecen de acceso a una fuente de agua mejorada, y más del 80% de estas personas viven en zonas rurales (WHO y Unicef 2013). El acceso deficiente al agua se asocia con muchas enfermedades relacionadas con inseguridad alimentaria, la pérdida de productividad y mala asistencia escolar, especialmente para mujeres y niños.

Los problemas ambientales globales como la deforestación, el cambio climático y la contaminación, junto con el impacto de la pobreza extrema empeorada por la privatización y la mercantilización, son factores que contribuyen a la crisis del agua en muchas partes del mundo.

El acceso diario al agua limpia es necesario para satisfacer las necesidades básicas de beber, cocinar, lavarse y bañarse, es decir, los usos domésticos del agua. En las zonas rurales, el agua también es crítica para las actividades de subsistencia, como la horticultura y el riego de cultivos, la ganadería y las actividades comerciales a pequeña y gran escala. Estas actividades aumentan los ingresos de los hogares y la seguridad alimentaria.

También en las zonas urbanas el agua es necesaria para una variedad de medios de subsistencia (Kurian y McCarney 2010). Con la rápida urbanización, la agricultura urbana adquiere especial importancia (Zezza y Tasciotti, 2010): ya en la década de 1990, se calculaba que entre el 15 al 20% de los alimentos del mundo se producían en las zonas urbanas (Armar-Klemesu 2000).

Marco Normativo de la Gestión Integral del Recurso Hídrico en Colombia.

La Constitución Política de 1991 estableció derechos que buscaban satisfacer las necesidades básicas de la población, empezando por el tema de la reestructuración del esquema de protección del medio ambiente y el de la prestación de los servicios públicos domiciliarios como principio de obligatoriedad del Estado.

Nuevas leyes aparecieron a partir de dicha vigencia constitucional como fueron las leyes 142 y 143 de 1994, las cuales buscaban regular los servicios públicos domiciliarios en general. La ley 143 de 1994, abordaba específicamente el tema del sector eléctrico; por tanto, dichas acciones normativas constituyen fundamentalmente el paso de un régimen en el que el Estado poseía el monopolio de la prestación de los servicios públicos a un régimen de libertad de dicha prestación.

Se logró identificar con la puesta en marcha de estas leyes que los servicios públicos domiciliarios se encontraban en un círculo vicioso caracterizado por la mayoría de las empresas, en servicios ofrecidos con tarifas de orden insuficiente y elevado que vulneraban los derechos ciudadanos frente a la recuperación de los costos de la prestación. A su vez, ofreciendo y obteniendo unos recursos innecesarios para mejorar su calidad, por lo cual los usuarios, no se encontraban en disposición de aceptar alzas

en las tarifas, lo que fue concebido, como un efecto financieramente inviable que disminuyó la cobertura de dichos servicios frente a la población más vulnerable (Plata, 2008).

Uno de los aportes legislativos más importante en el campo de la gestión del agua es la que concierne al contenido del Código Nacional de Recursos Naturales, el cual busca fortalecer las políticas y programas que se venían desarrollando en el país y que se convirtieron en la base de los planes de ordenamiento de las cuencas hidrográficas, vista desde la implementación con alcance y finalidad, bajo las condiciones para priorizar y ordenar las competencias y el desarrollo de contenidos y definiciones para la ejecución y administración.

Con base en lo anterior, es importante llevar a cabo un recorrido normativo frente al tema, para dar respuesta a la evolución en este campo y a los aportes que cada uno de ellos trajo a la realidad del país. En primer lugar, con la aparición del Decreto 1449 de 1977, se buscó dar respuesta a un compendio de obligaciones frente a los propietarios de predios que salían beneficiados de aguas subterráneas y aguas superficiales, para que las mismas fueras aprovechadas al máximo y a su vez obtuvieran todas las garantías para ser explotadas adecuadamente y bajo los requerimientos medio ambientales.

Con base en el Decreto 1449, durante el siguiente año (1978), se vio la necesidad de llevar una educación clara y concreta a los colegios y universidades frente al tema del manejo de los recursos hídricos, la explotación de los mismos y lo beneficios que estos podrían otorgarle a la población en especial aquellas vulnerables que, por ubicarse en sitios de difícil acceso y con problemas de necesidades básicas insatisfechas, no podrían dar garantía de estos beneficios. Por tanto, la educación de la población le dio bases a esta ley y a los programas que generó. La población joven

accedió a una educación con un énfasis ecológico ambiental gracias a la puesta en marcha del Decreto 1337 de 1978 que buscaba la inclusión en la programación curricular para los niveles académicos tanto a nivel de básica, primaria, colegio, universidad; haciendo énfasis en componentes ecológicos, ambientales y de recursos renovables.

Durante el mismo año, surgieron en el país nuevos inconvenientes con el tema de las aguas no marítimas, lo que le permitió al gobierno nacional responder a unas necesidades básicas que ya habían sido estudiadas y analizadas en el Decreto 1449 de 1977, pero que no habían tenido asidero jurídico dentro de los estamentos gubernamentales y menos dentro de la población en general; por ello, bajo el Decreto 1541 de 1978, se buscó darle fuerza y fundamento práctico al libro II del decreto –Ley 2871 de 1974 en el que se estableció el tema concerniente a aguas no marítimas; del mismo modo, con este decreto se dio soporte a la ley 23 de 1973 por la cual se dictó el Código de Recursos Naturales y protección al medio ambiente y otras disposiciones.

Así mismo, durante el año 1979, nació la ley 9 por medio de la cual se le dio vida al Código Sanitario Nacional, y a través del cual se reglamentaron los procedimientos y medidas que llevaron a cabo la regulación y el control de vertimientos. Lo que significa esta ley para el país en dicha época es que se empezó a dar respuesta a las necesidades poblacionales y al despertar de un mundo encaminado a la preservación del medio ambiente, en especial lo que tiene que ver con los recursos hídricos, más allá de un fundamento netamente legislativo, la ley corrobora que se ha pasado el umbral de la teoría a la práctica.

Años más tarde, específicamente en el año 1981, el país se encontraba en el boom de la adquisición de tierras para el manejo de nuevas técnicas agropecuarias por lo cual se vio la necesidad

de apoyar dichas prácticas con el manejo de las cuencas hidrográficas del país, al identificarse irregularidades relacionadas con el manejo indiscriminado de contaminantes lanzados a las laderas de los ríos, la muerte de especies nativas de las regiones y al envenenamiento y contaminación de los recursos hídricos utilizados por la población para su consumo.

Pasaron varios años, para que el orden legislativo volviera a poner los ojos en lo que tenía que ver con los recursos hídricos. A partir de la ley 29 de 1990 se dispusieron unas acciones tendientes a llevar a cabo procesos de corte investigativo en el campo científico y de desarrollo tecnológico con énfasis en los recursos hídricos, pues se logró identificar que las leyes existentes frente al tema, aunque poseían los fundamentos legales soportados frente a las necesidades de la época, se quedaban cortas en un mundo industrializado que absorbía cada uno de los rincones del medio ambiente.

Después de la consagración de la constitución de 1991, surgió la ley 99 de 1993, por medio de la cual se crearon las autoridades ambientales regionales distribuidas en el territorio nacional y que en la actualidad son treinta y tres (33), las cuales se encargan de proteger el desarrollo sostenible. Dichas entidades presentan autonomía financiera, administrativa, patrimonio propio y personería jurídica y se encuentran encargadas de administrar el medio ambiente y los recursos naturales renovables, dentro de los que se encuentra el agua, de la mano de las políticas y disposiciones legales que encause el desarrollo de las políticas del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Lo anterior, con el objetivo primordial de dar respuesta a un proceso de descentralización que vivía el país para la época y a su vez, abarcar el mayor territorio posible para dar respuesta a las necesidades medio ambientales.

Como soporte y apoyo, la ley 99 del 93, alimenta la creación y puesta en marcha del Decreto 1600 de 1994 para reglamentar el Sistema Nacional Ambiental –SINA, con base en los Sistemas Nacionales de Investigación Ambiental y de Información Ambiental. Dicho servicio, logró descentralizar aún más el proceso medio ambiental y de recursos hídricos que el gobierno de la época buscaba establecer en cada una de las regiones con las CAR, pero a su vez, como mecanismo de control y auditoría frente a las problemáticas que se comenzaron a presentarse con la ley 99. De esta manera se tuvo mejor y más amplio control, especialmente en lo que tenía que ver con los recursos que se dispusieron para estos temas.

Una de las leyes más importantes de los noventa en lo que tiene que ver con el manejo del agua y los recursos hídricos, es la ley 373 de 1997 por medio de la cual se estableció el programa para el uso eficiente y ahorro del agua. Esta ley surgió a partir de la realidad nacional relacionada con el despilfarro del líquido vital, tanto por parte de la población como de las empresas. Esta situación, que no solo se vislumbró en la época a nivel nacional, sino ya comenzaba a cobrar fuerza a nivel mundial y en todos los estamentos de protección al medio ambiente.

Ley que más adelante se convirtió en la base de decretos y resoluciones como fueron la Resolución 769 de 2002, por el cual se dictaban disposiciones para contribuir a la protección, conservación y sostenibilidad de los páramos. Esta resolución fue modificada por la Resolución 140 y 839 de 2003 y 1128 de 2006, como también la Resolución 104 de 2003, resolución del IDEAM, a través de la cual se establecen los criterios de las cuencas hidrográficas del país; Decreto 1324 de 2007, por el cual se crea el Registro de Usuarios del Recurso hídrico; Decreto 1480 de 2007, por el cual se ordenan las actividades y el uso de suelo de las cuencas atendiendo las prioridades y el Decreto 1575 de

2007, por medio del cual se establece el sistema de protección y control de la calidad del agua para consumo humano. Del mismo modo la Resolución 1907 de 2013, por medio de la cual se expide la guía técnica para la formulación de los planes de manejo de cuencas hidrográficas y un decreto muy importante de los últimos años que es el Decreto 1076 de 2015, por medio del cual se expide el decreto único reglamentario del sector ambiente y desarrollo sostenible.

Finalmente, cabe mencionar que las leyes, resoluciones y decretos anteriormente señalados, establecieron un nuevo viraje en la búsqueda de mejorar el aporte respecto al apoyo, manejo, cuidado y preservación de las fuentes hídricas colombianas; fue a partir de la promulgación de la nueva Constitución Política Nacional, que se reconoció el derecho a un ambiente sano como un derecho colectivo, que dispone de una protección que se establece como un deber ser de todos los Estados y de los particulares: la Constitución de 1991 nombró al Estado como garante de un ambiente con recursos naturales renovables, tal y como es el caso del recurso hídrico.

Disponibilidad de los Recursos Hídricos en Colombia.

Colombia en 1990 fue clasificada como el cuarto país con mayor riqueza de agua en el mundo (CEPAL, 2000), sin embargo, en 2017 pasó a ser el número 24 del ranking. Según un estudio reciente publicado por el Foro Económico Mundial (2018), la mala gestión de las aguas de Colombia lo ha ubicado en la lista de países que, a mediados de este siglo, es decir en 32 años, sufrirán económicamente por la escasez de agua.

A pesar de esta realidad tan desalentadora, Colombia posee uno de los recursos de agua dulce más ricos del mundo con siete áreas hidrográficas, con el Pacífico aportando la mayor descarga de agua por área, a $0.124 \text{ m}^3\text{s}^{-1}\text{km}^2$, seguido por el Amazonas con $0.081 \text{ m}^3\text{s}^{-1}\text{km}^2$ (Sánchez et al. 2013); aunque el primero tiene una tasa de descarga mucho menor ($9.629 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) en comparación con el segundo ($27.830 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) (Salazar, 2016).

Es decir que, la mayor contribución general a los recursos hídricos superficiales del país es del 27.83%, 19.23% y 9.63% de las áreas hidrográficas del Amazonas, Orinoco y Pacífico, respectivamente (Sánchez et al., 2013).

Según el IDEAM en el Estudio Nacional del Agua (2014), la distribución de la oferta hídrica y caudales por área geográfica, es el siguiente:

Área geográfica		Oferta total (Mm ³)	Caudal (m ³ /s)	Porcentaje de la oferta
1	Caribe	182 865	5799	9,1
2	Magdalena - Cauca	271 049	8595	13,5
3	Orinoco	529 469	16 789	26,3
4	Amazonas	745 070	23 626	37,0
5	Pacífico	283 201	8980	14,1
Total		2 011 655	63 789	100,0

Respecto a las dieciséis áreas hidrogeológicas que se encuentran compuestas de diversos materiales litológicos, estas contienen reservas de agua subterránea que cubren aproximadamente el 74% de la superficie del país (Rodríguez, 2010).

Con respecto a los recursos de agua dulce, el 36% de las aguas superficiales provienen de la zona hidrográfica Amareles-Dagua, y el 8% de la reserva nacional de aguas subterráneas se encuentra dentro del área hidrogeológica del Chocó-Pacífico (IDEAM, 2014). Las aguas costeras del Pacífico, de las que forma parte la Bahía

de Buenaventura, también forman parte de la riqueza hidrológica del territorio.

Por tanto existe una vulnerabilidad que está determinada por el abastecimiento de las cabeceras municipales que es cubierta por un 80% por las fuentes de agua pequeñas, como arroyos, quebradas y riachuelos, que no garantizan la disponibilidad, lo que se ve representado en el hecho de que los grandes asentamientos humanos y los centros de desarrollo industrial, agrícola, y de otras índoles, generan presiones sobre el recurso. Lo anterior, señala la preocupación sobre los problemas de disponibilidad de agua dentro del compendio de municipios y áreas urbanas, en especial aquellas que tienen que ver con los periodos climáticos fuertes, como sucede en las cuencas del Magdalena, el Cauca y los de la zona Caribe (IDEAM, 2001).

Así mismo, existe un marco lógico establecido para la gestión de los recursos hídricos en Colombia, a través del Ministerio de Medio Ambiente y treinta y tres autoridades regionales, las cuales están a cargo de la gestión de los recursos hídricos y las políticas a nivel nacional, regional y todo lo que tiene que ver con la cuenca hidrográfica, respectivamente. Algunos de estos sectores se encuentran a cargo de la demanda de agua para energía, suministro de agua y saneamiento, y agua para riego.

La gestión de los recursos hídricos en Colombia ofrece un compendio legal e institucional que propone múltiples beneficios y garantías, así como desafíos dentro de los que se encuentran: las consideraciones que se deben tener con el recurso hídrico como un recurso abundante que afecta la puesta en marcha de las políticas, la división de la gestión de responsabilidades frente a los recursos hídricos y la falta de un mecanismo nacional que sea coherente y eficaz frente al tema, y la falta de acoplamiento entre los estamentos gubernamentales como el Ministerio del

Medio Ambiente, las gobernaciones, las alcaldías y los concejos municipales de cada región. Además, la ineficaz capacidad de dar respuesta clara e inmediata a las necesidades poblacionales en cada una de las áreas frente al tema, los retos de gobernabilidad a partir de problemas sociales, y en especial ambientales dentro de los que se pueden mencionar la deforestación; la presencia de cultivos ilícitos como la coca en regiones ampliamente productivas, y las expansiones urbanas indiscriminadas, entre otros (Ojeda, 2000).

Por otro lado, es importante señalar que las estimaciones llevadas a cabo por el IDEAM (2008) anualmente, establecen que en Colombia se presenta una media de precipitaciones de 3000 m.m, con una evaporación real de 1180 m.m., y con una escorrentía media anual de 1830 m.m., lo que se representa en un 61% de escorrentía superficial que genera un caudal medio de 67000 m³/seg, que se convierte en un volumen anual de más de 2000 km³, que se escurren por las cinco regiones hidrológicas que caracterizan el territorio nacional.

a. Aguas Superficiales

En primera instancia, se deben identificar las aguas superficiales como todas aquellas aguas que se encuentran en la superficie o exterior de la tierra. También pueden ser catalogadas como aguas corrientes que se mueven o que llevan su cauce en una misma dirección y circulan continuamente. Un ejemplo de aguas superficiales son los ríos, las quebradas y arroyos, o todas aquellas estancadas como los lagos, lagunas y pantanos (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018).

Durante los años 2005 a 2008 se llevó a cabo un programa de seguimiento frente a la calidad de los recursos hídricos

superficiales, a partir de un promedio de 1600 muestreos que denotaron información que permitió el cálculo del índice de calidad del agua para corrientes superficiales denominado ICACUSO, a través de variables básicas que definieron los orígenes de contaminación como: porcentaje de saturación de oxígeno –OD, sólidos en suspensión, anexos químicos de oxígeno, conductividad eléctrica y pH dentro de los que pudo señalar el IDEAM (2013).

b. Aguas Subterráneas

Las aguas subterráneas surgen en los casos en que la lluvia cae al suelo y fluye a través de la superficie de la tierra, hidratándola. Sin embargo, no toda es utilizada por la vegetación, una parte de ella se evapora y otra se filtra en el suelo a través de zonas no saturadas alcanzando una tabla de agua, la cual forma el agua subterránea, por estar debajo de la superficie de la zona en forma de acuíferos (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2018).

Las aguas subterráneas se convierten en las formas más claras del ciclo hidrológico, bajo la dinámica de la comprensión de la trama de flujos hídricos y también a través de medios naturales permeables y con sedimentos y rocas fracturadas, es decir es un sedimento que se deposita en el tiempo geológico e interactúa con los ciclos de vida actuales.

La relevancia de estas aguas radica en que son un patrimonio natural, más aun considerando que la mayor parte de los recursos hídricos utilizables en el planeta se encuentran en el subsuelo, y que Colombia presenta similares condiciones con un gran potencial de aguas subterráneas (Barón y Monroy, 2018).

Las primeras acciones de búsqueda de agua subterránea a lo largo del territorio nacional se llevaron a cabo durante los años cincuenta, con la idea de lograr abastecer el servicio de agua potable a ciertas poblaciones con limitaciones en la obtención o en el manejo de la misma dentro de su territorio. Las primeras zonas del país donde se llevaron a cabo dichas exploraciones fueron los departamentos de Valle del Cauca, Boyacá, Cundinamarca, Córdoba, Antioquia, Huila y Cundinamarca (Ministerio de Ambiente, 2018).

Más adelante, en los años sesenta, se llevaron a cabo investigaciones en la misma área, basándose en los mismos objetivos de encontrar aguas subterráneas para el manejo poblacional, pero en esta ocasión se amplió el espectro de los departamentos pasando a los de Tolima, Bolívar, Caldas y Santander, y también ampliando las exploraciones en el Valle del Cauca y Boyacá.

Para las décadas de los setenta y ochenta, aparecieron en el escenario de dichas exploraciones los contratos de cooperación técnica internacional, específicamente entre Holanda y Colombia, con el único objetivo de facilitar las estrategias de estudio y exploración sistemática de dichas reservas de agua subterránea en la mayoría de los departamentos del país.

Los años setenta, se caracterizaron por las exploraciones y explotaciones de aguas subterráneas, como un mecanismo directo de ampliación de dichos estudios, especialmente en los departamentos de Valle del Cauca, Magdalena Medio y todo lo que concernía a la población aledaña a Cundinamarca, Chiquinquirá, la Guajira, y otros departamentos como Bolívar, Atlántico, Urabá.

De la mano de la cooperación internacional para dichas exploraciones, se establecieron investigaciones de corte hidrogeológico,

en ciertos departamentos como Tolima, Boyacá y Cundinamarca, para abastecer de agua a los departamentos aledaños, así como en la búsqueda de aguas termominerales que fueron significativas para la obtención de nuevos y más amplios descubrimientos en el tema del agua y los minerales, así como lo que tenía que ver con la geotérmica de la época (Ministerio de Ambiente, 20018).

Con este breve recuento se puede evidenciar que el Gobierno nacional y sus gobernantes locales han erigido mecanismos en favor de las citadas aguas, pero diversos factores producto del accionar inconsciente del hombre, han fracturado el equilibrio natural del medio ambiente.

(...) sin embargo, en un entorno permeado por la explotación económica el agua, la falta de consenso preliminar, en particular de aquellos desórdenes normativos que parecen prima facie, las disrupciones medioambientales que modifican la calidad del aire, suelo y agua, se hacen evidentes en el cambio climático con tornados, maremotos, terremotos, huracanes, tsunamis, extinción de algunas especies de la flora y la fauna, desaparición de páramos, ríos, bosques, glaciares, aumento de enfermedades e incluso el desplazamiento de poblaciones humanas, inducidos por el quebrantamiento del hábitat. (Barón y Monroy, 2018).

Uso del agua en Colombia

En la década de 1990, Colombia introdujo una política de descentralización, con énfasis en la corporatización de los servicios públicos (que generalmente se gestionan a nivel municipal), y la participación del sector privado en la provisión de servicios públicos. En adición, a la descentralización, les dio a los municipios la responsabilidad de la provisión de agua y

saneamiento con el apoyo del gobierno central (Comisión Reguladora de Agua, et.al., 1997).

La institución clave del gobierno central en el sector de agua y saneamiento es el Viceministerio de Agua y Saneamiento (VAS), que depende del Ministerio de Vivienda y Territorio. El Viceministerio es el responsable de implementar políticas, planes y programas nacionales en el sector de agua y saneamiento. El Departamento Nacional de Planeación (DNP), en estrecha colaboración con el Ministerio, establece las políticas a través de planes de desarrollo y políticas sectoriales específicas - CONPES (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2018).

Desde la aprobación de la Ley 142 en 1994, la política del gobierno ha sido fomentar la provisión del servicio por parte de entidades especializadas, en lugar de que el municipio brinde servicios públicos directamente. La opción de provisión directa por parte del municipio solo está permitida cuando no existe ninguna otra alternativa.

Si los municipios proporcionan los servicios directamente, existen reglas estrictas de adquisición que los mismos deben seguir. Sin embargo, hay varios otros modelos de entrega disponibles a los municipios que quedan fuera de las normas de contratación pública.

Las responsabilidades regulatorias en el sector de agua y saneamiento se dividen principalmente entre la Comisión Reguladora de Agua Potable y Saneamiento (CRA), que regula los aranceles de agua y saneamiento, y la Superintendencia de los Servicios Públicos (SSPD), que monitorea y refuerza el desempeño de los operadores.

Una característica clave de los sectores de agua potable y saneamiento ambiental colombianos, es que los proveedores de

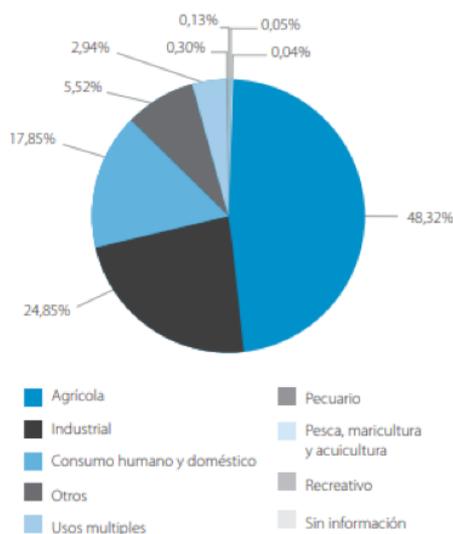
servicios se caracterizan como pequeñas empresas si proporcionan menos de 2500 conexiones, o grandes, si suministran 2500 conexiones o más. Esto es un gran contraste con la clasificación empleada en otras jurisdicciones que se enfoca, en cambio, en la provisión urbana versus la provisión rural (Cadavid, 2010). Vale la pena mencionar que la cobertura del servicio de agua y saneamiento ambiental en las áreas rurales de Colombia es muy inferior a la de los centros urbanos, en este aspecto el gobierno está introduciendo políticas para abordar esta disparidad.

La forma más común de participación privada en el sector de Agua Potable y Saneamiento en Colombia es a través de las empresas de servicios públicos, llamadas Empresas de Servicios Públicos (ESPs). Estas son organizaciones establecidas específicamente para la prestación de servicios públicos y pueden ser de propiedad privada o de propiedad conjunta público-privada.

Las ESP en la mayoría de los grandes centros urbanos en Colombia se han establecido con capital privado. Sin embargo, la experiencia con DPSP (es la Entidad del Gobierno Nacional que encabeza el Sector de Inclusión Social y Reconciliación, al cual se encuentran adscritas las siguientes entidades: Agencia Nacional para la Superación de la Pobreza Extrema - ANSPE, en ciudades pequeñas y áreas rurales es limitada debido a la dispersión de la población en estas áreas, lo que aumenta el costo de desarrollo, infraestructura y los resultados en alto costo de suministro, por lo que es menos atractivo para el sector privado y la inversión respectiva (PNUD, 2016).

Sin embargo, algunas ESP que involucran accionistas privados han comenzado recientemente explorando la posibilidad de proporcionar servicios de agua y saneamiento en áreas que rodean a las grandes ciudades en que operan.

Es de tener en cuenta que el servicio de agua concesionada sujeta a cobro por TUA, se encuentra en su mayoría en el sector agrícola en un 48,32%, seguido del sector industrial con un 24,85%, según datos estadísticos proporcionados por el IDEAM en el Informe del Agua (2014), mostrado en el siguiente gráfico:



Fuente: IDEAM, Estudio Nacional del Agua 2014. Bogotá, D. C., 2015, pág. 151

Una de las principales lecciones aprendidas es que no es realista esperar que el sector privado proporcione capital de inversión para grandes inversiones de agua y saneamiento.

El Contrato de concesión en áreas urbanas es más grande, donde teóricamente la población puede pagar aranceles más altos, al ser diseñados para facilitar al operador privado la recuperación de los costos de su inversión inicial a través de la tarifa que en la mayoría de los casos han sido renegociados, bien sea formal o informalmente. Las renegociaciones sugieren que es poco probable que en la práctica se haya invertido mucho capital privado, si lo hubiera. El acuerdo contractual más exitoso

es un acuerdo de arrendamiento donde la mayor parte de los costos iniciales están cubiertos por el sector público.

Los ingresos arancelarios recaudados por el sector privado operador se utilizan para pagar una tarifa de arrendamiento al Estado, gastos de operación y mantenimiento, haciendo inversiones definidas para mantener y expandir el sistema.

Colombia ha reconocido que entre los servicios de infraestructura del servicio de agua y saneamiento en particular se requiere de la experiencia específica que normalmente no se encuentra a nivel municipal (Ministerio de Desarrollo Económico, 2000). Por lo tanto, se tiene que llevar a cabo una política para alentar la regionalización de los servicios de agua y saneamiento a partir de la implementación de planes departamentales de agua, que son un conjunto de planificación y coordinación interinstitucional bajo estrategias en las que los municipios puedan optar voluntariamente. Esto trae consigo una mejor fuente de recursos y un enfoque más corporativo para la provisión del servicio de agua y saneamiento y, en última instancia, hace que sea más fácil, para grandes operadores privados, expandir los servicios a pueblos pequeños y áreas rurales. Aunque los conceptos de los planes de agua departamental son relativamente nuevos y, por lo tanto, apenas comienza a aplicarse en la mayoría de los departamentos.

Además, los grandes operadores privados están proponiendo el concepto de tarifas regionales al regulador. La innovadora tarifa regional permitirá a un operador cobrar un informe a través de los sistemas de agua y saneamiento que no están físicamente interconectados, lo que permite centros urbanos para subvencionar de manera cruzada las ciudades pequeñas, de modo que la provisión a las mismas luego sea rentable para el operador.

Los beneficios enumerados del enfoque de regionalización son los siguientes (Cardona, 2010):

- Sostenibilidad a largo plazo: los usuarios serán atendidos por un operador que puede garantizar la continuidad del servicio y la calidad a un precio que toma en cuenta la realidad económica de municipios más pequeños.
- Suficiencia financiera: la regionalización de la prestación del servicio aborda el desafío de suministrar pequeñas municipalidades, sin comprometer los recursos financieros nacionales.
- Economías de escala: se realiza gracias a la expansión del uso de instalaciones existentes, tales como plantas de tratamiento de agua.
- No exclusividad en la provisión del servicio: un punto clave hecho por el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio-MVCT. La regionalización no implica la prestación de servicios exclusivos, pues otros operadores son libres de ingresar al mercado de los servicios de agua y saneamiento en dicho departamento.

El paso más importante que ha dado Colombia para alentar al DPSP es lograr el éxito al involucrar a operadores del sector privado en grandes áreas urbanas. Para las ciudades pequeñas, las más exitosas instancias del DPSP han sido cuando los grandes operadores de agua extienden sus servicios a las cercanías de pueblos pequeños.

Así mismo, ha logrado alentar a los municipios a renunciar al control directo del servicio de agua y saneamiento, al condicionar algunos fondos del gobierno central a la corporatización y otros criterios de eficiencia. La opción de establecer una empresa conjunta o Empresa de Servicios Públicos, para proporcionar el servicio de agua potable y saneamiento, también ha abierto el mercado del DPSP en Colombia, al permitir al municipio este tipo de acuerdo, eludir las reglas de compras de las asociaciones del sector público, que puede a veces ser restrictivo, porque no están diseñados para los contratos de servicio del abastecimiento de agua y saneamiento (Instituto del Banco Mundial, 2001).

Colombia ha reconocido el desafío de recuperar completamente las inversiones en abastecimiento de agua y saneamiento de los aranceles. Eso ha separado de forma consistente fondos significativos para la infraestructura del abastecimiento de agua y saneamiento, y ha lanzado un número de proyectos con el apoyo de organizaciones como el Banco Mundial que, contratan servicios de abastecimiento de agua y saneamiento para el sector privado, junto con una subvención que cubre la mayor parte de los costos de inversión.

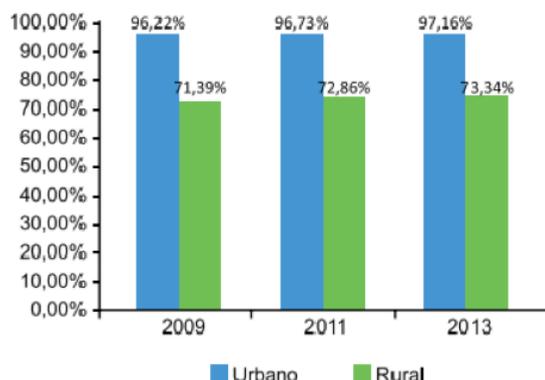
La Comisión reguladora de agua potable y saneamiento –CRA, publicó recientemente metodologías tarifarias separadas para grandes y pequeños operadores. Las diferencias clave entre los dos son que las tarifas cobradas por los pequeños operadores prevén una contribución del gobierno para cubrir los costos de inversión (los usuarios cubrirán los gastos de administración y costos de operación y mantenimiento). En el caso de proveedores grandes, todos los costos deben ser pagados por los usuarios (Comisión Reguladora de Agua, 1997).

Hay una variedad de canales de financiamiento para el sector de agua potable y saneamiento, incluido el presupuesto general de asignaciones y fondos que están disponibles para inversiones de capital basados en criterios predefinidos.

Colombia se venía caracterizando por tener un esquema armonizado de subsidios cruzados, basado en la estratificación de los hogares a lo largo del país. Este implica que cuanto más ricos los hogares más contribuciones netas hacen, mientras que los hogares más pobres reciben esas contribuciones en la forma de subsidios del lado de la demanda para los servicios públicos, incluidos los servicios de abastecimiento de agua potable y saneamiento (DANE, s.f.), esquema que parece será modificado por el nuevo Gobierno Nacional instaurado desde agosto de 2018.

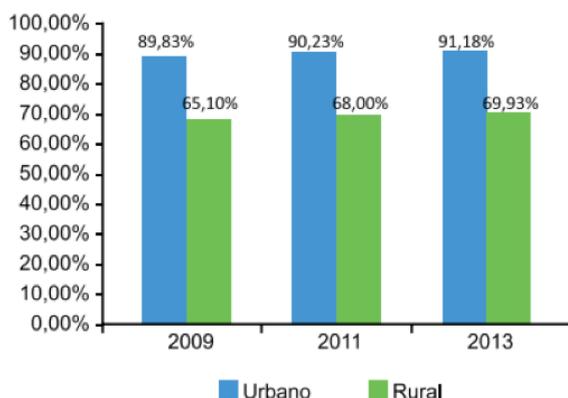
Cabe mencionar que, la atención al sector rural en la prestación de servicios de acueducto y alcantarillado no ha sido la más óptima.

Cobertura de acueducto Urbano - rural



Fuente: GEIH (DANE). Cálculos DNP, citados en evolución de las coberturas de los servicios de acueducto y alcantarillado (1985-2013).

Cobertura de alcantarillado Urbano – rural



Fuente: GEIH (DANE). Cálculos DNP, citado en evolución de las coberturas de los servicios de acueducto y alcantarillado (1985-2013).

La regulación y el monitoreo del sector de agua y saneamiento en Colombia es positivo. Sin embargo, una crítica es que la separación de las funciones reguladoras (CRA), la supervisión y las funciones de aplicación de la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios –SSPD, crean una desconexión que en última instancia conduce a una efectividad menor regulatoria y aumenta el riesgo para los operadores privados (Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, 2002).

Las reglamentaciones, y en cierta medida las políticas relacionadas, deben atender específicamente a los pequeños operadores, puesto que, en Colombia, la gran mayoría de los operadores (en su mayoría los de la comunidad) no son registrados en la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios y, por lo tanto, caen en gran medida fuera de las regulaciones y mecanismos de apoyo.

Conclusiones

El manejo de los recursos hídricos en Colombia, bajo la indicación de un proceso que conlleva a un desarrollo sostenible, se vislumbra a partir de la derivación del uso, el aprovechamiento y la demanda por parte del Estado, los sectores productivos y de servicios públicos, así como de la población, estableciendo acciones contundentes de interacción asimétrica bajo un compendio de intereses, convicciones y acciones básicas que giran alrededor de un recurso hídrico generado desde las cuencas hidrográficas del país.

A nivel teórico, se carece de paradigmas que expliquen de forma racional, tanto individual como colectiva, el mal uso del agua y su justificación frente al comportamiento que ejecutan algunos actores que participan en la gestión y el aprovechamiento del recurso, donde la disponibilidad de este está caminando rápida y firmemente hacia la escasez. Se parte de la idea de que, al predominar una racionalidad económica y un conocimiento previo, se logran tener juicios más efectivos a la hora de establecer acciones contundentes.

Referencias

- Alcaldía Mayor de Bogotá. (2018). Recurso hídrico subterráneo. Secretaría Distrital de Ambiente. Recuperado de: <http://ambientebogota.gov.co/aguas-subterraneas>
- Arrojo, P. (2009). Tipología y raíces de los conflictos por el agua en el mundo. En Delclòs Jaume (Coord.). Agua, un derecho y no una mercancía. Propuestas de la sociedad civil para un modelo público del agua. pp. 9-34. Barcelona, España: Icaria.
- Armar, M. (2000). Thematic paper 4: Urban agriculture and food security, nutrition, and health. In: Bakker N, Dubbeling M, Guendel S, Sabel Koschella U, de Zeeuw H, editors. Growing cities growing food: Urban agriculture on the policy agenda: A reader on urban agriculture. Feldafing: DSE; 2000. pp. 99–117.
- Asamblea Nacional de las Naciones Unidas. Resolución 64/292 de 2010. Recuperado de http://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/64/292&Lang=S
- Atehortua, C. A. (2012). Servicios Públicos Domiciliarios y las TIC en el contexto del precedente judicial. Instituto Colombiano de Contratación Estatal y Servicios Públicos –INCODES- Biblioteca Jurídica DIKE. Medellín.
- Barón, C y Monroy, E. (2018). Evolución normativa del derecho ambiental y de aguas en Colombia. Casos de Ingeniería: El recurso hídrico en el contexto urbano y rural. Editorial: Fundación Universitaria Agraria de Colombia.
- Beltrao, J. et. al. (2014). Derechos humanos de los grupos vulnerables. Red de derechos humanos y educación superior. Programa financiado por la Comisión Europea. Universitat Pompeu Fabra, Barcelona.

Cadavid, J.A. (2010). Servicios públicos de agua potable y saneamiento en la consolidación urbanística de asentamientos informales. Estudio de caso en Medellín, Colombia. Trabajo de grado Magister. Escuela de Planeación urbano regional, facultad de arquitectura, Universidad Nacional de Colombia, Medellín.

Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (2002). Análisis del sector de agua potable y saneamiento en Colombia. Plan Regional de Inversiones en Ambiente y Salud. Serie Análisis No. 11 Segunda Parte, Capítulo 8. Recuperado de: <http://www.bvsde.paho.org/eswww/fulltext/analisis/colombias/spcapit8.html>

CEPAL (2000). Informe Nacional sobre la Gestión del Agua en Colombia. Recursos Hídricos, Agua Potable y Saneamiento. Bogotá. Recuperado de <https://www.cepal.org/drni/proyectos/samtac/inco00200.pdf>

CICR (2000). El estatuto del agua en el derecho internacional humanitario, por Théo Boutruche.

Colombian Geographical Society -SOGEOCOL (2015). Informe Colombia: Potencia Hídrica.

Comisión Reguladora de Agua - Departamento Nacional de Planeación Financiera de Desarrollo Territorial - Ministerio de Desarrollo Económico Ministerio de Medio Ambiente - Superintendencia de Servicios Públicos (1997). Análisis del Sector de agua potable y saneamiento en Colombia. Plan regional de inversiones en ambiente y salud. Serie análisis No. 11.

Congreso de la República de Colombia. (Junio 6 de 1997). Por la cual se establece el programa para el uso eficiente y ahorro del agua. [Ley 373 de 1997].

Constitución Política de Colombia [Const.] (1991), 2da Ed. Legis

DANE (s.f.). La estratificación socioeconómica en el régimen de los servicios públicos domiciliarios. Grupo de Estratificación Socioeconómica Dirección Geoestadística DANE. Recuperado de: https://www.dane.gov.co/files/geoestadistica/Estratificacion_en_SPD.pdf

Darnaculleta I Gardella, M. (2002). Derecho Administrativo y Autoregulación: La Autoregulación regulada. (Tesis Doctoral). Girona: Universidad de Girona. Departamento de Derecho Público. 2002. Pág. 34.

Decreto 2811 de 1974. (18 de diciembre). Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente. República de Colombia.

Decreto 1449 de 1977. (27 de junio). Por el cual se reglamentan parcialmente el inciso 1 del numeral 5 del artículo 56 de la Ley 135 de 1961 y el Decreto Ley No. 2811 de 1974. Ministerio de Agricultura.

Decreto 1541 de 1978. (26 de julio). Por el cual se reglamenta la Parte III del Libro II del Decreto - Ley 2811 de 1974: "De las aguas no marítimas" y parcialmente la Ley 23 de 1973. Ministerio de Agricultura.

Decreto Ley 2324 de 1984 (18 de septiembre). Por el cual se reorganiza la Dirección General Marítima y Portuaria.

Decreto 2857 de 1981 (13 de octubre). Por el cual se reglamenta la Parte XIII, Título 2, Capítulo III del Decreto- Ley 2811 de 1974 sobre Cuencas Hidrográficas y se dictan otras disposiciones.

Decreto 347 de 2000. (1 de marzo). Por el cual se modifica la Comisión Colombiana de Oceanografía y se dictan otras disposiciones.

Decreto 3930 de 2010 (25 de octubre). Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9ª de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II del Decreto-ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones.

Decreto 1076 de 2015 (26 de mayo). Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Decreto 1875 de 1979. (2 de agosto). Por el cual se dictan normas sobre la prevención de la contaminación del medio marino y otras disposiciones. En uso de las facultades extraordinarias conferidas por la ley 10 de 1978.

Decreto 1337 de 1978. (10 julio). Por el cual se reglamentan los artículos 14 y 17 del Decreto Ley 2811 de 1974. Diario Oficial No.35064. Ministerio de Educación Nacional.

Decreto 1603 de 1994. (27 de julio). Por el cual se organizan y establecen los Institutos de Investigación de Recursos Biológicos "Alexander von Humboldt", el Instituto Amazónico de Investigaciones "SINCHI" y el Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico "John von Neumann". Ministerio del Medio Ambiente.

Decreto 1600 de 1994. (27 de julio). Por el cual se reglamenta parcialmente el Sistema Nacional Ambiental (SINA) en relación con los Sistemas Nacionales de Investigación Ambiental y de Información Ambiental. Ministerio del Medio Ambiente.

Decreto 1480 de 2007. (4 de mayo). Por el cual se priorizan a nivel nacional el ordenamiento y la intervención de algunas cuencas hidrográficas y se dictan otras disposiciones". Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

Decreto 2372 de 2010. (1 de julio). Por el cual se reglamenta el Decreto Ley 2811 de 1974, la Ley 99 de 1993, la Ley 165 de 1994 y el Decreto Ley 216 de 2003, en relación con el Sistema Nacional de Áreas Protegidas. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

Decreto 1076 de 2015. (26 de mayo). Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

Decreto 1575 de 2007. (9 de mayo). Por el cual se establece el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano. Ministerio de la Protección Social.

Decreto 1323 de 2007. (19 de abril). "Por el cual se crea el Sistema de Información del Recurso Hídrico -SIRH-". Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

Del Castillo, S. (29 de Agosto de 2011). El país se está quedando sin agua. El Espectador. Recuperado de <https://www.elespectador.com/vivir/el-pais-se-esta-quedando-sin-agua-articulo-258295>.

Díaz, A.; Chingate, N.; Muñoz, D.; Olaya, W.; Perilla, C.; Sánchez, F. y Sánchez, K. (2009). Desarrollo sostenible y el agua como derecho en Colombia. En: Estudios socio-jurídicos, 11(1), p. 84-116.

FAO (2012). It projects only a 6% increase in global irrigation withdrawals by 2050 Alexandratos and Bruinsma 2012: p.118.

Granados Gálvez, J. (2017). El reconocimiento del derecho al agua de los países miembros de la alianza del pacífico y la doctrina del control de convencionalidad. XLIII Curso de Derecho Internacional -OEA.

Hodgkin, R., Newell, P., (2007). Implementation Handbook for the Convention on the Rights of the Child, tercera edición, UNICEF, Ginebra.

Ingeniería Sin Fronteras Asociación para el Desarrollo y Prosalus (2009). Derecho al agua en África Subsahariana. Los casos de Sudáfrica, Kenia y Ghana. España

Instituto del Banco Mundial. (2001). Los retos del gobierno urbano. Edición de Mila Freire y Richard Stren. Banco Mundial. Economía de América Latina. Editorial Alfaomega, Bogotá.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (2001). Estudio Nacional del agua. IDEAM. Bogotá, Colombia.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (2008). Informe Anual sobre el Estado del Medio Ambiente y los Recursos Naturales Renovables en Colombia, Estudio Nacional del Agua – Relaciones de Demanda de Agua y Oferta Hídrica. Bogotá D.C.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (2013). El Estudio Nacional del Agua un Compendio sobre el Recurso hídrico en Colombia. Bogotá D.C., 2005.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM], MinAmbiente (2014). Estudio Nacional del Agua. Recuperado de http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023080/ENA_2014.pdf

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (2015). Estudio Nacional del agua. IDEAM. Bogotá, Colombia.

Kurian M, McCarney P, editors (2010). Peri-urban water and sanitation services: Policy, planning and method. New York: Springer.

Ley 9 de 1979. (enero 24). De la protección del Medio Ambiente y se dictan medidas sanitarias. Congreso de la República de Colombia.

Ley 46 de 1988. (2 de noviembre). Por la cual se crea y organiza el Sistema Nacional para la Prevención y Atención de Desastres. Congreso de la República de Colombia.

Ley 29 de 1990. (27 de febrero). Por la cual se dictan disposiciones para el fomento de la investigación científica y el desarrollo tecnológico y se otorgan facultades extraordinarias. Congreso de la República de Colombia.

Ley 99 de 1993. (22 de diciembre).

Congreso de la República de Colombia. Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental –SINA y se dictan otras disposiciones.

Ley 161 de 1994. (3 de agosto de 1994). Por la cual se organiza la Corporación Autónoma Regional del Río Grande de la Magdalena, se determinan sus fuentes de financiación y se dictan otras disposiciones. Congreso de la República de Colombia. Diario Oficial No. 41.475.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (31 de Agosto de 2018) Diagnóstico de las aguas subterráneas Recuperado de: <http://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article/1631-plantilla-gestion-integral-del-recurso-hidrico-37#documentos-de-inter%C3%A9s>

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2018). Funciones del despacho del viceministro de agua y saneamiento básico. Portal informativo. Recuperado de: <http://www.minvivienda.gov.co/viceministerios/viceministerio-de-agua>

Muñoz, O. (2009). El derecho al agua potable como derecho fundamental no enumerado. Derechos constitucionales no escritos reconocidos por el Tribunal Constitucional, Lima, Gaceta Jurídica, p. 169-180.

Ojeda, O., & Arias Uribe, Raúl (2000). Informe Nacional sobre la Gestión del Agua en Colombia: Recursos Hídricos, Agua Potable y Saneamiento. Cepis.org. pp. 102–104.

Open Working Group. (2014). Proposal of the Open Working Group for Sustainable Development Goals.

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo – PNUD (2006). Informe sobre desarrollo humano – Más allá de la escasez: poder, pobreza y la crisis mundial del agua. New York: Grupo Mundi-Prensa.

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo – PNUD (2018). Objetivos de Desarrollo Sostenible, Colombia Herramientas de aproximación al contexto local. Recuperado de: <http://www.co.undp.org/content/dam/colombia/docs/ODM/undp-co-ODSColombiaVSWS-2016.pdf>

CARE Internacional. Memoria del taller regional sobre agua, pobreza y gobernabilidad. Quito, 10 y 11 de febrero de 2003. Recuperado de http://www.eclac.org/DRNI/proyectos/samtac/actividades_nacionales/ecuador/1/taller2.pdf

Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, A., Chapin III, F.S., Lambin, E., Lenton, T.M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H., Nykvist, B., De Wit, C.A., Hughes, T., van der Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P.K., Costanza, R., Svedin, U., Falkenmark, M., Karlberg, L., Corell, R.W., Fabry, V.J., Hansen, J., Walker, B., Liverman, D., Richardson, K., Crutzen, P., Foley, J., (2009). A safe operating space for humanity. *Nature* 46: pp.472–475.

Resolución No. 1096 de 2000. (17 de noviembre). Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el sector de Agua Potable y Saneamiento Básico –RAS. Recuperado de: https://www.minsalud.gov.co/Normatividad_Nuevo/RESOLUCI%C3%93N%201096%20DE%202000.pdf

Resolución 769 de 2002. (5 de agosto). Por la cual se dictan disposiciones para contribuir a la protección, conservación y sostenibilidad de los páramos. Ministerio del Medio Ambiente.

Resolución 140 de 2003. (18 de febrero). Por la cual se modifica el término previsto en el artículo 3° de la Resolución 769 del 5 de agosto de 2002, mediante la cual se dictan disposiciones para contribuir a la protección, conservación y sostenibilidad de los páramos. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

Resolución 0839 de 2003. (1 de agosto). Por la cual se establecen los términos de referencia para la elaboración del Estudio sobre el Estado Actual de Páramos y del Plan de Manejo Ambiental de los Páramos. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

Resolución 104 de 2003. (7 de julio). Por la que se establecen los criterios y parámetros para la Clasificación y Priorización de cuencas hidrográficas. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Recuperado de http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Res_104_de_2003.pdf

Resolución 157 de 2004. (12 de febrero). Por la cual se reglamentan el uso sostenible, conservación y manejo de los humedales, y se desarrollan aspectos referidos a los mismos en aplicación de la Convención Ramsar. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

Resolución 1128 de 2006. (15 de junio). Por la cual se modifica el artículo 10 de la Resolución 839 de 2003 y el artículo 12 de la Resolución 157 de 2004 y se dictan otras disposiciones. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Diario Oficial No. 46.305.

Resolución 493 de 2010. (25 de febrero). Por el cual se adoptan medidas para promover el uso eficiente y ahorro del agua potable y desincentivar su consumo excesivo. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

Decreto 0303 de 2012. (6 de febrero). Por el cual se reglamenta parcialmente el artículo 64 del Decreto - Ley 2811 de 1974 en relación con el Registro de Usuarios del Recurso Hídrico y se dictan otras disposiciones. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

Resolución 1907 de 2013. (27 de diciembre). Por la cual se expide la Guía Técnica para la formulación de los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Diario Oficial No. 49.046.

Rodríguez, L. (2008). Derecho Administrativo Colombiano. Décimo séptima edición. Temis, 2008.

Rodríguez, C. &. (2010). Estudio Nacional del Agua, Oferta y Uso del Agua Subterránea en Colombia. Bogotá: IDEAM.

Salazar Holguín, F. (2016). Zonificación hidrográfica preliminar de Colombia. Hidrografía Colombiana –IDEAM Y SiGaia <https://www.arcgis.com/home/item.html?id=103b63dcc9f448acbd63f22b728b1a02>

Sánchez, F. (08 de Mayo de 2013). III Seminario de Actualización en Ingeniería Ambiental; Gestión del Recurso Hídrico en Colombia. Recuperado de http://www.fuac.edu.co/recursos_web/documentos/ing.ambiental/RECURSO_HIDRICO_EN_COLOMBIA_UAUTONOMA_1.pdf

The World Bank. Informe - The 2016 edition of World Development Indicators is out: three features you won't want to miss. Coauthors: Tariq Khokhar, Edie Purdie. Recuperado de: <https://blogs.worldbank.org/opendata/2016-edition-world-development-indicators-out-three-features-you-won-t-want-miss>

UNICEF, WHO. (2013). Progress in Drinking-water and Sanitation: special focus on sanitation. WHO/UNICEF Joint Monitoring Programme for Water Supply and Sanitation (JMP).

UN Water. (2014). A Post-2015 Global Goal for Water: Synthesis of key findings and recommendations from UN-Water.

UNEP. (2012). The UN-Water Status Report on the Application of Integrated Approaches to Water Resources Management.

United Nations (2014). World urbanization prospect. Economic & Social Affairs, Revisión 2014. New York

World Economic Forum (2018). Informe - ¿Habrá agua para todos y para todo?. En colaboración con El País. Recuperado de <https://es.weforum.org/agenda/2018/05/habra-agua-para-todos-y-para-todo>.

WWAP - United Nations World Water Assessment Programme. (2012). Green Accounting and Data Improvement for Water Resources. Working Paper prepared for the session 'Green Accounting and Data Improvement: Critical Tools for Informed Decision Making and Sustainable Growth' at World Water Forum 6, Marseille, 13 March 2012. Colombella, Perugia, Italy: UNESCO.

Zeza A, Tasciotti L. (2010). Urban agriculture, poverty, and food security: Empirical evidence from a sample of developing countries. Food Policy.35. 265–273.

EL DERECHO HUMANO AL AGUA GARANTE DEL DESARROLLO SOSTENIBLE

*Edgar Ricardo Monroy Vargas¹⁷
Cristina Yanneth Barón Hernández¹⁸*

El establecimiento del derecho humano al agua es solo el primer paso para garantizar que este derecho se ejerza a escala universal y propicie el desarrollo sostenible. Su implementación requiere no solo recursos técnicos, sino voluntad política. Garantizar la provisión sostenible de acceso equitativo y suficiente al agua potable para el ser humano, como parte de los ODS, se constituye en una condición necesaria para acabar con la pobreza y el hambre; pero pese al gran progreso que la población mundial ha tenido en relación a su reducción, con efectos visibles por ejemplo en la mejora en la salud, durante las últimas dos décadas la humanidad ha enfrentado desafíos enormes de orden socioeconómico y de sostenibilidad.

17 Ph. D. Universidad Piloto de Colombia.

18 Abogada. Mg. Investigadora. UniSangil, Colombia.

El derecho al agua en el ámbito internacional de los derechos humanos

El derecho humano al agua potable está incluido implícita o explícitamente en una serie de tratados y declaraciones, desde la Declaración Universal de Derechos Humanos (DUDH), en la cual se establece que todos tienen derecho a un nivel de vida adecuado para su salud y su bienestar, que incluye la comida y la vivienda (Granados, 2017). Este derecho no puede ejercerse sin acceso a una cantidad mínima de agua apta para el consumo humano.

El Pacto Internacional de Derechos Civiles y Políticos (PIDCP, 1966), estipula una serie de derechos cuyo cumplimiento requiere del acceso al agua potable por parte de la población, sin distinciones de raza, religión o cultura, significando con ello el reconocimiento del derecho al agua al consagrar el derecho a la vida y, sostener que ningún pueblo puede ser privado de sus propios medios de subsistencia.

Así mismo, el Pacto Internacional de Derechos Económicos, Sociales y Culturales (PIDESC, 1976), también reconoce implícitamente el derecho al agua, así como los derechos a un nivel de vida adecuado y el disfrute del más alto nivel posible de salud física y mental, los cuales han sido interpretados oficialmente por el Comité de Derechos Económicos, Sociales y Culturales (CESCR, 1985), que incluye el agua como un derecho fundamental.

La Convención sobre la eliminación de todas las formas de discriminación contra las mujeres (CEDAW, 1981), menciona explícitamente el derecho al agua al afirmar que las mujeres rurales tienen derecho a las condiciones de vida adecuadas, señalando en el artículo 14 literal h: "Gozar de condiciones de vida adecuadas, particularmente en las esferas de la vivienda, los

servicios sanitarios, la electricidad y el abastecimiento de agua, el transporte y las comunicaciones”.

Por otra parte, la Convención sobre los Derechos del Niño, adoptada y abierta a la firma y ratificación por la Asamblea General en su resolución 44/25, de 20 de noviembre de 1989 y, entrando en vigor el 02 de septiembre de 1990, sostiene que, todos los niños tienen derecho al más alto nivel posible de salud garantizado, entre otras cosas, mediante el suministro de agua potable limpia.

Por otro lado, el Convención sobre los Derechos de las Personas con Discapacidad, reconoce a las personas en condición de discapacidad el derecho a ser protegido, incluyendo medidas para garantizar la igualdad de acceso de las personas con discapacidad a la limpieza y por ende al consumo del agua (2008).

El derecho internacional humanitario protector de las víctimas del conflicto armado y, regulado a través de los Convenios de Ginebra, estipula las obligaciones relacionadas con el acceso al agua y saneamiento; establece además, el derecho de los prisioneros de guerra a un nivel de vida adecuado, que les brinde unos estándares de calidad en salud y bienestar, incluido el agua para beber y para llevar a cabo los procesos de saneamiento (Hodgkin, 2007).

Los aludidos Convenios, contienen disposiciones similares con respecto a la protección de los civiles y a través de la enmienda realizada con el Protocolo I (1977), se prohíbe a las partes en conflicto atacar, destruir o inutilizar objetos indispensables para la supervivencia de la población civil, incluyendo suministros de agua potable y obras de irrigación (Boutruche, 2000).

Los acuerdos regionales también reconocen cada vez más la importancia del saneamiento y el derecho humano al agua; por ejemplo, la Carta Africana de Derechos Humanos y de los Pueblos (1981), incluye el “derecho a un entorno satisfactorio favorable a su desarrollo” (artículo 24), que es inalcanzable sin el acceso al agua y al saneamiento.

El Protocolo de San Salvador, adicional a la Convención Americana sobre los Derechos Humanos, en materia de derechos económicos, sociales y culturales, protege el derecho a vivir en un ambiente saludable y a tener acceso a los servicios públicos básicos. Dicho protocolo sobre agua y salud estableció en la convención, la protección y el uso transfronterizo de los cursos de agua y los lagos internacionales adoptados bajo los auspicios de la Comisión Económica para Europa, que tiene como objetivo proteger la salud y el bienestar humanos; asegurando un suministro adecuado de agua potable y saneamiento adecuado para todos (1999). En el mismo sentido, la Carta Árabe de Derechos Humanos a los países, señala la importancia de proporcionar agua potable segura y efectiva, como también un adecuado sistema de saneamiento para todos. (Drnas, s.f.).

La Declaración resultante de la Conferencia Internacional de Dublín de 1992, sobre Agua y Medio Ambiente reconoció que existe un “derecho básico de todos los seres humanos”, al acceso al agua potable y el saneamiento a un precio asequible. Allí mismo se respaldó la declaración del Plan de Acción de Mar del Plata – Argentina de 1977, que incluyó un objetivo para garantizar los suministros adecuados de agua para toda la población del planeta, y específicamente que el derecho al agua incluye el acceso a una cantidad y calidad de agua suficiente.

La Declaración de Abuja adoptada en la Primera Cumbre América del Sur – África (2006), expone el derecho de los ciudadanos a tener acceso a agua y saneamiento limpios y seguros. En el literal

VI referente a los recursos hídricos, señala el reconocimiento del agua como elemento esencial para la vida con funciones socioeconómicas y ambientales, para lo cual declara la promoción para el acceso al agua potable y a la sanidad.

El Consejo de Derechos Humanos adoptó por consenso una resolución que establece el mandato de un experto independiente sobre la cuestión de las obligaciones de derechos humanos relacionadas con el acceso a agua potable segura y saneamiento. En el documento se estableció, que el experto independiente, entre otros, identificará y desarrollará un compendio de mejores prácticas en relación con el acceso al agua potable y al saneamiento, aclarando el contenido normativo de las obligaciones de derechos humanos relacionadas con el agua y el saneamiento y haciendo recomendaciones que podrían ayudar a alcanzar los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM).

Algo semejante sucede con los estándares establecidos en otras declaraciones y resoluciones políticas internacionales, representando las aspiraciones, puntos de vista y el creciente consenso de la comunidad internacional sobre el derecho al agua.

Ahora bien, el Comité de Derechos Económicos, Sociales y Culturales – CESCR, órgano encargado de supervisar a los Estados Parte en lo atinente a la aplicación del Pacto Internacional de Derechos Económicos, Sociales y Culturales (PIDESC) enfatiza que es responsabilidad de los Estados, ayudar a proporcionar asistencia y cooperación internacional, especialmente económica y técnica, en favor de los países en vía de desarrollo, coadyuvando en el cumplimiento de sus obligaciones básicas y, garantizar que los derechos humanos se acaten a cabalidad bajo la modalidad de intervención directa.

Los marcos jurídicos de cada país deben garantizar el acceso al agua y al saneamiento, como mínimo, a partir de la fijación de precios

asequibles para todos. La responsabilidad principal de garantizar el derecho al agua recae entonces sobre los gobiernos sin excluir a quienes suministran los servicios de forma privada. En ese caso, los países deben garantizar que los actores privados no adoptan enfoques que den lugar a violaciones de los derechos humanos. Esto requiere entre otros, un marco regulatorio adecuado, mecanismos de rendición de cuentas y esquemas de fijación de precios que garantice la asequibilidad, así como estrategias de salvaguarda tales como la participación pública y la participación de las comunidades locales para garantizar el acceso no discriminatorio.

La Unesco apoya plenamente el derecho humano al agua, como lo declaró el estudio de la Oficina del Alto Comisionado para los Derechos Humanos (ACNUDH) sobre el alcance y contenido de las obligaciones de derechos humanos relacionadas con el acceso equitativo al agua potable y saneamiento, al determinar que el agua siempre ha sido un componente importante de los programas científicos de la Unesco.

A través de sus programas de agua, la Organización proporciona los servicios necesarios como la columna vertebral científica y educativa sobre la cual los profesionales del agua y los políticos construyen las decisiones que toman para respetar, proteger y cumplir el derecho al agua.

En este sentido, la Unesco declaró además, que el acceso no discriminatorio al agua y al saneamiento se considera un requisito previo para la realización de varios derechos humanos, como los derechos a la vida, la dignidad, la salud, la alimentación y un nivel de vida y educación adecuados. La estrategia de la Unesco sobre los Derechos Humanos, desarrollada en 2003, establece la integración de un enfoque de derechos humanos que es abordado en todos sus programas, incluidas como prioridad, todas las actividades relacionadas con el agua, contribuyendo de esta forma al cumplimiento de los derechos humanos.

Del mismo modo, a través de los Programas de Agua, la Unesco desarrolla y difunde el conocimiento y la información necesaria para proporcionar acceso al agua y saneamiento, subrayando constantemente la importancia del derecho al recurso y explícitamente lo que con ella se reconoce.

También, la Unesco cree en la necesidad de detener urgentemente la actual explotación insostenible de los recursos hídricos a partir del desarrollo de una gestión integrada de estrategias a nivel local, regional y nacional. Tales estrategias, allanarán el camino para la implementación real del derecho al agua que debe fundamentarse en el reconocimiento fideicomisario de los recursos hídricos que deben conservarse para las generaciones futuras.

El derecho al agua en Colombia

El reconocimiento formal del derecho humano al agua y al saneamiento realizado por la Asamblea General de las Naciones Unidas el 28 de julio de 2010, con la promulgación de la Resolución 64/292, se constituyó en un hito importante para abordar la falta de acceso al agua en los países en desarrollo, especialmente para las mujeres.

En nuestro país, la Constitución verde de 1991, denominada así por la jurisprudencia y algunos tratadistas, establece como derecho y obligación un medio ambiente sano, haciendo referencia al uso debido de los recursos naturales, esto es, renovables y no renovables que, según lo manifestado por Barón y Monroy (2018):

Se constituye irrefutable la defensa, la conservación y la protección del recurso hídrico en cabeza de todas las entidades y, puntualmente, de las corporaciones autónomas regionales, los departamentos y los municipios, como principales autoridades ambientales, para así mitigar el apremiante riesgo de escasez, el cual conduciría al país a condiciones de extrema pobreza, a la intensificación del conflicto armado, y a la desaceleración del crecimiento económico.

El derecho humano al agua se enmarca desde una estrecha perspectiva de salud pública y da prioridad a la provisión de agua limpia y segura para beber, saneamiento básico, higiene y otras actividades domésticas. Sin cuestionar la prioridad de los usos domésticos en el enfoque de los derechos humanos, esta interpretación podría considerarse vana frente a la gama de derechos humanos y socioeconómicos para los que el agua juega un papel importante.

En este orden de ideas, la búsqueda de un acceso y un suministro al agua potable se estructura bajo la idea de la degradación sistemática y se fundamenta en el hecho de la presencia o no de los sistemas acuáticos continentales. La degradación metódica de los sistemas acuáticos, ha generado que para el año 2025 un número indeterminado de personas van a verse afectadas por la falta de este líquido, razón por la cual las comunidades tradicionales de agricultores, se sienten en la completa necesidad de buscar soluciones (Arrojo, 2009).

El derecho al agua en Colombia, se estableció bajo la ideología de un bien social y económico que debe ser entregado a la población en forma equitativa, con el único objetivo de satisfacer necesidades básicas (Díaz, 2009). En este sentido, el agua se convierte en el recurso natural por excelencia y el principal mecanismo esencial para obtener el desarrollo de una vida saludable y coherente con las políticas del desarrollo sostenible

(Muñoz, 2009). Es por ello que el derecho a la vida refleja una realidad innegable: sin agua no existe la vida.

La fundamentación del problema se estructura desde la crisis que genera la incertidumbre frente al acceso al agua y al suministro de la misma, en especial en la población colombiana que ofrece una diversidad ambiental, pero que a su vez presenta gran problemática frente al acceso del servicio público fundamentado en las luchas sociales y jurídicas que buscan de forma eficaz obtener este derecho fundamental emanado analíticamente en accionar jurisprudencial.

Jurídicamente en Colombia la satisfacción de las necesidades básicas se fundamentan en un derecho esencial consignado en la Constitución Política de 1991, específicamente en su artículo 2, que define una relación entre el derecho administrativo y los servicios públicos lo que significa que ingresa el concepto domiciliario, como lo define Atehortua (2012): “(...) El contenido social de los fines del Estado se desarrolla de manera particular en los servicios públicos domiciliarios, en la medida en que se orientan a satisfacer las necesidades básicas esenciales de las personas”.

En este orden de ideas, la fundamentación de la administración pública como poder ejecutivo del Estado, logra involucrarse en la regulación de las actividades administrativas que buscan el orden y la garantía del poder público como medio de instrumento autoritario.

El desarrollo sostenible asociado al agua.

La agenda actual para el desarrollo sostenible ofrece una discusión que se establece con un pleno reconocimiento de los desafíos globales más grandes que enfrentan los humanos en el planeta tierra. Si bien la cantidad de metas y objetivos son específicos frente al tema

del Desarrollo Sostenible global (ODS), es claro que las mismas pueden reducirse a un número manejable, sin demeritar que todos los puntos propuestos son de hecho importantes y de alta prioridad.

Una parte importante de este proceso ha sido, desde aproximadamente el año 2000, extraer lecciones de la experiencia al tratar de lograr los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM).

Diversos informes y documentos se han producido durante este proceso y, aunque se debe reconocer que la humanidad se enfrenta a una gran cantidad de desafíos de alta prioridad que, en cierto sentido, “compiten” para ser bordados por los nuevos ODS, existe un amplio acuerdo sobre el papel críticamente importante que el agua ha jugado al tratar de alcanzar los ODM y los nuevos que la experiencia asignará.

Sin embargo, la mayoría de los expertos en el tema del agua, están de acuerdo en que el agua no ha recibido tanta atención como se necesita para alcanzar los ODM, establecidos por la ONU; por lo tanto, el papel del agua en el logro del futuro sostenible y su agenda de desarrollo debe ser mejorada. Un sistema propuesto en este aspecto; se centra explícitamente en “garantizar” disponibilidad y gestión sostenible de agua y saneamiento para todos (Propuesta ONU – ODM, Objetivo 6).

Lograr uno de los objetivos más importantes del desarrollo sostenible, como por ejemplo el de lograr el fin de la pobreza en todas sus formas y sus manifestaciones, será una función de cuán bien la comunidad global aborda los otros objetivos de la agenda de la ONU. Abordar los crecientes desafíos de escasez y disponibilidad de agua también será un punto crítico para el éxito. Esto requerirá un programa global sistemático, sofisticado y priorizado apoyado en múltiples estrategias de desarrollo nacional y local que se basan en condiciones y prioridades.

El objetivo central de la ONU con sus ODM, es reducir la pobreza y algunas de sus peores características: hambre y desnutrición, mortalidad infantil, falta de acceso a agua potable y saneamiento básico, entre otros. Este enfoque casi único en la reducción de la pobreza también caracteriza la propuesta de agenda de desarrollo hasta 2030, pero con metas y objetivos más ambiciosos (Open Working Group, 2014).

El objetivo 1 propuesto es el de poner fin a la pobreza en todas sus formas y en todas partes. Otros objetivos de apoyo que se propone es acabar con el hambre, alcanzar la seguridad alimentaria y garantizar vidas saludables, entre otros.

Implícitamente, los 17 objetivos propuestos y los objetivos asociados se basan en el reconocimiento de que lograr el objetivo central de acabar con la pobreza es la acción en muchos sectores. La referencia a los Objetivos del Desarrollo Sostenible debe ser tomada en serio.

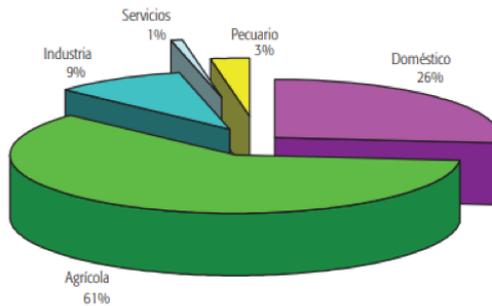
La demanda de agua ya excede la oferta disponible en muchas regiones y cuencas fluviales, especialmente en partes de Asia, África del Norte, Medio Oriente, y África subsahariana, donde la mayoría de la gente pobre vive en extrema pobreza y donde la población crece más rápidamente. La demanda de agua dulce a nivel mundial ha estado creciendo a una tasa de aproximadamente 1% anual desde la década de 1980, casi en su totalidad países en desarrollo (WWAP, 2014). Se espera que la demanda global de agua aumente en un 40% para 2030 y 55% para 2050 (UN Water, 2014). Esta mayor demanda proviene del crecimiento en el uso industrial y doméstico, la producción de energía y la agricultura; especialmente en los países en vía de desarrollo.

Las actuales extracciones mundiales de agua al año son de aproximadamente 4500 billones de m³. Para 2030, con un crecimiento económico promedio y sin cambios en la eficiencia, se prevé que

crecerá a 6900 billones de m³, 40% por encima del suministro actual accesible y confiable (incluidos los flujos de retorno y las utilizadas en las reservas ambientales) (UNEP, 2012). Esta figura global oculta una gran variación: alrededor de un tercio de la población para el 2030, principalmente en los países en desarrollo, lo que hará que dicha demanda resida en cuencas fluviales donde la brecha entre la demanda y la oferta será más del 50%.

La agricultura actualmente representa aproximadamente 3100 billones de m³, o el 71% del suministro anual de agua a nivel mundial. Esto aumentará a 4500 billones de m³ para el 2030 (un ligero declinar al 65% de las extracciones globales de agua) si la eficiencia no mejora. Esto es un 45% del aumento en la demanda de agua para el sector agrícola (FAO, 2012).

De manera similar ocurre en Colombia, pues la participación sectorial en la demanda potencial del agua se encuentra predominantemente en el sector agrícola, seguido del sector doméstico y, en porcentajes menores la industria, el sector pecuario y el de servicios, como se puede ver en la siguiente figura:



Fuente: IDEAM Informe anual sobre el estado del medio ambiente y los recursos naturales renovables en Colombia, 2005.

Es evidente que, el agua es un factor preponderante en el sector agrícola para el buen funcionamiento del ecosistema y, en

menores porcentajes, es fundamental para el ser humano en la realización de las actividades domésticas, industrial, pecuario y servicios; no obstante, el agua tiene un papel negativo que se manifiesta en las inundaciones, la sequía y como sumidero de contaminantes que causan daños al desarrollo económico, la salud y el bienestar humano general.

Los desafíos son profundos y se vuelven cada vez más urgentes. La distribución natural del agua, que es muy variable geográfica y estacionalmente: algunas áreas tienen grandes cantidades de agua, mientras que otras tienen poco o nada; y los periodos extremadamente altos de lluvia, a menudo son seguidos por largas temporadas sin lluvia. Estos patrones de inequidad, variabilidad, situaciones extremas y falta de fiabilidad están empeorando en muchas áreas debido a los impactos del cambio climático, especialmente en aquellas áreas ocupadas por la población más pobre y las comunidades menos resilientes.

El impacto de la distribución natural de la disponibilidad de agua se hace más extrema por la prevalencia socioeconómica y sus desigualdades: la escasez de agua, la pobreza y el subdesarrollo, son hechos socioeconómicos que se han convertido en producto de la naturaleza. Esto significa que mejorar el acceso al agua para múltiples propósitos solo puede lograrse con las políticas correctas, arreglos institucionales e inversiones efectivas y contundentes.

Conclusiones

Si bien el derecho humano al agua es cada vez más reconocido por la comunidad internacional, el saneamiento aún no se percibe ampliamente como un derecho humano. Dada la importancia crítica del saneamiento a la salud humana, la dignidad y el bienestar, así como su interconexión con el derecho al agua y otros derechos, los expertos se han centrado en él; aunque la discusión sobre el reconocimiento de un derecho distinto al saneamiento se encuentra en curso, los mismos apoyan la tendencia actual de reconocer el saneamiento como derecho distinto.

Existe un reconocimiento creciente de los múltiples procesos interdependencias o “nexus” entre los diversos Objetivos de Desarrollo Sostenible, por ejemplo, agua y saneamiento, alimentos y la seguridad nutricional, la energía, el medio ambiente y los diversos ecosistemas de los que dependen los seres humanos desde todos los asentamientos, paz y seguridad, en los cuales la disponibilidad y el uso productivo de agua de buena calidad es esencial para lograr el cumplimiento de los mismos.

Es fundamental que las comunidades locales tengan una participación real y significativa en las decisiones de gestión. Sin tal participación, las soluciones no pueden ser sostenibles. Estas llamadas a la acción no son una retórica vacía. Se debe movilizar el compromiso político necesario, las capacidades humanas y la buena voluntad para asegurarse de que las predicciones de la inminente crisis del agua no se hagan realidad.

Referencias

- Arrojo, P. (2009). Tipología y raíces de los conflictos por el agua en el mundo. En Delclòs Jaume (Coord.). Agua, un derecho y no una mercancía. Propuestas de la sociedad civil para un modelo público del agua. pp. 9-34. Barcelona, España: Icaria.
- Asamblea Nacional de las Naciones Unidas. Resolución 64/292 de 2010. Recuperado de http://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/64/292&Lang=S
- Atehortua, C. A. (2012). Servicios Públicos Domiciliarios y las TIC en el contexto del precedente judicial. Instituto Colombiano de Contratación Estatal y Servicios Públicos –INCODES- Biblioteca Jurídica DIKE. Medellín.
- Barón, C y Monroy, E. (2018). Evolución normativa del derecho ambiental y de aguas en Colombia. Casos de Ingeniería: El recurso hídrico en el contexto urbano y rural. Editorial: Fundación Universitaria Agraria de Colombia.
- Beltrao, J. et. al. (2014). Derechos humanos de los grupos vulnerables. Red de derechos humanos y educación superior. Programa financiado por la Comisión Europea. Universitat Pompeu Fabra, Barcelona.
- Boutruche, (2000). El estatuto del agua en el derecho internacional humanitario. Comité Internacional de la Cruz Roja. Recuperado de <https://www.icrc.org/es/doc/resources/documents/misc/5t-dpkn.htm>
- CARE Internacional, (2003). Memoria del taller regional sobre agua, pobreza y gobernabilidad. Organizado por el sector de salud, agua y saneamiento ambiental. Quito. Recuperado de http://www.eclac.org/DRNI/proyectos/samtac/actividades_nacionales/ecuador/1/taller2.pdf

- Carta Africana sobre los derechos humanos y de los pueblos (1981). Organización para la Unidad Africana. Recuperado de <https://www.acnur.org/fileadmin/Documentos/BDL/2002/1297.pdf?file=fileadmin/Documentos/BDL/2002/1297>
- Comité de derechos económicos, sociales y culturales CESCR. Resolución 1985/17. (1985). Recuperado de <https://www.ohchr.org/Documents/Publications/FactSheet16Rev.1sp.pdf>
- Convención sobre la eliminación de todas las formas de discriminación contra la mujer CEDAW (1981). Recuperado de <http://www.un.org/womenwatch/daw/cedaw/text/sconvention.htm>
- Convención sobre los derechos del niño. (1990). Recuperado de <https://www.ohchr.org/sp/professionalinterest/pages/crc.aspx>
- Convención sobre los derechos de las personas con discapacidad. (2008). Recuperado de <https://www.un.org/esa/socdev/enable/documents/tccconvs.pdf>
- Declaración de Abuja, (2006). Primera Cumbre de América del Sur – África, 26 a 30 de noviembre de 2006. Recuperado de [http://www.esafr.mrecic.gov.ar/userfiles/Declaracion%20de%20ASA%20I%20-%20\(Abuja%202006\)_1.pdf](http://www.esafr.mrecic.gov.ar/userfiles/Declaracion%20de%20ASA%20I%20-%20(Abuja%202006)_1.pdf)
- Declaración de Dublín sobre el agua y el desarrollo sostenible, (1992). Conferencia Internacional sobre el Agua y el Medio Ambiente CIAMA. Recuperado de <http://appweb.cndh.org.mx/derechoagua/archivos/contenido/CPEUM/E1.pdf>
- Declaración Universal de Derechos Humanos. (1948). Recuperado de <https://www.humanium.org/es/wp-content/uploads/2012/12/Declaraci%C3%B3n-Universal-de-Derechos-Humanos.pdf>

- Díaz, A.; Chingate, N.; Muñoz, D.; Olaya, W.; Perilla, C.; Sánchez, F. y Sánchez, K. (2009). Desarrollo sostenible y el agua como derecho en Colombia. En: Estudios socio-jurídicos, 11(1), p. 84-116.
- Drnas de Clément, Z. (s.f.). La Carta Árabe sobre los derechos humanos. Recuperado de file:///C:/Users/UNISANGIL-DOC/Downloads/zlatacartaarabeddh%20(4).pdf
- FAO (2012). It projects only a 6% increase in global irrigation withdrawals by 2050. Alexandratos and Bruinsma 2012: p.118.
- Granados Gálvez, J. (2017). El reconocimiento del derecho al agua de los países miembros de la alianza del Pacífico y la doctrina del control de convencionalidad. XLIII Curso de Derecho Internacional –OEA.
- Hodgkin, R., Newell, P., (2007). Implementation Handbook for the Convention on the Rights of the Child, tercera edición, UNICEF, Ginebra.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (2001). Estudio Nacional del agua. IDEAM. Bogotá, Colombia.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (2008). Informe Anual sobre el Estado del Medio Ambiente y los Recursos Naturales Renovables en Colombia, Estudio Nacional del Agua – Relaciones de Demanda de Agua y Oferta Hídrica. Bogotá D.C.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (2013). El Estudio Nacional del Agua un Compendio sobre el Recurso hídrico en Colombia. Bogotá D.C., 2005.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM], MinAmbiente (2014). Estudio Nacional del Agua. Recuperado de http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023080/ENA_2014.pdf

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (2015). Estudio Nacional del agua. IDEAM. Bogotá, Colombia.

Muñoz, O. (2009). El derecho al agua potable como derecho fundamental no enumerado. Derechos constitucionales no escritos reconocidos por el Tribunal Constitucional, Lima, Gaceta Jurídica, p. 169-180.

Open Working Group of the General Assambly on Sustainable Development Goals. (2014). Open Working Group proposal for Sustainable Development Goals. Recuperado de <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/1579SDGs%20Proposal.pdf>

Pacto Internacional de Derechos Civiles y Políticos. (1966). Recuperado de <https://www.ohchr.org/sp/professionalinterest/pages/ccpr.aspx>

Pacto Internacional de Derechos Económicos, Sociales y Culturales. (1976). Recuperado de <https://www.ohchr.org/sp/professionalinterest/pages/cescr.aspx>

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo – PNUD (2018). Objetivos de Desarrollo Sostenible, Colombia Herramientas de aproximación al contexto local. Recuperado de: <http://www.co.undp.org/content/dam/colombia/docs/ODM/undp-co-ODSColombiaVSWS-2016.pdf>

Protocolo de San Salvador (1999). Protocolo adicional a la Convención Americana sobre derechos humanos en materia de derechos económicos, sociales y culturales. Organización de las Naciones Unidas. Recuperado de http://www.hchr.org.co/documentoseinformes/documentos/html/pactos/protocolo_san_salvador.html

UN Water. (2014). A Post-2015 Global Goal for Water: Synthesis of key findings and recommendations from UN-Water.

WWAP - United Nations World Water Assessment Programme. (2012). Green Accounting and Data Improvement for Water Resources. Working Paper prepared for the session 'Green Accounting and Data Improvement: Critical Tools for Informed Decision Making and Sustainable Growth' at World Water Forum 6, Marseille, 13 March 2012. Colombella, Perugia, Italy: Unesco.

Infraestructura para el Desarrollo Sostenible

Publicación de la Fundación Universitaria
Agraria de Colombia, UNIAGRARIA.
Editado en la ciudad de Bogotá por
Entrelibros e-book solutions
Bogotá - 2018



UNIAGRARIA

Fundación Universitaria Agraria
de Colombia

LA U VERDE
DE COLOMBIA

ISBN: 978-958-5550-02-5



Sede Principal: Calle 170 No. 54A-10

Bogotá - Colombia

PBX: 6671515

informes@uniagraria.edu.co