

Cátedra del Agua

Número 07
Año 2013

Gestión integral
del recurso hídrico:
de la planeación a la acción

Coordina:



Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia

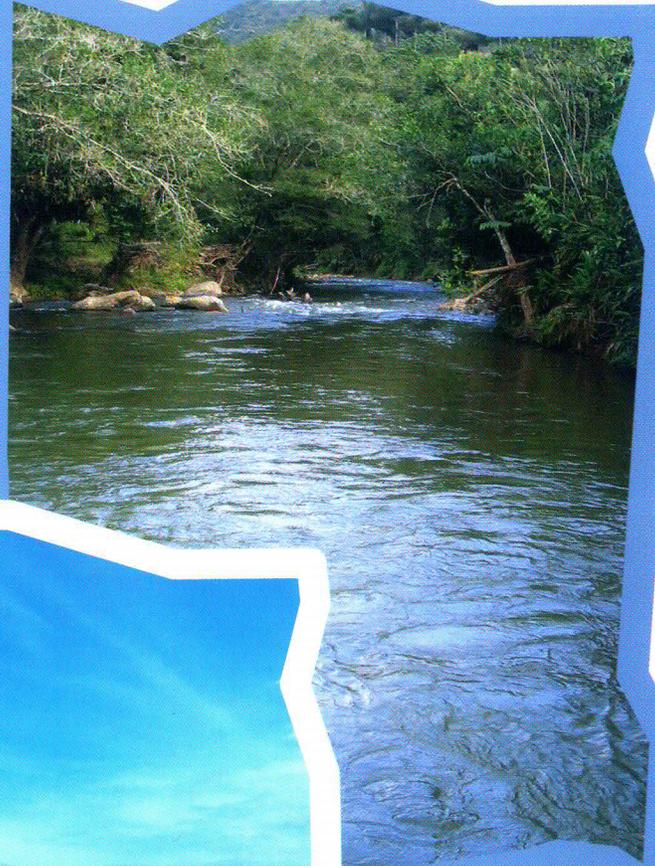
Revista

1686

Memorias

de las Jornadas Técnicas de Discusión 2012-2013 realizadas por el Convenio Interinstitucional Cátedra del Agua, coordinado por el Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia - CTA: "Retiros a corrientes de agua superficial: de la planificación a la acción - una mirada multisectorial.", "Actualización del estado del arte del recurso hídrico en Antioquia", "La cooperación en la esfera del agua", "Aplicación de la modelación hidrológica para la gestión integrada de recursos hídricos" . Medellín - Colombia

ISSN 1909-9363





Memorias

Jornadas Técnicas de Discusión 2012-2013, I Encuentro Internacional de Modelación Hidrológica y Aplicaciones y IX Encuentro Regional del Agua realizados por el Convenio Interinstitucional Cátedra del Agua, coordinado por el Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia – CTA:

**“Retiros a corrientes de agua superficial: de la planificación a la acción - una mirada multisectorial.”,
“Actualización del estado del arte del recurso hídrico en Antioquia”, “La cooperación en la esfera del agua”,
“Aplicación de la modelación hidrológica para la gestión integrada de recursos hídricos” .**

Medellín – Colombia

Coordina:



Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia

**Número 07
Año 2013**

REVISTA CÁTEDRA DEL AGUA

Número 07 - Año 2013

Memorias de las Jornadas Técnicas de Discusión 2012-2013 realizadas por el Convenio Interinstitucional Cátedra del Agua, coordinado por el Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia - CTA: "Retiros a corrientes de agua superficial: de la planificación a la acción - una mirada multisectorial.", "Actualización del estado del arte del recurso hídrico en Antioquia", "La cooperación en la esfera del agua", "Aplicación de la modelación hidrológica para la gestión integrada de recursos hídricos". Medellín - Colombia

Elaborado por:

Claudia Patricia Campuzano Ochoa
Coordinadora Técnica
Convenio Interinstitucional Cátedra del Agua
Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia - CTA

Jonathan Estepa Hernández
Área de Comunicaciones y Diseño
Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia - CTA

Santiago José Echavarría Escobar
Director
Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia - CTA

Comité Editorial:

Juan Fernando Barros - Escuela de Ingeniería de Antioquia
José Lino Jurado - Consultor independiente
Carlos Benjumea - Universidad Católica de Oriente
Yesidh Quintero - Corantioquia
María del Pilar Arroyave - Escuela de Ingeniería de Antioquia
Julia Cristina Cadavid - Cornare
Juan David Cadavid - Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia
Fernando Guzmán - Tecnológico de Antioquia
Juan Esteban González - Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia

Primera edición

ISSN 1909-9363
Medellín, 2013

Diseño y diagramación

Jonathan Estepa Hernández

Impresión

Impresos Begón Ltda.
Impreso en Colombia

Todos los derechos reservados. Queda prohibida la reproducción total de esta publicación, sin la autorización expresa del Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia - CTA. Para la reproducción parcial debe citarse la fuente.

PRESENTACIÓN

De acuerdo con la Global Water Partnership, la Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH) es un proceso de cambio que busca transformar los sistemas insostenibles de desarrollo y de gestión de los recursos hídricos que actualmente están llevando a un deterioro en la oferta y calidad de dicho recurso. Tiene un enfoque intersectorial y holístico, diseñado para reemplazar el enfoque tradicional y fragmentado de la gestión del agua que ha derivado en servicios de menor calidad, en usos inadecuados y en la disminución de la disponibilidad del recurso.

La GIRH se basa en la idea de que los recursos hídricos son un componente integral y estructural de los ecosistemas, un recurso natural, un bien social y económico, ya que tiene un valor económico en todos sus usos (los cuales compiten entre sí generando conflictos sociales). Implica asimismo, reformar los sistemas de producción y consumo humanos para hacer posible que las personas obtengan beneficios sostenibles e igualitarios de estos recursos.

En cuanto al desarrollo de políticas y de la planificación, adquirir un enfoque de GIRH requiere que el desarrollo y la gestión del agua tomen en consideración los diversos usos de ella y el abanico de necesidades de las personas acordes a la disponibilidad del recurso en un área geográfica, que se realice con enfoque de cuenca incluyendo la relación entre las políticas macroeconómicas y que localmente y a nivel de cuenca, estén alineadas con el logro de objetivos más amplios en el contexto nacional.

Este abanico de necesidades, incluye el análisis de las problemáticas que se dan en términos de planificación y de gestión en torno a la cuenca hidrográfica como unidad de planificación ambiental; los ríos y quebradas responden no solo a sus necesidades naturales, también a las necesidades que le imponemos a través de intervenciones puntuales y poco sistémicas que incrementan los riesgos de desastres naturales tales como las inundaciones, principalmente en las ciudades.

Los sistemas urbanos de drenaje están bajo una creciente presión debido a los efectos del cambio climático, el crecimiento demográfico, el desarrollo de la urbanización (lo que genera cambios en el uso del suelo), la contaminación ambiental, las limitaciones de recursos y la obsolescencia de la infraestructura.

Respecto a la investigación en Colombia desarrollada sobre este aspecto, se debe resaltar el trabajo en temas de análisis de relaciones lluvia-escorrentía para cuencas urbanas, la aplicación de modelos simplificados en hidrología urbana, modelación hidrodinámica del drenaje urbano y reflexiones acerca de los retos y desafíos del cambio climático para las zonas urbanas, realizados por diferentes entidades y universidades del país.

Con el entendimiento de los impactos ambientales producidos por la urbanización, se ha generado un nuevo enfoque, el cual está orientado a mejorar la gestión de las aguas urbanas. Este enfoque contempla el concepto de drenaje sostenible, que incluye a largo plazo factores ambientales y sociales que buscan mantener la integridad ecológica, ambiental e hidrológica de un lugar, respecto a su condición previa al desarrollo urbano (Delleur, 2003), por medio del control de inundaciones, almacenando y mejorando la calidad del agua de escorrentía, tratando de emular las condiciones hidrológicas del lugar antes de la urbanización, minimizando los impactos propios de la infraestructura y de la actividad antrópica en la calidad del agua (Mentens et al., 2006; Berndtsson et al., 2006).

Como el sistema de drenaje urbano es complejo y tiene múltiples interacciones con los aspectos sociales, económicos y ecológicos presentes en toda la cuenca, el reto no recae sólo en las cuestiones técnicas o en la incertidumbre del cambio climático, sino en la consideración de todo el sistema mega-urbano de agua y sus interrelaciones entre las diferentes partes y subsistemas de la cuenca hidrográfica, por lo tanto se hace necesario evaluar la práctica tradicional del drenaje urbano, la cual se considera cada vez más alejada de los valores ambientales de la sociedad y dificulta el avance en la búsqueda de entornos urbanos más sostenibles (Thomas et al., 1997, Newman y Kenworthy 1999, Wong y Eadie 2000).

Para lograr esto es necesario recurrir no solo a modelos hidrológicos y análisis cada vez más cercanos a la realidad, sino también a una mejor planificación del territorio en el cual habitamos y una unión de voluntades y competencias que le apunten al mismo objetivo. La cooperación entre diferentes actores permite un uso más eficiente y sostenible de los recursos hídricos y se traduce en beneficios mutuos y mejores condiciones de vida. También es fundamental para la preservación de los recursos hídricos, la protección del medio ambiente y puede contribuir a superar tensiones culturales, políticas, sociales y establecer la confianza entre las personas, las comunidades, las regiones o los países.

Con investigación, acción, educación, aprendizaje por la práctica, normas claras y oportunas, control, y sobre todo con unión de esfuerzos de todos los responsables (comunidades, entidades públicas, organizaciones sociales, sectores productivos, universidades, entre otros) es que protegemos el agua y creamos una conciencia sobre la corresponsabilidad que todos y cada uno de los que vivimos en este planeta tenemos en torno a la protección y conservación de nuestros recursos naturales.

Un objetivo en común que debe ser alcanzado en un mismo espacio geográfico, invita a sumar esfuerzos, recursos técnicos y financieros para potenciar la gestión y lograr mayor efectividad en la intervención institucional, garantizando así el cumplimiento de los propósitos coincidentes, los cuales se traducen en la generación de óptimas condiciones de vida para nuestra población.

CONTENIDO

AVANCES EN EL CONOCIMIENTO DE LA OFERTA HÍDRICA EN EL DEPARTAMENTO DE ANTIOQUIA, ACTUALIZACIÓN 2010 - 2012	7
RESUMEN	7
ABSTRACT	7
INTRODUCCIÓN	7
DESARROLLO DEL TEMA	8
CONCLUSIONES	14
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15
CALIDAD DEL RECURSO HÍDRICO EN ANTIOQUIA 2008-2012	17
RESUMEN	17
ABSTRACT	17
INTRODUCCIÓN	17
DESARROLLO DEL TEMA	18
CONCLUSIONES	24
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	25
MACROPROYECTO CRECIDAS, TORRENTES Y ASENTAMIENTOS HUMANOS ACTUALIZACIÓN 2010-2011	27
RESUMEN	27
ABSTRACT	27
INTRODUCCIÓN	27
DESARROLLO DEL TEMA	28
CONCLUSIONES	34
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	35
SERVICIOS ECOSISTÉMICOS EN EL DEPARTAMENTO DE ANTIOQUIA, COLOMBIA	37
RESUMEN	37
ABSTRACT	37
INTRODUCCIÓN	38
DESARROLLO DEL TEMA	39
CONCLUSIONES	45
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46
GENERACIÓN, TRANSPORTE Y DEPÓSITOS DE SEDIMENTOS EN EL DEPARTAMENTO DE ANTIOQUIA	49
RESUMEN	49
ABSTRACT	49
INTRODUCCIÓN	49
DESARROLLO DEL TEMA	50
CONCLUSIONES	56
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57

EVALUACIÓN DE INCERTIDUMBRE PREDICTIVA DE CAUDALES ESTIMADOS EN CUENCAS NO AFORADAS MEDIANTE APLICACIÓN DE UN POS-PROCESADOR BAYESIANO	61
RESUMEN	61
ABSTRACT	61
INTRODUCCIÓN	62
DESARROLLO DEL TEMA	63
CONCLUSIONES	71
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72
MÉTODOS PARA LA RECONSTRUCCION DE REGISTROS DE PALEO-INUNDACIONES	75
RESUMEN	75
ABSTRACT	75
INTRODUCCIÓN	76
DESARROLLO DEL TEMA	76
CONCLUSIONES	82
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83
EVALUACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA EN LA CUENCA DEL RÍO PORCE	85
RESUMEN	85
ABSTRACT	85
INTRODUCCIÓN	86
DESARROLLO DEL TEMA	86
CONCLUSIONES	95
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	96
MODELIZACIÓN DISTRIBUIDA DEL CICLO DE SEDIMENTOS: APLICACIÓN AL ANÁLISIS DEL EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL ATERRAMIENTO DEL EMBALSE DE BARCELONA(ESPAÑA)	97
RESUMEN	97
ABSTRACT	97
INTRODUCCIÓN	98
DESARROLLO DEL TEMA	98
CONCLUSIONES	105
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105
ESTUDIOS DE RIESGOS HIDROLÓGICOS BAJO CAMBIO CLIMÁTICO EN EL MARCO DE LA INICIATIVA CES. EL CASO DE TRUJILLO, PERÚ	107
RESUMEN	107
ABSTRACT	107
INTRODUCCIÓN	107
DESARROLLO DEL TEMA	107
CONCLUSIONES	108
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	114
	115

AVANCES EN EL CONOCIMIENTO DE LA OFERTA HÍDRICA EN EL DEPARTAMENTO DE ANTIOQUIA, ACTUALIZACIÓN 2010 - 2012

Autor: Miriam Benjumea H.
Magister en Medio Ambiente y Desarrollo
Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia

Correo electrónico: miriambenjumea@une.net.co, mbenju@gmail.com

RESUMEN

Se hace una compilación de los estudios y herramientas desarrolladas en el departamento de Antioquia, que representan avances en el conocimiento de la oferta hídrica, tanto superficial como subterránea, describiéndose por subregiones y haciendo énfasis los producidos durante el periodo 2010 - 2012. Lo anterior se hace a partir de la información disponible en las Corporaciones Autónomas Regionales de Antioquia, el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA), la Gobernación de Antioquia, las universidades y los centros de investigación.

PALABRAS CLAVES

cantidad agua, oferta hídrica, caudales, agua superficial, agua subterránea.

ABSTRACT

A compilation of studies and tools representing advances in the knowledge of the superficial and underground hydric offer in the Department of Antioquia (Colombia) is carried out. A description by sub-regions is made and emphasis is put on studies developed during the period 2010-2012. The compilation is based on information available from the Regional Autonomous Corporations, the Metropolitan Area of the Aburrá River, The Government of the Department of Antioquia, universities and research centers.

KEYWORDS

volume of water, hydric offer, flow, surface water, groundwater

INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso natural único y escaso que es esencial para la vida en la tierra, se distribuye de manera irregular presentándose zonas con una abundante oferta y otras donde esta es escasa. El conocimiento del comportamiento de la oferta hídrica en una región es imprescindible para satisfacer exitosamente la demanda y realizar una gestión integral del recurso.

En el presente artículo se hace una síntesis del Macroproyecto Inventario general de aguas en Antioquia que hace parte del libro "Actualización del estado del arte del recurso hídrico en el departamento de Antioquia, 2010-2012" compilado por el Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia, en el cual se recopiló y revisó la información disponible en lo referente a la oferta hídrica, tanto superficial como subterránea.



Se inicia con una breve descripción de la oferta hídrica en el departamento, se continúa con el inventario de los estudios realizados y disponibles en los centros de documentación y páginas Web de Corporaciones Autónomas Regionales de Antioquia, el AMVA, la Gobernación de Antioquia y las universidades.

La compilación y análisis del estado del arte de la oferta hídrica en el departamento permite identificar vacíos en el conocimiento de la misma, lo cual a su vez ayuda a definir políticas y acciones tendientes para superar dichas deficiencias.

LA OFERTA HÍDRICA EN ANTIOQUIA

Por su ubicación geográfica y topografía, el departamento de Antioquia mantiene promedios de lluvia anuales por el orden de los 2.500 mm, presentándose tres grandes núcleos lluviosos, en el Occidente (zona del Chocó biogeográfico), en el sur oriente (límites con el departamento de Caldas hasta los alrededores de Guatapé) y los límites de las subregiones del Bajo Cauca, Norte y Nordeste, los cuales llegan a tener precipitaciones alrededor de los 6.000 mm al año. Estas áreas tienen rendimientos promedios cercanos a los 63 l/s/km² en sus cuencas altas, para un volumen total producido y aproximado de 3.816 m³/km²/s para todo el departamento (Porrás, 2012).

La oferta hídrica superficial en el departamento de Antioquia está representada principalmente por la gran cantidad de ríos, quebradas y humedales. Los ríos y quebradas definen 4 grandes cuencas: Cauca medio y bajo, Magdalena Medio, Porce - Nechí y Atrato medio y bajo. A estas se suman otras cuencas destacadas como la del río León y la del Caribe, que ascienden a 679.532 hectárea y una pequeña porción de la cuenca alta de los ríos Sinú y San Jorge que nacen en el Parque Nacional Paramillo (Porrás, 2012). Las zonas hidrográficas en las cuales se ubican estas cuencas, según el

Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt et al (2011), presentan la siguiente oferta hídrica:

- Magdalena Medio: caudal año medio de 3.199 m³/s y una oferta año medio de 100.886 Mm³.
- Cauca: caudal año medio de 1.581 m³/s y una oferta año medio de 49.862 Mm³.
- Nechí: caudal año medio de 826 m³/s y una oferta año medio de 26.065 Mm³.
- Atrato - Darién: caudal año medio de 3.993 m³/s y una oferta año medio de 125.952 Mm³.

Adicionalmente, en las partes bajas del Departamento existen importantes sistemas cenagosos que aumentan esa riqueza hídrica, localizados principalmente en: el Atrato medio, en el cual se destaca la ciénaga de Buchadó en el municipio de Vigía del Fuerte; el Bajo Cauca, donde están las ciénagas de Nechí y del Bagre; en el Magdalena Medio, están las ciénagas de Yondó y Puerto Berrío; y en el Caribe, dónde está la ciénaga de Marimonda en el municipio de Necoclí.

En la planicie aluvial del Bajo Cauca, entre los ríos Man, Cauca y Nechí existen más de 70 ciénagas en 25 complejos que cubren un área aproximada de 40.000 hectáreas en aguas medias y almacenan un volumen cercano a los 800 Mm³.

Con respecto a la oferta hídrica subterránea en el departamento de Antioquia, se han identificado 415.039 ha de acuíferos y 38.395 ha de zonas de recarga. Los principales acuíferos son: el Valle de Aburrá, Bajo Cauca - Nechí, Urabá, Magdalena Medio, el altiplano del Oriente, Valle de San Nicolás y La Unión. De estos, el más extenso es el de la subregión del Urabá, que incluye casi toda la cuenca del río León y las áreas del río Atrato (Porrás, 2012).

AVANCES EN EL CONOCIMIENTO DE LA OFERTA HÍDRICA.

La actualización del estado del arte de la cantidad de agua en el departamento Antioquia hace referencia a aquellos estudios, avances metodológicos y herramientas que han permitido profundizar en el conocimiento de la misma. A continuación se hace una breve descripción de los estudios identificados.

En el marco de la formulación de los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCH) se encuentran avances importantes referentes a la estimación de la oferta hídrica de las cuencas a las cuales se les formula el mismo, ya que estos planes, además de ser un importante instrumento de planificación, compilan e integran los temas asociados con el recurso agua, entre ellos la oferta hídrica.

Según Porrás (2012), para el 2011 se tenían formulados 53 Planes de Ordenación y Manejo (POMCH) en el departamento de Antioquia, 7 en el AMVA, 1 en CORANTIOQUIA, 37 en CORNARE y 8 en CORPOURABA. Es de anotar que dichos POMCH son los adoptados por acuerdo de los consejos de dichas corporaciones o por comisiones conjuntas como es el caso del POMCA del río Aburrá. Además de estos, las corporaciones han realizados otros POMCH que no han sido adoptados. En la Tabla 1 se hace un inventario de las cuencas que han sido objeto de ordenación, clasificándolas por subregiones y por jurisdicción de las CAR. Las subregiones del Norte y Occidente presenta el menor número de POMCH.

Tabla 1. Planes de ordenación y manejo por subregiones y corporaciones.

Cuencas o microcuencas con POMCH	Subregión	Número de POMCH por subregión	CAR
Quebradas: La Quintana, La Malpaso, Altavista, La India, La Pastora y La Cangreja, La Herrera o Granizal, La Iguaná, La Rosa, La Bermejala y La Presidenta, La Picacha, La Guayabala, La Volcana, La Madera y Santa Elena, El Salado, Doña María, La García y El Hato, La Grande, La Doctora, La Valeria, La López, Piedras Blancas, La Ayurá y La Honda.	Valle de Aburrá	28	Área Metropolitana del Valle de Aburrá y CORANTIOQUIA.
Río Aburrá Medellín.	Valle de Aburrá		Área Metropolitana del Valle de Aburrá, CORNARE y CORANTIOQUIA.
Quebradas El Salado y La Correa.	Valle de Aburrá		CORANTIOQUIA
Ríos Grande y Chico	Norte y Occidente	1	CORANTIOQUIA
Quebrada Orobajo.	Norte	4	
Ríos Guadalupe, San Alejandro y otros.			
Ríos Aurra, Mulatos y Mulaticos.	Occidente	5	
Quebrada La Noque.			
Río Peque.			CORPOURABA

Cuencas o microcuencas con POMCH	Subregión	Número de POMCH por subregión	CAR
Quebradas Sinafaná y Organales.	Suroeste	11	CORANTIOQUIA
Ríos Amagá, Poblano, Buey, Piedras, Pedral, Amacerí, Frío y La Cruz.			
La Herradura.	Suroeste		CORPOURABA
Ríos Cacerí, Amacerí, El Bagre, Tarazá, Tiguí	Bajo Cauca	5	CORANTIOQUIA
Ríos Cupiná y San Bartolomé.	Magdalena Medio y Nordeste	2	
Plan de ordenación y manejo de las áreas de regulación hídrica, con influencia sobre el proyecto de generación termoeléctrica de La Sierra. Quebrada El Oro.	Magdalena Medio y Nordeste	2	
Formulación del plan de ordenación y manejo de las áreas de regulación hídrica, con influencia sobre el proyecto de hidroeléctrica Porce II-III.	Nordeste	1	
Ríos Tamar e Ité.			
Quebradas Malpaso, Barbaças, La Bolsa, Bodegas, El Salto, La Brizuela, La Cimarrona, La Madera, Chuscalito, La Espinosa, La Palma, Pantanillo, El Buey, La Pereira, El Tabor, La Ceja, Pozo, Minitas, Cuervos, La Cristalina - La Risaralda, La Guayabal, Dosquebradas - La Aguada, Dosquebradas, La Corozal, El Prado, Jerusalén, Los Dolores, Yeguas, Llanadas, La Honda, El Tablazo, San Antonio, San Pedro, Rosario y Nutrias.	Oriente	34	CORNARE
Ríos Calderas, San Pedro, San Javier, Sonsón.			
Ríos Apartadó, San Juan, Mulaticos, Turbo, Apartadó, Chigorodó y Carepa.	Urabá	7	CORPOURABA

Fuente: Actualización del estado del arte del recurso hídrico en el departamento de Antioquia, 2010-2012

Los planes de ordenación y manejo revisados en su diagnóstico presentan diferentes niveles de información, y en lo que respecta al tema de la oferta hídrica, en algunos solo se estima el caudal medio mediante algún método de regionalización, en otros se hace con mayor rigurosidad utilizando metodologías más aproximadas e información más completa.

Es así, que en los POMCH realizados por el AMVA y el municipio de Medellín, se elaboró de forma detallada la caracterización y cuantificación de la oferta de cada una de las cuencas mencionadas, calculándose los caudales medios, mínimos, máximos y ecológicos. En general, las metodologías utilizadas fueron: para los caudales medios, la metodología del Balance Hidrológico a largo plazo; para los caudales mínimos, el método denominado Modelo de Tanques (agregado), en el cual para la elaboración del mapa se realizó una regresión lineal del caudal mínimo y el área de drenaje de cada uno de los tributarios para los periodos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, y 100 años, utilizando para ello el software ArcGIS; para los caudales máximos se aplicaron dos metodologías: el método racional y las hidrógrafas unitarias sintéticas; y finalmente, para los caudales ecológicos se empleó la metodología propuesta en la Resolución 865 del 22 de julio de 2004 expedida por el Ministerio del Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

Por otra parte, CORANTIOQUIA en la mayoría de los 36 Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas que ha realizado (CORANTIOQUIA, 2012), solo estimó el caudal medio. Después del Decreto 1720 de 2012, CORNARE inició un proceso de ordenación de cuencas en los 26 municipios de su jurisdicción, priorizando aquellas que surten los acueductos urbanos y corregimentales; al 2012, CORNARE habían realizado 37 planes. En la mayoría de estos planes se estimó la oferta hídrica mediante el cálculo de los caudales medios, mínimos y ecológicos y el Índice de Escasez.

En la subregión del Valle de Aburrá, Jurisdicción compartida entre CORANTIOQUIA y el AMVA, los avances en el conocimiento de la oferta hídrica entre 2010 y 2012, se han dado en el recurso hídrico subterráneo a través REDRIO, Fase III, y el estudio "Determinación y Protección de las Potenciales Zonas de Recarga en el Norte del Valle de Aburrá". En el primero, se desarrolla un nuevo modelo hidrogeológico que precisa las condiciones acuíferas de unidades litológicas que se extienden más allá de los depósitos aluviales, trascendiendo a los depósitos de vertiente y posiblemente a saprolitos de rocas duras y medios fisurados y las superficies piezométricas para el acuífero libre del Valle de Aburrá (A1 y A3) y el acuífero semiconfinado (A2) (AMVA y Universidad de Antioquia, 2011).

En el segundo estudio se define un modelo hidrogeológico conceptual de los acuíferos del norte del Valle de Aburrá y una caracterización detallada del acuífero libre y de sus potenciales zonas de recarga, delimitándose las directas e indirectas (AMVA y Universidad de Antioquia, 2012).

En las subregiones del Suroeste, Norte, Occidente, Bajo Cauca, Magdalena Medio y Occidente pertenecientes a la Jurisdicción de Corantioquia, además de los POMCH, los avances más importantes en el conocimiento de la oferta hídrica se han dado mediante los siguientes estudios:

- El Recurso Hídrico en la Jurisdicción de CORANTIOQUIA 1995 - 2007 (Mejía, 2008), se hizo una primera aproximación a la oferta hídrica de la jurisdicción por municipio a partir de la precipitación, relacionando promedios multianuales con las áreas de cada jurisdicción municipal. Se realizó un modelo digital de evapotranspiración promedio aplicando la ecuación desarrollada en el Centro Nacional de Estudios del Café (Cenicafé, 1998), la cual se corresponde bien con la complejidad topográfica y la variabilidad altimétrica de la geografía regional.

- Sistema de Administración del Recurso Hídrico de CORANTIOQUIA. Es una herramienta para la administración del recurso hídrico denominada DUBERDICUS. Este sistema cuenta con: metodologías de captura, almacenamiento y procesamiento de información hidrometeorológica; modelos digitales de elevación, temperatura, precipitación, evapotranspiración y escorrentía; y modelos que con la información anterior, permiten estimar caudales: mínimos, promedios, ecológicos, máximos de reparto y de reparto sustentable para las corrientes principales de la jurisdicción. Este sistema se convierte en un soporte técnico para la administración del recurso hídrico en su jurisdicción y de mejora del conocimiento del mismo.

Con respecto a la oferta del recurso hídrico subterráneo, CORANTIOQUIA ha realizado varios estudios con la finalidad de evaluar el potencial hídrico subterráneo de su jurisdicción. Es así, que se han realizado estudios en los acuíferos de los municipios de Yondó, Puerto Berrío y Puerto Nare en la Territorial de Zenufaná; los municipios de Santa Fe de Antioquia, Sopetrán, San Jerónimo, Olaya y Liborina en la Territorial Hevéxicos; y el acuífero del Bajo Cauca antioqueño en la Territorial Panzenú (CORANTIOQUIA, 2007). De estos acuíferos, el más estudiado ha sido el del Bajo Cauca antioqueño, ya que este es la principal fuente de abastecimiento de la población de esta subregión. Desde el 2003, la Universidad de Antioquia y CORANTIOQUIA han desarrollado una serie de estudios que les han permitido definir un modelo hidrogeológico conceptual que cubre 3.273 de los 8.400 Km² de la subregión. Para esta zona se realizó entre el 2010 y 2011 el Plan de Manejo de las Aguas Subterráneas de la Dirección Territorial Panzenú, el cual recopila el conocimiento que a la fecha se tiene del mismo, incluyendo lo que respecta a la oferta del recurso subterráneo. En este estudio se hace una descripción del sistema acuífero del Bajo Cauca antioqueño, el cual está conformado por tres unidades hidrogeológicas: la unidad hidrogeológica U123, la unidad U4 y la unidad U5. También se hace una descripción de la piezometría y del flujo de las aguas subterráneas, describiéndose la variación de los niveles freáticos en invierno y verano, las zonas de recarga y la estimación de la misma.

En la subregión del Oriente, jurisdicción de CORNARE, los principales avances en el conocimiento de la oferta hídrica se ha dado a través del desarrollo del Atlas Hidrológico para el manejo del recurso hídrico en el área de su jurisdicción, el cual fue actualizado en 2009 y 2011 con el estudio "Las cuentas físicas del agua en la jurisdicción de CORNARE". En el Atlas Hidrológico actualizado, la información se agrupa en cuatro categorías. La primera corresponde a aquella información de carácter regional y territorial. Una segunda categoría comprende la información necesaria para la delimitación de las cuencas en la región como son: los Modelos Digitales de Elevación (MDE) y las redes hídricas este último en formato vectorial. En el tercer grupo se encuentran las series históricas de variables hidro-climáticas (precipitación, temperatura y caudal) adquiridas a través de estudios previos. Finalmente, la información levantada por la Corporación como parte de sus estrategias de gestión define la cuarta categoría (CORNARE y Universidad Nacional, 2009). Para la estimación de caudales medios, en el Atlas Hidrológico se utilizó el método del balance hídrico de largo plazo que permite definir el caudal medio en un punto de una corriente, con base en las características medias de precipitación y evapotranspiración en la cuenca definida por dicho punto. La aplicación de este método se facilita por la buena representación de la variabilidad espacial de las variables hidro-climáticas que define la plataforma HidroSIG 4.0 y por la correcta delimitación de cuencas partiendo del MDE. Para caudales mínimos se utilizó el método de "Regionalización de Características Medias" (CORNARE y Universidad Nacional, 2009).

En lo referente al tema de aguas subterráneas, se cuenta con el estudio "Diagnóstico de los Sistemas de Abastecimiento de Aguas Subterráneas de Cabecera Urbana de Puerto Triunfo, Puerto Perales, Puerto Pita y Santiago de Berrío", realizado por CORNARE y la Universidad Nacional en 2011. En este estudio se localizaron y georeferenciaron seis (6) pozos, los cuales abastecen 4 sistemas de acueductos: Puerto Perales, Puerto Triunfo (zona urbana), Santiago Berrío y Estación Pita.

En la subregión del Uraba, CORPOURABA ha venido desarrollando una serie de actividades, con la finalidad de conocer la hidrogeología del acuífero del eje bananero y mejorar la gestión del agua subterránea de forma integral. Entre el 2010 y 2012 realizó el "Plan de Manejo del Acuífero del Golfo de Urabá" (CORPOURABA, 2012). En este estudio se presenta un diagnóstico exhaustivo del acuífero y la propuesta de manejo, el cual cubre aproximadamente 1.030 km² (103.000 ha) y se caracteriza por ser continental y tener una franja costera que recibe influencia marina.

Además de los estudios y herramientas desarrolladas por las CAR, se identificaron otros estudios que incorporan nuevas técnicas o metodologías para la estimación de la oferta hídrica, entre los que se destacan:

Desarrollo de un sistema experto para la predicción de caudales medios mensuales en Colombia.

En este estudio se incluyen dos nuevas metodologías para la predicción de caudales medios mensuales en Colombia. La primera de ellas son los polinomios localmente ponderados. La segunda son las redes neuronales polinómicas, son un algoritmo de regresiones polinómicas sucesivas sobre un conjunto de variables independientes, cuyo objeto es combinar pronósticos parciales de la variable dependiente mediante un algoritmo de agrupación de datos basado en los polinomios de Ivakhnenko y la teoría de mínimos cuadrados. La aplicación de estas técnicas permite desarrollar una herramienta de pronóstico para la predicción de caudales medios superior a las usadas tradicionalmente en el país (Rojo, 2011).

Simulador piloto de la oferta y la demanda hídrica en una microcuenca rural para la validación de metodologías y la evaluación de políticas de manejo sostenible del recurso agua.

En este estudio se desarrolla una herramienta que permite evaluar la relación entre oferta hídrica – demanda hídrica – gestión institucional en cuencas rurales, es útil para la toma de decisiones en la gestión sostenible del recurso agua. La dinámica de la oferta y la demanda hídrica se define mediante una metodología de modelación que se hace para diferentes escenarios. Para la oferta hídrica se utiliza un modelo de balance hidrológico de largo plazo (Zuluaga, 2011).

HidroSIG 4.0.

Es un Sistema de Información Geográfica que ofrece una serie de herramientas para el procesamiento y análisis de información hidrológica y climatológica. Este software fue desarrollado por la Escuela de Geociencias y Medio Ambiente de la Universidad Nacional, sede Medellín, en el marco del proyecto Balances Hidrológicos de Colombia (UPME et al, 1999). La última versión realizada en 2011 - HidroSIG 4.0 - está constituida por una serie de plug-ins para la plataforma MapWindow, los cuales se clasifican según su funcionalidad, en tres grupos: procesamiento hidrológico, herramientas operativas y exploración de bases de datos.

Plataforma SIG para el Modelamiento de Sistemas Acuíferos.

En este estudio se desarrolla una plataforma de análisis que permite el modelamiento espacial de las variables y los fenómenos asociados a los sistemas acuíferos. Es útil, no solo para la determinación de la geometría de las unidades hidrogeológicas en función de la geología y la correlación estratigráfica, sino también en la identificación de las características de uso, la determinación y espacialización de las condiciones de flujo, los parámetros hidráulicos y la evaluación de la recarga.

Para ello, desarrolla una plataforma SIG acoplable al sistema de modelamiento de aguas subterráneas MODFLOW, conformado por cuatro bloques básicos: el aprestamiento de los datos y la construcción de geodatos, la construcción del modelo conceptual basado en la geometría espacial, las funcionalidades para la transacción de información con otras plataformas de modelación e incluso de validación del modelo conceptual, y por último, las funcionalidades que permiten desarrollar análisis complementarios al estudio de los sistemas acuíferos (Escobar, 2011).

Desarrollo de un modelo geoespacial para la gestión integrada del recurso hídrico. Caso de estudio: el Bajo Cauca antioqueño.

En este estudio se desarrolla un modelo geoespacial utilizando el software ArcGIS, el cual permite el modelamiento geoespacial de variables hidrológicas para la gestión integrada del recurso hídrico (agua superficial y subterránea). Empleando procesos estadísticos y técnicas geoinformáticas para la estimación de la oferta hídrica, el cálculo de la demanda de agua y el cálculo de los balances zonales (González, 2011).

CONCLUSIONES

Los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas son el instrumento más completo de planificación del recurso hídrico, ya que incluye su interrelación con los demás recursos y la cuenca. Aunque el énfasis es el recurso hídrico, en algunos de ellos la caracterización de este es muy pobre y la estimación de la oferta se limita a los caudales medios anuales. Esto hace que este instrumento no cumpla con su objetivo de orientar adecuadamente la gestión integral del agua. La subregión del Valle de Aburrá presenta un número alto (28, según inventario que se compila en la Tabla 1)

de Planes de Ordenación y Manejo de Microcuencas con información detallada en todos sus componentes, en especial en lo que respecta al recurso hídrico. En estos se estiman los caudales medios, mínimos y máximos por diferentes metodologías, al igual que el caudal ecológico. Además, cuenta con el POMCA del río Aburrá - Medellín. Esto hace que la información disponible en esta subregión sea suficiente para la planificación del recurso hídrico en gran parte de su territorio, a pesar de las deficiencias en cuanto a la organización y sistematización de dicha información a nivel de la subregión.

La subregión Oriente presenta el mayor número de Planes de Ordenación y Manejo (37, según inventario que se compila en la Tabla 1), pero la información de cantidad de agua que se encuentra en ellos, no es lo suficientemente detallada para una adecuada planificación del recurso hídrico a partir de estos planes. Pero CORNARE para su gestión cuenta con el Atlas Hidrológico, que le permite mediante un modelo de elevación de terreno estimar la cantidad de agua en todos los puntos de la red de drenaje de la región. Esto hace que la subregión Oriente, cuente con la información suficiente para una adecuada planificación del recurso hídrico en todo su territorio. Además, los estudios "Cuentas Físicas del Agua" y el "Atlas Biofísico de la cuenca del Río Negro", que recopilan toda la información sobre la cantidad del agua existente en su jurisdicción y en la subregión Valle de San Nicolás, complementan dicha información.

Aunque menos sofisticada que el Atlas Hidrológico, CORANTIOQUIA también cuenta con una herramienta para la administración del recurso hídrico denominada DUBERDI-CUS, con la cual es posible realizar la estimación de los caudales promedio, mínimo, máximo y ecológico para 553 cuencas de la jurisdicción, localizadas en las subregiones Norte, Nordeste, Bajo Cauca, Occidente, Suroeste y Magdalena Medio.

Las tesis consultadas desarrollan herramientas y metodologías de utilidad en la estimación de la cantidad de agua, tanto superficial como subterránea, las cuales para cumplir con su objetivo de ser usadas en la planificación del recurso hídrico deben ser conocidas por las CAR e integradas en los estudios y procesos que realizan para ampliar el conocimiento sobre el recurso hídrico.

Si bien falta avanzar en el conocimiento de las aguas subterráneas de la subregión del Valle de Aburrá, los avances en el conocimiento de las mismas durante el periodo 2010 - 2012, permiten una mejor planificación de este recurso en la zona norte, al tener delimitado con mayor precisión el acuífero del Valle de Aburrá y sus zonas de recarga. La subregión del Bajo Cauca, también presenta desarrollos importantes en el conocimiento de sus acuíferos con cierta continuidad en los estudios.

Se encuentran vacíos en el conocimiento de los acuíferos del Magdalena Medio, a pesar que para algunas comunidades esta es la fuente de abastecimiento de agua. Lo anterior también pasa en los municipios del oriente antioqueño, específicamente en los del Valle de San Nicolás.

En la subregión de Urabá, específicamente en el acuífero del golfo de Urabá, se presentan avances importantes en el conocimiento del recurso subterráneo, ya que desde 1993 con los estudios realizados por el Instituto de Investigaciones en Geociencias, Minera y Química Colombia (INGEOMINAS), se inició un proceso de investigación continuo que aún se realiza y que en 2012 arroja como resultado el Plan de Manejo del Acuífero del Golfo de Urabá.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRÁ (AMVA) Y UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA. Red de Monitoreo Ambiental en la Cuenca Hidrográfica del Río Aburrá en Jurisdicción del Área Metropolitana: Fase III. Informe Final. Medellín: 2011.

ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRÁ (AMVA) Y UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA. Determinación y protección de las potenciales zonas de recarga en el norte del Valle de Aburrá. Informe final. Medellín: 2012.

CADAVID, Julián Cristina e IRAL, Gloria Offir. Atlas biofísico de la cuenca del río Negro, oriente antioqueño. Trabajo final presentado para optar al título de Especialista en Ordenamiento y Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas. Medellín: Universidad Santo Tomás, Facultad de Ciencias y Tecnología, 2012. 243p.

CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE LAS CUENCAS DE LOS RÍOS NEGRO Y NARE (CORNARE) - UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA. Actualización Atlas Hidrológico para CORNARE. Medellín: 2009.

CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE LAS CUENCAS DE LOS RÍOS NEGRO Y NARE (CORNARE), GOBERNACIÓN DE ANTIOQUIA, MASBOSQUES y GOTTA. Cuentas físicas del agua en la jurisdicción de CORNARE. El Santuario: CORNARE, 2011.

CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL CENTRO DE ANTIOQUIA (CORANTIOQUIA). Plan de Acción 2012 - 2015: Administración Integral del Patrimonio Ambiental. Medellín: 2012. [Citado el 2 de abril de 2013]. Disponible en http://www.corantioquia.gov.co/images/stories/pdf/PLAN_DE_ACCION_CORANTIQUIA_2012-2015.pdf.

CORPORACION PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE DEL URABÁ (CORPOURABA). Plan de Manejo del Acuífero del Golfo de Urabá. Apartadó: 2011.

ESCOBAR, John Fernando. Plataforma SIG para el modelamiento de sistemas acuíferos. Tesis para optar al título de Doctor en Ingeniería. Medellín: Universidad de Antioquia - Facultad de Ingeniería, 2011. 196p.

GONZÁLEZ, Francisco Javier. Desarrollo de un modelo geoespacial para la Gestión Integrada del Recurso Hídrico. Caso de estudio: el Bajo Cauca antioqueño. Tesis para optar al título de Magister en Ingeniería. Medellín: Universidad de Antioquia - Facultad de Ingeniería, 2011. 115p.

CENTRO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE ANTIOQUIA (CTA). Actualización del estado del arte del recurso hídrico en el departamento de Antioquia, 2010-2012. Medellín, documento en impresión.

IAvH, IDEAM, IIAP, INVEMAR, SINCHI. Informe del Estado del Medio Actualización del estado del arte del recurso hídrico en el departamento de Antioquia, 2010-2012 Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables 2010. Bogotá D.C, Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), 2011. 384 p.

MEJÍA, Oscar. El Recurso Hídrico en la Jurisdicción de CORANTIOQUIA 1995 - 2007. Medellín: CORANTIOQUIA, 2008.

PORRAS, Hernán. Boletín temático. Anuario Estadístico de Antioquia 2011: Medio Ambiente. Medellín: Gobernación de Antioquia, 2012. [Citado el 2 de abril de 2013]. Disponible en http://www.antioquia.gov.co/PDF2/boletin_2011_medio_ambiente.pdf.

ROJO, Julián David. Desarrollo de un sistema experto para la predicción de caudales medios mensuales en Colombia. Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de Maestría en Ingeniería - Recursos Hidráulicos. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas - Escuela de Geociencias y Medio Ambiente, 2011. 128p.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA y UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO - ENERGÉTICA (UPME). Balances Hidrológicos de Colombia. Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos. Medellín: 1999.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA. HidroSIG 4.0: Manual de Usuario. Medellín, 2011. [Citado el 17 de abril de 2013]. Disponible en http://www.medellin.unal.edu.co/~hidrosig/index.php?option=com_content&view=article&id=35&Itemid=37&lang=es.

UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA y CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL CENTRO DE ANTIOQUIA (CORANTIOQUIA). Plan de Manejo de las Aguas Subterráneas de la Dirección Territorial Panzenú. Medellín: CORANTIOQUIA, 2011.

ZULUAGA, Lina. Simulador piloto de la oferta y la demanda hídrica en una microcuenca rural para la validación de metodologías y la evaluación de políticas de manejo sostenible del recurso agua. Trabajo de investigación presentado como requisito para optar al título de Magister en Medio Ambiente y Desarrollo. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas - Escuela de Geociencias y Medio Ambiente, 2011. 77p.

CALIDAD DEL RECURSO HÍDRICO EN ANTIOQUIA 2008-2012

Autores: - Carlos Augusto Benjumea H. - Magíster en Ingeniería. Universidad Católica de Oriente - UCO
- Alexandra Arango - Magíster Biología. Universidad Católica de Oriente - UCO

Correos electrónicos: cbenjumea@uco.edu.co; carlosbenju@gmail.com
aarango@uco.edu.co; aarango1975@gmail.com

RESUMEN

Se presenta la recopilación del estado del arte de la calidad fisicoquímica del recurso hídrico en Antioquia entre los años 2008 a 2012. Se realizó un análisis de información en 60 documentos, distribuidos en trabajos de grado, informes de consultoría, artículos y libros, durante este periodo. Se exhiben los resultados de diferentes índices de calidad del agua (ICA, ICOMO, ICACOSU, ICA-global) los cuales dan cuenta del estado fisicoquímico de algunas fuentes hídricas distribuidas en las diferentes subregiones del departamento de Antioquia.

PALABRAS CLAVES

calidad del agua, índices de calidad, Antioquia, estado del arte.

ABSTRACT

This paper summarizes results of several studies carried out between 2008 and 2012 of the quality conditions in Antioquia's fresh water resources. Sixty studies, among theses, consulting reports, published papers and books were analysed along with the calculation of several water quality indexes (ICA, ICACOSU, ICA-global). The data here presented reveal the current physico-chemical conditions of water resources in all sub-regions of Antioquia.

INTRODUCCIÓN

El agua es el recurso vital que se requiere para el desarrollo de cualquier sociedad, la disponibilidad de este recurso, bien sea por su escasez y/o mala calidad, puede convertirse en un factor limitante para el desarrollo de actividades económicas y sociales, adicionalmente pone en peligro la salud, la seguridad alimentaria y la diversidad biológica.

El término calidad del agua está relacionado con el uso del recurso; y este a su vez depende de una serie de características fisicobióticas (físicos, químicos y biológicos) que permiten o no un potencial para la utilización o sostenimiento de ecosistemas.

El Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia (CTA), consciente de esta problemática, viene elaborando desde el año 2001, a través del convenio interinstitucional Cátedra del Agua, el estado del arte en el tema de calidad del recurso hídrico, como el desarrollo de uno de los macroproyectos de sus ejes prioritarios y que permite identificar las brechas en el conocimiento y los aspectos más importantes en los cuales se debe avanzar para el mejoramiento de la calidad de este recurso en el departamento de Antioquia (CTA, 2008).

En la presente recopilación se plantea realizar un acercamiento a la información existente en términos de diferentes parámetros fisicoquímicos, biológicos e índices de calidad que dan cuenta del estado del recurso hídrico superficial en Antioquia entre los años 2008 a 2012. Esta información es proveniente de diferentes estudios o proyectos desarrollados por la academia y por los entes gubernamentales, que generosamente comparten sus resultados para la divulgación y análisis de este tópico en particular.

METODOLOGÍA Y RESULTADOS

Para la actualización de este macroproyecto se consultaron bases de datos en las diferentes corporaciones autónomas regionales, universidades, entes de control, gobiernos locales, regionales y Gobierno Nacional, así como estudios específicos contenidos en la red de bibliotecas del departamento, informes nacionales

pertinentes y trabajos de ONGs que consolidan información estadística en torno al estado de los recursos naturales, en especial lo concerniente a temas de calidad del recurso hídrico. La evaluación de esta información y los principales indicadores al respecto se muestran a continuación.

Revisión bibliográfica

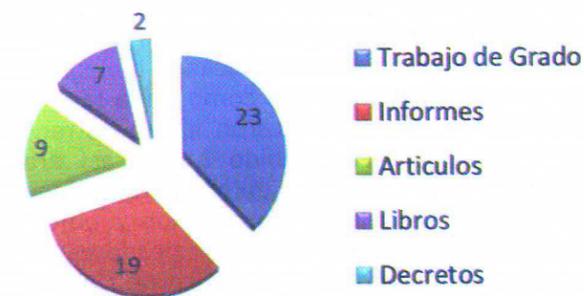
Se identificaron las principales entidades que manejan información referente a la gestión del recurso hídrico, bien sea autoridades ambientales (corporaciones autónomas) o generadores de nuevo conocimiento (universidades, consultores). Una vez realizada esta identificación se procedió a consultar sus bases de datos a través de visitas a los centros de documentación y consulta virtual. La tabla 1 presenta un comparativo entre las diferentes entidades consultadas para los trabajos realizados entre 2000-2008 y la presente revisión, 2008-2012.

Tabla 1. Entidades Consultadas y número de referencias.

Entidad	Referencias en bases de datos 2000-2008	Referencias en bases de datos 2008-2012
Minambiente	22	2
Gobernación de Antioquia	2	
Área Metropolitana del Valle de Aburrá	16	4
CORANTIOQUIA	39	2
CORNARE	10	
CORPOURABÁ	9	2
Contraloría	2	
Universidad Nacional	16	22
Universidad de Antioquia	22	20
Universidad Pontificia Bolivariana	2	
Universidad de Medellín	4	2
Universidad Católica de Oriente	2	
Escuela de Ingeniería de Antioquia	6	
Universidad San Buenaventura	5	
Universidad de la Salle		4
IDEAM	3	
EPM	3	2
Otros(revistas, consultores)	16	
TOTAL REGISTROS	179	60

Posterior a esta revisión, se procedió a clasificar estos documentos de acuerdo al tipo de estudio (trabajo de grado, informe, artículo, libro, decreto) y a la subregión a la cual hacía referencia. Se encontró que la mayor cantidad de documentos se clasifican como trabajos de grado e informes de consultoría o convenios; con un total de 23 y 20 referencias bibliográficas respectivamente. Este resultado es coherente con el número de trabajos registrados por entidad (tabla 1),

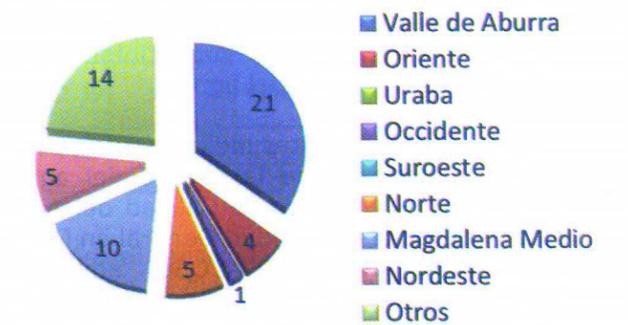
Figura 1. Tipos y Cantidad de Estudios.



en la cual se observa como la Universidad Nacional y la Universidad de Antioquia aportan el mayor número de referencias con un total de 22 y 20 productos, respectivamente.

En cuanto al número de estudios por sub región, se destacan los ubicados en el Valle de Aburra con un total de 21 estudios. Las figuras 1 y 2 presentan en forma detallada los resultados de la clasificación mencionada.

Figura 2. Número de Estudios por Subregión



Las principales temáticas que se encontraron durante este proceso, fueron las enfocadas a caracterizaciones de fuentes hídricas (fisisicoquímica y biótica), las cuales propenden a la gestión, control e investigación del recurso. Dentro de los estudios más sobresalientes se destaca la "Red de Monitoreo Ambiental en la Cuenca Hidrográfica del Río Aburrá - Medellín en Jurisdicción del Área Metropolitana" (Red Río); desarrollado por el Área Metropolitana del Valle de Aburra y ejecutado por la Universidad de Antioquia, Universidad Nacional de Colombia- Sede Medellín, Universidad Pontificia Bolivariana y la Universidad de Medellín.

El proyecto Red Río, es una de las líneas estratégicas para la administración del recurso hídrico en jurisdicción del Área Metropolitana del Valle de Aburra, e incorpora la gestión para el seguimiento y el control de la cantidad y la calidad ambiental del recurso hídrico superficial, los cuales están encaminados al mejoramiento de la calidad y cantidad del recurso.

El proyecto Red Río en su componente superficial, se concibió inicialmente en tres (3) fases generales, dependientes una de la otra, que se integran al final para proporcionar una herramienta que le permite a la Autoridad Ambiental primero, conocer el estado del recurso y segundo, planear su gestión disponiendo de los insumos básicos para realizar el seguimiento y el control a los planes y mecanismos para la recuperación del recurso (AMVA, 2011). Adicionalmente este proyecto ha tenido asociados durante sus diferentes fases un gran número de informes de práctica y algunos trabajos de investigación a nivel de pregrado, maestría y doctorado.

Un segundo documento de especial relevancia es el titulado "Formulación del Plan de Ordenación del Recurso Hídrico y Diseño de un Programa de Monitoreo y Seguimiento a la Calidad de Cuerpos Hídricos en las Cuenas de Influencia del Sector Eléctrico en las Direcciones Territoriales Tahamíes y Zenufaná.", contratado por CORANTIOQUIA y desarrollado por la Universidad de Antioquia durante el 2009.

Dentro de los objetivos de este proyecto se destacan, la definición de una red de monitoreo para los componentes atmosférico, superficial y subterráneo; además de la caracterización de un gran número de cuerpos de agua con los parámetros y sustancias de interés sanitario en los municipios ubicados al norte, nordeste y magdalena medio de Antioquia (territoriales Tahamíes y Zenufana).

A lo largo de este documento se presentan los resultados obtenidos, en términos de calidad del agua superficial, de la revisión bibliográfica en cada una de las instituciones señaladas anteriormente. Este proceso se hace discriminando cada una de las subregiones del departamento de Antioquia, mostrando los principales datos obtenidos en los últimos cuatro años sobre información referente a la calidad del agua.

Se presentan diferentes indicadores que dan cuenta del estado de la calidad del agua, como lo son, el Índice de Calidad del Agua -ICA y el Índice de Calidad General en Corrientes Superficiales -ICACOSU, adicionalmente se presentan algunos resultados de variables importantes tales como el porcentaje de saturación de Oxígeno Disuelto, Sólidos Totales en Suspensión, Demanda Química de Oxígeno, Conductividad Eléctrica, pH, entre otros.

Con los datos presentados en estos índices y el análisis de la información disponible, aunque no se puede determinar ciertamente el estado de la calidad del agua por su heterogeneidad, si permite esbozar de manera general el estado de la calidad de algunas fuentes hídricas de Antioquia (CTA, 2008).

Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

La subregión del Área Metropolitana del Valle de Aburrá está localizada en el centro del departamento de Antioquia, limitando con las subregiones Norte, Nordeste, Oriente, Suroeste y Occidente. Hace parte de la jurisdicción Administrativa de la Corporación Autónoma Regional -CAR- para el centro de Antioquia (Corantioquia) y del Área Metropolitana. Se configura geopolíticamente por los municipios del Valle de Aburrá: Barbosa, Bello, Caldas, Copacabana, Girardota, Itagüí, La Estrella, Medellín, Sabaneta y Envigado.

Dentro de este proyecto se establecieron 19 estaciones de monitoreo a lo largo del eje longitudinal del río, partiendo desde el nacimiento en el Alto San Miguel (en jurisdicción del municipio de Caldas), hasta la estación denominada Puente Gabino en jurisdicción del municipio de Santo Domingo, además, han sido incluidas 22 quebradas y dos vertimientos de agua residual tratada y sin tratar, (AMVA, 2011).

En la fase III del proyecto Red Río se continúa con la formulación y refinamiento de nuevos indicadores de calidad de agua para el río Aburrá - Medellín, con el propósito de obtener un índice de calidad de agua propio que de cuenta de las condiciones del río y que además permita realizar seguimiento de la calidad del mismo. Para ello se tuvieron en cuenta variables fisicoquímicas y biológicas registradas tanto en ésta como en la fase II de Red Río. Se consideraron los muestreos de estas dos fases debido a que así era posible incluir información registrada bajo épocas de caudales altos, medios y bajos. Con base en estos nuevos indicadores se construyeron entonces, el Índice de Calidad Global (ICA-Global) e ICA para cada época de caudales. Con estos nuevos ICA se busca una mayor precisión en la valoración de la calidad del agua, ya que se tuvieron en cuenta una buena cantidad de datos registrados en diferentes escenarios de caudales.

El ICA-Global se define como un índice de calidad de agua construido específicamente para la corriente principal del río Aburrá-Medellín (AMVA, 2011). Mientras que el Índice de calidad de agua para corrientes superficiales (ICACOSU), es un indicador de calidad de agua formulado y adaptado para las condiciones ambientales de Colombia, por el IDEAM, el cual de manera cualitativa permite el diagnóstico de la calidad del recurso hídrico del país.

En la Tabla 2 se presenta una comparación para 2010 y 2011 de las medias de los resultados de calidad obtenidos mediante los indicadores ICA-Global e ICACOSU sobre el río. Es importante resaltar que el indicador ICA-Global involucra la variable BMWP/COL más no la variable SST y viceversa para el ICACOSU (AMVA, 2011).

Tabla 2. Comparación de los resultados promedio de los indicadores ICA-Global e ICACOSU para el río durante la fase III (AMVA, 2011).

Estaciones	2010				2011			
	ICA-GLOBAL		ICACOSU		ICA-GLOBAL		ICACOSU	
	Valor	Calificación	Valor	Calificación	Valor	Calificación	Valor	Calificación
San Miguel (E1)	3.64	Acceptable	0.85	Acceptable	2.94	Buena	0.74	Acceptable
Ancón Sur (E3)	7.74	Regular	0.62	Regular	6.91	Acceptable	0.57	Regular
Antes de San Fernando(E5)	8.72	Regular	0.56	Regular	7.33	Regular	0.58	Regular
Aula Ambiental(E8)	11.38	Mala	0.47	Mala	10.07	Regular	0.45	Mala
Puente Acevedo(E9)	14.46	Muy mala	0.36	Mala	12.51	Mala	0.37	Mala
Puente Machado(E11)	14.96	Muy mala	0.31	Mala	12.24	Mala	0.33	Mala
Ancón Norte (E12)	15.00	Muy mala	0.29	Mala	12.39	Mala	0.32	Mala
Puente Gabino(E20)	9.87	Regular	0.50	Mala	7.89	Regular	0.52	Regular

Según se puede observar, para 2010, la calidad del agua registrada por ambos indicadores en el tramo comprendido entre las estaciones San Miguel (E1) y Aula Ambiental (E8) fue la misma, pasando de condiciones aceptables en E1 a condiciones regulares en la parte media (E3 y E5) y luego a mala en E8, mientras que para el comprendido entre Puente Acevedo (E9) y Ancón Norte (E12) se da una diferenciación entre las calidades obtenidas por cada indicador, para el ICA-Global se dio una condición de muy mala y para el ICACOSU de mala, esto puede estar asociado al índice BMWP/Col, la cual se ve afectada tanto por las condiciones de calidad del agua propias del río en el trayecto demarcado por estas estaciones, como por las condiciones climáticas. Dado que durante el primer semestre de 2010 se dieron los caudales más bajos registrados en el río Aburrá - Medellín, la calidad fisicoquímica y biológica del mismo se vio afectada negativamente, especialmente en el último tramo citado, el cual se caracteriza por recibir los vertimientos de aguas residuales transportadas por los interceptores del alcantarillado de EPM, así como los efectuados sobre algunas corrientes tributarias (quebradas La Rosa, La Madera, El Hato, La García y La Señorita, principalmente) lo que altera en mala medida a las comunidades biológicas presentes en el lecho del río.

Además, durante el segundo semestre del mismo año se dio comienzo a un período de lluvias invierno muy acentuado, en el cual se presentaron algunos de los caudales más altos registrados en el histórico del río, los cuales producen un lavado del lecho y reducen significativamente las comunidades biológicas presentes en él, esto también afecta negativamente el BMWP/Col. Esta afectación no se ve registrada en los resultados arrojados por el ICACOSU, para el cual la calidad mala predomina desde Aula Ambiental (E8) hasta Puente Gabino (E20) debido principalmente a la re-suspensión y arrastre de sólidos suscitado por el incremento del caudal (AMVA, 2011).

Para el 2011 se da una mejoría en la calidad obtenida mediante el ICA-Global, pasando de aceptable a buena en E1, de regular a aceptable en E3, de mala a regular en E8 y de muy mala a mala entre E9 y E12, mientras que mediante el ICACOSU se obtienen condiciones semejantes para ambos años, con excepción de Puente Gabino (E20) en donde la calidad evoluciona de mala a regular. Para este año, la condición de caudales altos favoreció la dilución de las cargas contaminantes, factor que puede influenciar positivamente en la mejoría de la calidad del agua registrada

Zona Norte y Nordeste.

Para el análisis de la calidad del agua en estas subregiones se tuvo en cuenta, principalmente, el documento titulado "Formulación del Plan de Ordenación del Recurso Hídrico y Diseño de un Programa de Monitoreo y Seguimiento a la Calidad de Cuerpos Hídricos en las Cuencas de Influencia del Sector Eléctrico en las Direcciones Territoriales Tahamíes y Zenufaná"; el cual extracta y define con un buen nivel de detalle la calidad físico-biológica del agua en estos territorios.

La Dirección Territorial Tahamíes está conformada por 17 municipios : Angostura, Anorí, Belmira, Briceño, Campamento, Carolina del Príncipe, Donmatías, Entreríos, Gómez Plata, Guadalupe, Ituango, San Andrés de Cuerquia, San José de La Montaña, San Pedro de los Milagros, Santa Rosa de Osos, Toledo y Yarumal. Se divide en dos grandes subregiones: la del altiplano y las vertientes hacia los ríos Cauca y Nechí; estas características le dan unas cualidades particulares en lo que a alturas, temperatura e hidrografía se refiere (CORANTIOQUIA, 2009).

La Dirección Territorial Zenufaná está ubicada sobre la margen Oriental de la Cordillera Central, al Suroeste de la serranía de San Lucas, con una extensión de 10.818 Km2 y conformada por doce municipios: Amalfi, Caracolí, Cisneros, Maceo, Puerto Berrío, Puerto Nare, Remedios, Segovia, Vegachí, Yalí, Yolombó y Yondó.

Considerando las grandes corrientes que bañan el territorio correspondiente a la jurisdicción de CORANTIOAQUIA en las subregiones Norte y Nordeste del departamento, los cuerpos de agua seleccionadas fueron agrupados según las vertientes de los ríos a los que fluyen: Nechí, Grande, Guadalupe-Porce, Nus, San Bartolomé, Ituango y Nare.

Durante este proyecto se analizaron un total de 18 municipios de las territoriales Tahamíes y Zenufaná. En estos municipios se establecieron programas de monitoreo en 36 corrientes de agua y 67 puntos de control diferentes. Para cada estación se tomaron variables in situ como pH, temperatura del agua, temperatura ambiente y caudal.

Adicionalmente se recolectaron muestras de agua para analizar en laboratorio parámetros como DBO, DQO, Nitratos, Ortofosfatos, Coliformes Totales y Fecales, Sólidos Suspendedos, Sólidos Disueltos totales y turbiedad.

Mediante esta información se procedió a calcular el Índice de Calidad de Agua (ICA) propuesto por la Fundación Nacional para el Saneamiento de los Estados Unidos en 1970. El valor del índice (cuantitativo) permite definir en forma cualitativa la calidad de las aguas, los resultados más importantes se sintetizan en la tabla 3.

La problemática entorno al agua en las Direcciones Territoriales Tahamíes y Zenufaná de CORANTIOQUIA (subregiones del norte y nordeste de Antioquia), se centra en primer lugar en la disminución de la calidad por el aumento de las cargas contaminantes que se vierten directamente a las corrientes o se disponen sobre el suelo, al manejo inadecuado de residuos sólidos y a la producción o beneficio de bienes utilizando de forma no planificada sustancias que una vez alcanzan un cuerpo de agua impactan negativamente sus características naturales. Todo ello asociado a actividades agrícolas, pecuarias, industriales, mineras y domésticas (CORANTIOQUIA, 2009).

La carencia de sistemas de tratamiento de aguas residuales en los municipios que hacen parte de la zona de estudio favorece la contaminación de las corrientes de agua que atraviesan los centros poblados y cascos urbanos, así mismo la presencia de grandes industrias y sus consecuentes descargas a las corrientes cercanas aceleran los procesos de deterioro de las mismas.

Oriente de Antioquia

En esta subregión encontramos diferentes estudios que aportan al conocimiento de la calidad hídrica de sus fuentes principales, gracias a la formulación de los diferentes Planes de Ordenación y Manejo realizados en la zona. En las Tabla 4 se muestran los diferentes resultados para los Índices de Calidad de Agua en algunas fuentes principales de esta subregión.

Tabla 3. Valores del ICA para las corrientes y estaciones de monitoreo muestreados (CORANTIOQUIA, 2009).

Corriente	Tipo	Municipio	ICA	Calidad
Q. Yarumalito	Receptora	Yarumal	69.5	Media
Q. Chorros Blancos	Abastecedora Receptora		78.3	Buena
Q. La Hedionda	Receptora	Angostura	66.9	Media
R. Chico	Receptora	Belmira	77.6	Buena
Q. Chuscalito			76.6	Buena
Q. San Juan	Receptora	San Pedro de los milagros	80.1	Buena
Q. El Hato	Abastecedora		70.4	Buena
Q. la Pulgarina	Receptora		52.9	Media
Q. la Pulgarina	Receptora		46.7	Mala
Q. El Hato	Receptora		55.3	Media
Q. El Hato	Receptora		38.4	Mala
R. Chico	Receptora	Belmira	59.4	Media
Q. Bramadora	Receptora	Santa Rosa de Osos	37.1	Mala
Q. Bramadora			58.9	Media
Q. La Torura			76.1	Buena
Q. La Torura	Receptora	Entrerrios	65.1	Media
Q. La Torura	Receptora		56.4	Media
R. Nus	Receptora	Cisneros	79	Buena
R. La Reina	Receptora	Caracolí	59.5	Media
R. Nus	Receptora		78	Buena
R. San Lorenzo		Cisneros	73.8	Buena
R. San Lorenzo	Receptora	Yolombó	75.3	Buena
Receptora Yalí	Receptora		67.5	Media
Receptora Yalí	Receptora	Yalí	39	Mala
Caño de nacimiento	Receptora		40.9	Mala
Q. El Viento	Receptora		71	Buena

Tabla 4. Índices de Calidad

Corriente	ICA	ICOMO
Cuenca del Río Negro: Quebrada Abreo (mira)	73	0.350
Cuenca del Río Negro: Quebrada Malpaso	79	0.417
La Cimarrona: Estación Colte punto	55	0.658
La Palma: Aguas arriba del municipio (octubre 2005)	64	0.498
La Pereira : Divino niño, después de confluencia. El Tambo y Pereirita(agosto 2005)	75	0.322
El salto: Antes del Santuario (febrero 2003)	58	0.474
La bolsa: Sobre puente (marzo 2004)	71	0.433
Río Pantanillo: Estación cerca al embalse La Fé (2004)	74	0.554
La Brizuela: 300 arriba bocatoma acueducto municipal (marzo 2004)	73	0.335

Fuente: Idea-UNAL, 2004.

En estos resultados, se encuentra que en la mayoría de las corrientes la calidad disminuye a medida que descienden. Esta contaminación se debe, principalmente, a desechos de tipo orgánico, como se refleja en sus altos niveles de nitrógeno amoniacal y de coliformes, tanto fecales, como totales. Sin embargo, también se presentan características de aguas eutróficas.

Examinando los análisis de plaguicidas que la Dirección Seccional de Salud de Antioquia (DSSA) viene realizando en convenio con CORNARE, se encuentra que las concentraciones de clorpirifos, carbofurán, clorotalonil y metamidofos están presentes, aunque en los últimos muestreos estas concentraciones están por debajo del límite detectable del método. Esta situación es alarmante, teniendo en cuenta que, en los últimos años, en la zona se han presentado diferentes casos de intoxicación por este tipo de compuestos en la población, tal como lo reporta la DSSA (IDEA-UNal, 2006).

De acuerdo con el reporte emitido para el año 2005 por parte de CORNARE, en la región, las cargas orgánicas (DBO5) domésticas/urbanas puntuales predominan en magnitud sobre las cargas industriales puntuales (0). Las primeras representan, aproximadamente, el 80% dentro de los usuarios documentados. Lo anterior representa, en promedio, aportes que producen demandas de 13.308 kg/día de oxígeno (como DBO5), correspondiente a 2.429 toneladas por semestre; aproximadamente, el 63% del total regional. En cuanto a sólidos suspendidos, el aporte subregional es de 2.342 ton/semestre (0), el 61% del total regional (CORNARE-UdeA, 2006).

Urabá

Los estudios realizados en el área de estudio del Urabá consistieron en determinar las concentraciones de cloruros, bicarbonatos, sulfatos, nitratos, nitritos, calcio, magnesio,

sodio, potasio, manganeso, hierro, dureza total, dureza cálcica, dureza magnésica, alcalinidad y las propiedades físicas, como la temperatura, la conductividad eléctrica, el color y la turbidez de las muestras de agua seleccionadas.

Como ejemplo de las diferentes actividades se muestran los resultados obtenidos en el estudio "Geología, Geofísica, Hidrogeológica e Isótopos, como herramientas para definir un modelo conceptual hidrogeológico, caso de aplicación: acuífero costero del municipio de Turbo."

Bajo Cauca

En esta subregión aparecen como los dos mayores responsables en el deterioro de la calidad de sus fuentes hídricas, el vertido de aguas residuales provenientes de la minería y las descargas domésticas. CORANTIOQUIA, como autoridad ambiental de esta subregión, ha realizado diferentes estudios que han permitido caracterizar algunas fuentes y priorizar algunas cuencas.

CONCLUSIONES

Para todas las cuencas del departamento es evidente un grado importante de contaminación deriva especialmente en la entrada de aguas residuales de origen doméstico e industrial, a lo cual se suma la presencia de actividades como minería, ganadería, entre otros. Sin embargo, cabe destacar que para todas las regiones los municipios con mayor desarrollo industrial presentan los más altos grados de contaminación.

La buena calidad del agua hallada para muchos de los cuerpos de agua, tales como los del Magdalena medio, así como las quebradas de zonas altas, indican muy seguramente un alto grado de depuración de las mismas, muy seguramente producto de los altos caudales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRA. 2011. RED DE MONITOREO AMBIENTAL EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO ABURRÁ - MEDELLÍN EN JURISDICCIÓN DEL ÁREA METROPOLITANA FASE III. Informe Final. Convenio 397 de 2009.

ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRA. 2011. RED DE MONITOREO AMBIENTAL EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO ABURRÁ - MEDELLÍN EN JURISDICCIÓN DEL ÁREA METROPOLITANA FASE III. Informe Final. Convenio 397 de 2009.

Área Metropolitana del Valle de Aburra. 2011. RED DE MONITOREO AMBIENTAL EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO ABURRÁ - MEDELLÍN EN JURISDICCIÓN DEL ÁREA METROPOLITANA FASE III. Informe Final. Convenio 397 de 2009.

ARIAS ACEVEDO S. 2011. Distribución Espacial de los Ensamblajes de Algas Perifíticas y Comunidades de Macroinvertebrados Acuáticos en un Sector del Río Aburrá-Medellín (Vereda La Clara, Caldas Antioquia). Facultad de Ingeniería. Universidad de Antioquia.

BOTERO ARIAS I. C. 2010. Gestión Sostenible del Recurso Hídrico, Mediante la Participación en la Evaluación de la Calidad de este y la Revisión de los Procesos de Reglamentación de Corrientes. Informe de Práctica Profesional. Facultad de Ingeniería. Universidad de Antioquia.

CADAVID GALLEGU J. C.; ECHEVERRI RUIZ J. D.; GÓMEZ GUTIÉRREZ, A. E. 2010. Modelación Índices de Calidad de Agua (ICA) en las Cuencas de la Región de Cornare. Revista Gestión y Ambiente, vol. 13, núm. 2, agosto, 2010, pp. 7-24 Universidad Nacional de Colombia.

CANO CASAS L. J. 2010. Diseño de una Red de Monitoreo y Seguimiento de la Calidad de Cuerpos Hídricos en la Cuenca del Río Grande. Investigación Aplicada. Especialización en Medio Ambiente y Geo informática. Universidad de Antioquia.

CORANTIOQUIA, Universidad de Antioquia. 2009. Formulación el Plan de Ordenación del Recurso Hídrico y Diseño de un Programa de Monitoreo y Seguimiento a la Calidad de Cuerpos Hídricos en las Cuencas de Influencia del Sector Eléctrico en las Direcciones Territoriales Tahamíes y Zenufaná. Informe Final. Contrato 8211.

CORREA OCHOA I. C. 2008. Toxicidad de Florecimientos de Cianobacterias en el Embalse Riogrande II. Trabajo de Investigación, Maestría en Ingeniería, Universidad de Antioquia. GARCÍA LEOZ V. 2009. Determinación y Protección de las Potenciales Zonas de Recarga al Norte del Valle de Aburrá. Informe Final Practica Académica, Facultad de Ingeniería. Universidad de Antioquia.

GONZÁLEZ GONZÁLEZ J. A. 2009. Lineamientos de gestión ambiental en el embalse Porce II, con el objeto de correlacionar la variación de los parámetros de calidad del agua y su impacto en la operación de la central de Porce II. Universidad de Antioquia.

GUERRA ROJAS A. 2010. Mapeación y Análisis de la Distribución Espacial de Organismos Indicadores de la Calidad del Agua en la Quebrada la Ayurá (Envigado, Antioquia). Especialización en Medio Ambiente y Geoinformática. Universidad de Antioquia.

IDEAM, Laboratorio de Calidad Ambiental. (26 de Agosto de 2009). Índice de Calidad General en Corrientes Superficiales ICACOSUS. Índice de Calidad General en Corrientes Superficiales ICACOSUS. Bogotá, Colombia.

IDEAM, Laboratorio de Calidad Ambiental. 2009. Índice de Calidad General en Corrientes Superficiales ICACOSUS. Índice de Calidad General en Corrientes Superficiales ICACOSUS. Bogotá, Colombia.

MONTOYA MORENO Y. 2007 "Colonización de sustratos rocosos por los macroinvertebrados acuáticos en la quebrada Los Andes, El Carmen de Viboral (Antioquia), Colombia," Revista Universidad Católica de Oriente, no. 23, pp. 89- 104, 2007.

MONTOYA MORENO Y. 2008. Caracterización de la Biodiversidad Acuática y de la calidad de las aguas de la quebrada Los Andes, El Carmen de Viboral-Antioquia). Revista institucional Universidad Tecnológica del Chocó: Investigación, Diversidad y Desarrollo. 2008, 27 (1). 85-91.

MONTOYA MORENO Y. 2009. Caracterización morfométrica de la microcuenca de la quebrada los andes, el carmen de viboral, antioquia-colombia. Revista Ingenierías Universidad de Medellín, volumen 8, No. 15, pp. 11-29 - ISSN 1692-3324 - julio-diciembre de 2009/146 p. Medellín, Colombia.

NSF, "WQI - National Sanitation Foundation, Consumer Information" 2006. Arenas Zapata Carlos Alberto. 2011. Analisis de Calidad de Agua con Referencia a Variables Fisicoquímicas, Microbiológicas y Macroinvertebrados Acuáticos en la Quebrada La Popala (Bolombolo, Venecia, Antioquia). Trabajo de Grado como Requisito para Optar al Título de Ingeniería Sanitaria. Universidad de Antioquia.

R. Brown, N. Macclelland, R. Deininger et al., "A Water Quality Index - Do We Dare?." Water and Sewage Works, vol. 11, pp. 339 - 343, 1970.

R. BROWN, N. MACCLELLAND, R. DEININGER. 1970, "A Water Quality Index - Do We Dare?." Water and Sewage Works, vol. 11, pp. 339 - 343, 1970.

TOBÓN A. CHICA L. 2010. Analisis de la Calidad del Agua, en Cuencas con Embalsamiento del Recurso Hídrico, con Propósitos de Generación de Energía. Especialización en Manejo y Gestión del Agua. Universidad de Antioquia.

MACROPROYECTO CRECIDAS, TORRENTES Y ASENTAMIENTOS HUMANOS ACTUALIZACIÓN 2010-2011

Autores: - Juan Fernando Barros M.
Magíster en el Aprovechamiento de los Recursos Hidráulicos
Escuela de Ingeniería de Antioquia
- Luz Eliana Vallejo G. - Ingeniera ambiental
Escuela de Ingeniería de Antioquia

Correo electrónico: pfjubar@eia.edu.co; lvallejo@eia.edu.co

RESUMEN

Son objeto de estudio del macroproyecto crecidas, torrentes y asentamientos humanos los desastres asociados con eventos hidrológicos, el territorio y la población. En esta actualización se realiza el estudio general de los registros de desastres asociados con eventos hidrológicos en Antioquia y se propone una metodología de análisis que evalúa la relación entre los registros, la hidrología, los planes de ordenamiento municipales y de cuencas, así como estudios e informes técnicos. Se involucra el análisis de eventos de inundación en unos sitios específicos de tres municipios del departamento con el fin de analizar ciertos elementos que se consideran clave para la gestión del riesgo.

PALABRAS CLAVES

Eventos hidrológicos, bases de datos de desastres, planes de ordenamiento, planes de manejo de cuencas, gestión del riesgo, DesInventar

ABSTRACT

The project studies disasters related to hydrological events, territory and population. A general study of records of hydrologic disasters in Antioquia is presented here (flooding, mass movement, flash flood). It is proposed an analysis methodology that evaluates the relationship between records of events, hydrology, municipal land-use and watersheds planning. In addition, it also evaluates technical studies and reports. The project starts from a general assessment of flood events in the province of Antioquia, and reaches some specific places of three municipalities. This is done in order to analyze certain elements that are considered key to risk management.

KEYWORDS

Hydrologic events, disasters databases, management plans, watershed management plans, risk management, DesInventar

INTRODUCCIÓN

La actualización del macroproyecto Crecidas, torrentes y asentamientos humanos 2010-2011 parte del trabajo consolidado en la anterior Actualización del estado del arte del recurso hídrico en el departamento de Antioquia 2007-2009 incorporando los nuevos resultados obtenidos de los registros de la base de datos DesInventar.

En esta oportunidad, además de esa información que representa un valioso diagnóstico para el departamento, se propone un análisis de tres casos con el propósito de que los resultados del diagnóstico se conviertan en un primer paso del análisis de las situaciones que deben ser incorporadas cada vez más en los Planes de Ordenamiento Territorial (POT)

de los municipios y en las acciones coordinadas por las secretarías de medio ambiente, las corporaciones ambientales, y los organismos de prevención y atención de desastres.

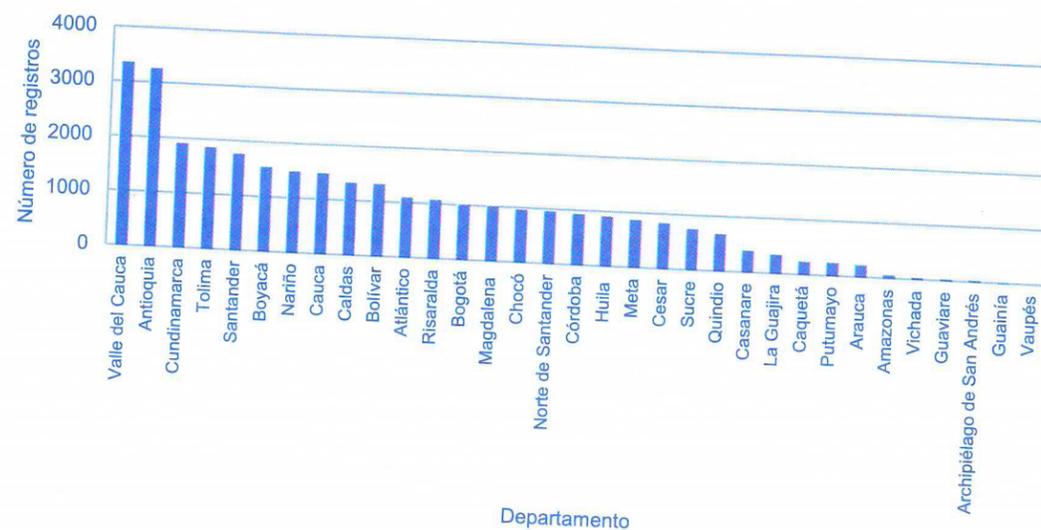
A partir de este trabajo, para la próxima actualización se espera una mayor participación de otros actores, de manera que pasemos de la recopilación de registros al análisis de casos que puedan representar referentes en la gestión del riesgo y en la construcción de metodologías y políticas más integradoras. El ejercicio que se presenta es una muestra de que todavía se requieren mayores esfuerzos en la integración de la información y en acciones con una consideración de la prevención y la planificación más determinante.

Metodología

El trabajo desarrollado se divide en dos partes. La primera dedicada al análisis de los registros departamentales la segunda al análisis de algunos casos específicos en tres municipios.

Los registros utilizados fueron seleccionados considerando tres eventos hidrológicos: inundaciones, deslizamientos y avenidas torrenciales. Se tomaron en cuenta los registros consignados en la base de datos DesInventar, de acceso público a través de la web,

Figura 1. Cantidad de registros de desastres con pérdidas por departamento en Colombia entre 1914 y 2011. Fuente: DesInventar en Paredes, 2012



que para Antioquia recoge información de la Base de datos del Departamento Administrativo del Sistema de Prevención, Atención y Recuperación de Desastres, DAPARD, con registros desde 1894.

En la segunda parte se incorporan al análisis 4 elementos considerados clave para la gestión del riesgo por inundación: registros de desastres asociados con eventos de inundación; registros de precipitación; planes de ordenamiento municipales y de cuencas hidrográficas; estudios e informes técnicos generados por atención de una emergencia o propuestas de medidas para mitigación de riesgos asociados con inundaciones.

Este análisis se ejecuta en tres localidades de tres municipios de Antioquia: Rionegro, Bello y Medellín.

Estudio general de los registros de desastres asociados con eventos hidrológicos en Antioquia. Distribuciones temporal y espacial

De acuerdo con los registros de la base de datos DesInventar, los departamentos Valle del Cauca y Antioquia son los que tienen mayor cantidad de registros de desastres con pérdidas en Colombia entre 1914 y 2011 (Figura 1).

Para la actualización del estado del arte del recurso hídrico en el departamento de Antioquia, son de especial interés los registros de desastres asociados con tres eventos hidrológicos: inundaciones, deslizamientos y avenidas torrenciales. La Figura 2 presenta la distribución temporal en el período 1970-2011 de los desastres asociados con cada uno de los eventos de interés a partir de 1970, que equivalen a más del 90 % de los registros de ese tipo que se han reportado en el departamento desde principios del siglo XX. Se observa una tendencia ascendente en la cantidad de registros entre 2008 y 2011. Debido a que no puede asegurarse una información completa, tampoco puede afirmarse que este aumento corresponda en efecto, a un aumento de los desastres.

La década 1997-2007 fue tomada como referente para el análisis de la ocurrencia en la actualización 2007-2009 del macroproyecto. En la Figura 3, la distribución por tipos de eventos hidrológicos de interés muestra que de 479 registros, el 63% se asoció con eventos de inundación, el 34% con deslizamientos y el 2% con avenidas torrenciales. Para los años 2008, 2009, 2010 y 2011 se observa un aumento notable en cantidad de registros por año y un cambio en la distribución por tipo de evento, ya que para estos cuatro años, de 651 registros el 38% se asoció con eventos de inundación, el 57% con deslizamientos y el 5% con avenidas torrenciales.

Figura 2. Distribución temporal de la cantidad de registros de desastres asociados con eventos hidrológicos en Antioquia: inundaciones, deslizamientos y avenidas torrenciales, para el período 1970-2011. Fuente registros: DesInventar

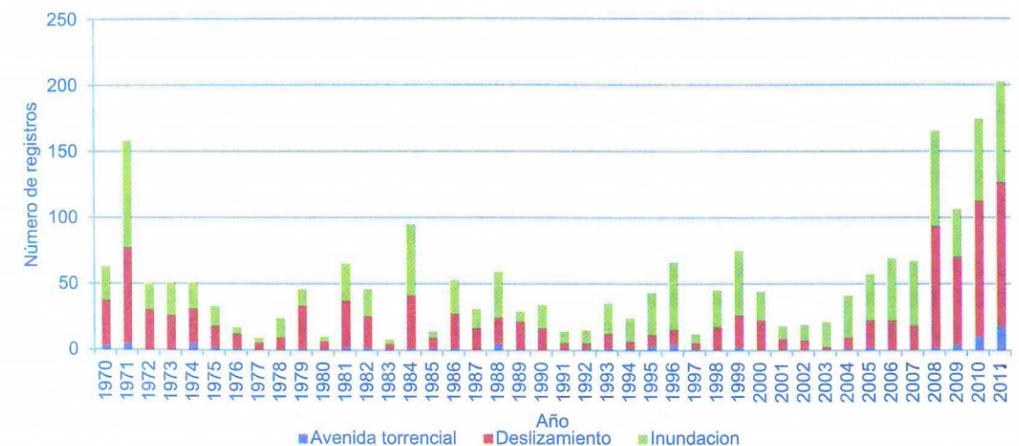


Figura 3. Distribución temporal de la cantidad de registros de desastres asociados con eventos hidrológicos en Antioquia: inundaciones, deslizamientos y avenidas torrenciales, para el período 1997-2011. Fuente registros: DesInventar



La resolución espacial de los registros en la base de datos DesInventar corresponde a la unidad municipal. Para un mejor análisis de la información de desastres, sigue haciendo falta el registro de la ubicación exacta del desastre para que sea posible relacionar los eventos entre sí y asociarlos con información hidrológica (espacial y temporal) o factores de ocupación del territorio que caracterizan los asentamientos humanos afectados por el desastre. En este documento se presenta la distribución espacial de los registros de desastres a escala municipal y también agrupada en las 9 subregiones del departamento que reúnen a los 125 municipios: 11 municipios en Urabá, 23 en Oriente, 6 en Bajo Cauca, 10 en el Valle de Aburrá, 17 en el Norte, 10 en el Nordeste, 6 en el Magdalena medio, 23 en Suroeste y 19 en Occidente.

Se retoma aquí el análisis realizado en la actualización anterior en la que se identificaron los años que superaron cierto número de registros para cada uno de los eventos de interés entre 1997 y 2007 para presentar en comparación con ellos la distribución espacial de los registros de desastres asociados con eventos hidrológicos en Antioquia en 2008, 2009, 2010, 2011.

En la Figura 4 se muestra la distribución de los registros de desastres asociados con eventos de inundación en el departamento de Antioquia para los años 1999, 2006 y 2007, que son los años de la década 1997-2007 que superan 42 registros anuales por inundación. Los años 2008, 2010 y 2011 superan la cantidad de 42 registros. En el año 2009 se registraron 36 desastres asociados con eventos de inundación. Entre 2008 y 2011, se presentaron en promedio anual 62 registros de desastres asociados con inundaciones frente a 163 promedio anual de registros por eventos hidrológicos. En la década 1997-2007 se identificó que en 1999, año con mayor cantidad de registros asociados con inundación, fueron 33 los municipios afectados en el departamento. En el período 2008-2011 se observa que en el año 2008 fueron 45 municipios los afectados por inundaciones y que 2011 fue el año con mayor cantidad de registros por este evento.

Todas las subregiones del departamento presentaron desastres asociados con eventos de inundación. En 2008 y en 2010 la subregión de Urabá (agrupa 11 municipios) tuvo más de 16 registros de desastres por inundaciones.

Entre 2008 y 2011 se registraron 651 desastres en Antioquia asociados con eventos hidrológicos. El 57% de los registros se asociaron con deslizamientos que afectaron entre el 33% (41) y el 51% (64) de los municipios del departamento. En comparación con los años de mayor cantidad de registros asociados con deslizamientos en la década de 1997 a 2007, los últimos cuatro años (2008-2011) presentan cantidades anuales de estos registros que como mínimo duplican lo registrado en 1999 y 2002; en particular, en 2010 y 2011 son cantidades cuatro veces mayores.

La Figura 5 muestra la distribución de los registros de desastres asociados con eventos de deslizamiento en el departamento de Antioquia en las nueve subregiones estratégicas. En 2008 y 2009 no se registraron en la base de datos desastres asociados con eventos de deslizamiento en los municipios de la subregión Urabá. En 2010, la subregión del Bajo Cauca no presenta registros asociados con deslizamientos.

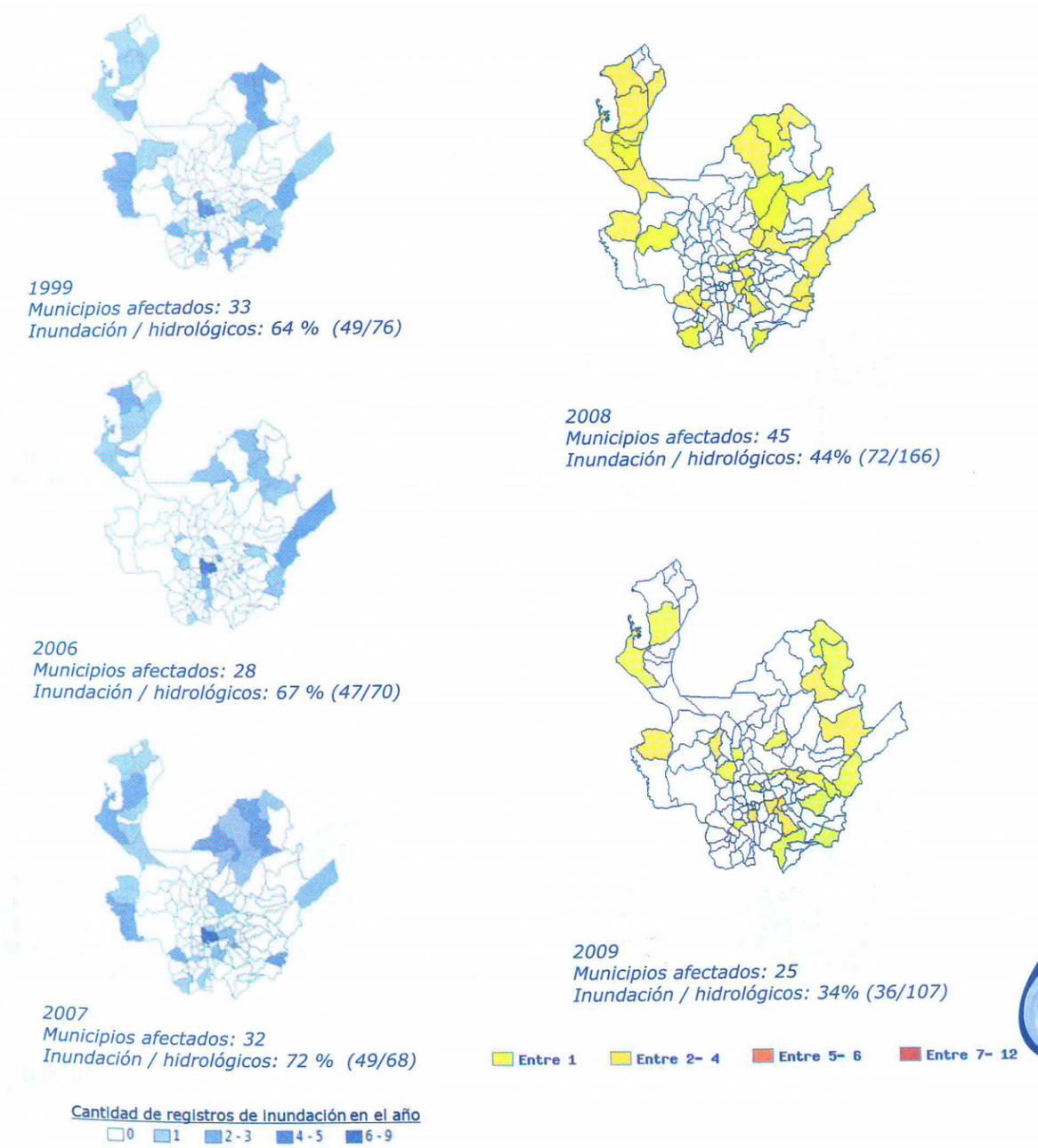
Para la subregión del Suroeste (agrupa 23 municipios) y la subregión del Oriente (agrupa 23 municipios) se registraron más de 16 desastres por año asociados con deslizamientos en 2008, 2010 y 2011 para la primera y en 2009, 2010 y 2011 para la segunda.

Los registros de desastres asociados con avenidas torrenciales no fueron más del 5% del total de registros de desastres asociados con eventos hidrológicos en la década de 1997 a 2007, y los años de mayor cantidad de registros en esa década (1999 y 2005) no superaron 3 registros por año ni afectaron más de 3 municipios. Para el período 2008-2011, la cantidad de registros asociados con este tipo de evento aumentaron por año, y alcanzaron a afectar hasta 15 municipios del departamento en 2011.

Los municipios de la subregión del Bajo Cauca no presentaron desastres asociados con avenidas torrenciales entre 2008 y 2011, en comparación con municipios de la subregión del Suroeste que presentaron registros de este tipo en los cuatro años. En 2010, la subregión del Oriente presentó la mayor cantidad de desastres asociados con avenidas torrenciales ocurridas en una misma subregión entre 1997 y 2011 (más de 7 en la subregión).

Debe considerarse que las condiciones topográficas e hidrometeorológicas de las cuencas hidrográficas del departamento de Antioquia favorecen el desarrollo de inundaciones súbitas o avenidas torrenciales, aunque en la base de datos DesInventar sea común que los registros de desastres asociados con estos eventos o con las inundaciones lentas, se clasifiquen de manera general como inundaciones.

Figura 4. Distribución espacial por municipio de los registros de desastres asociados con evento de inundación en Antioquia en 2008, 2009, 2010, 2011 frente a los años de mayor cantidad de ese tipo de registros en la década 1997-2007



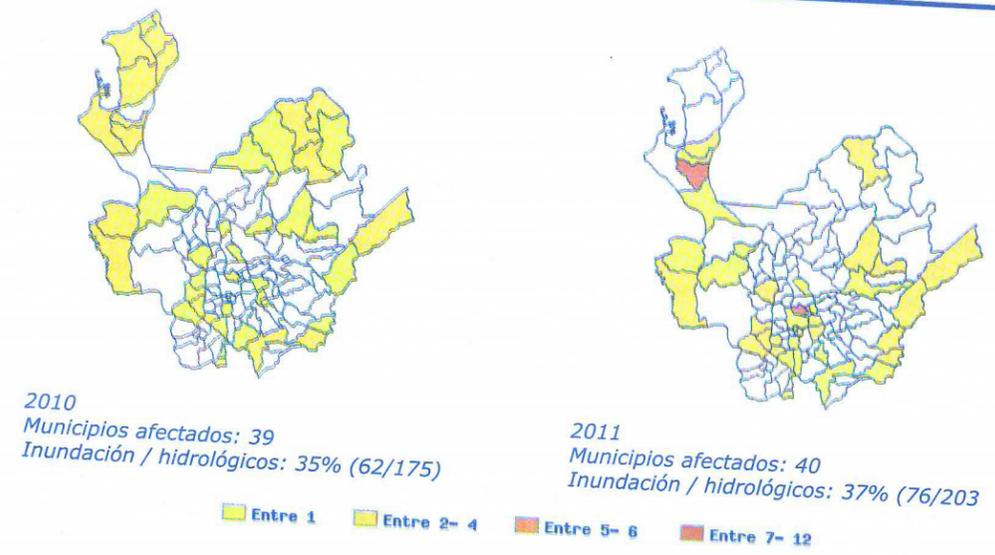
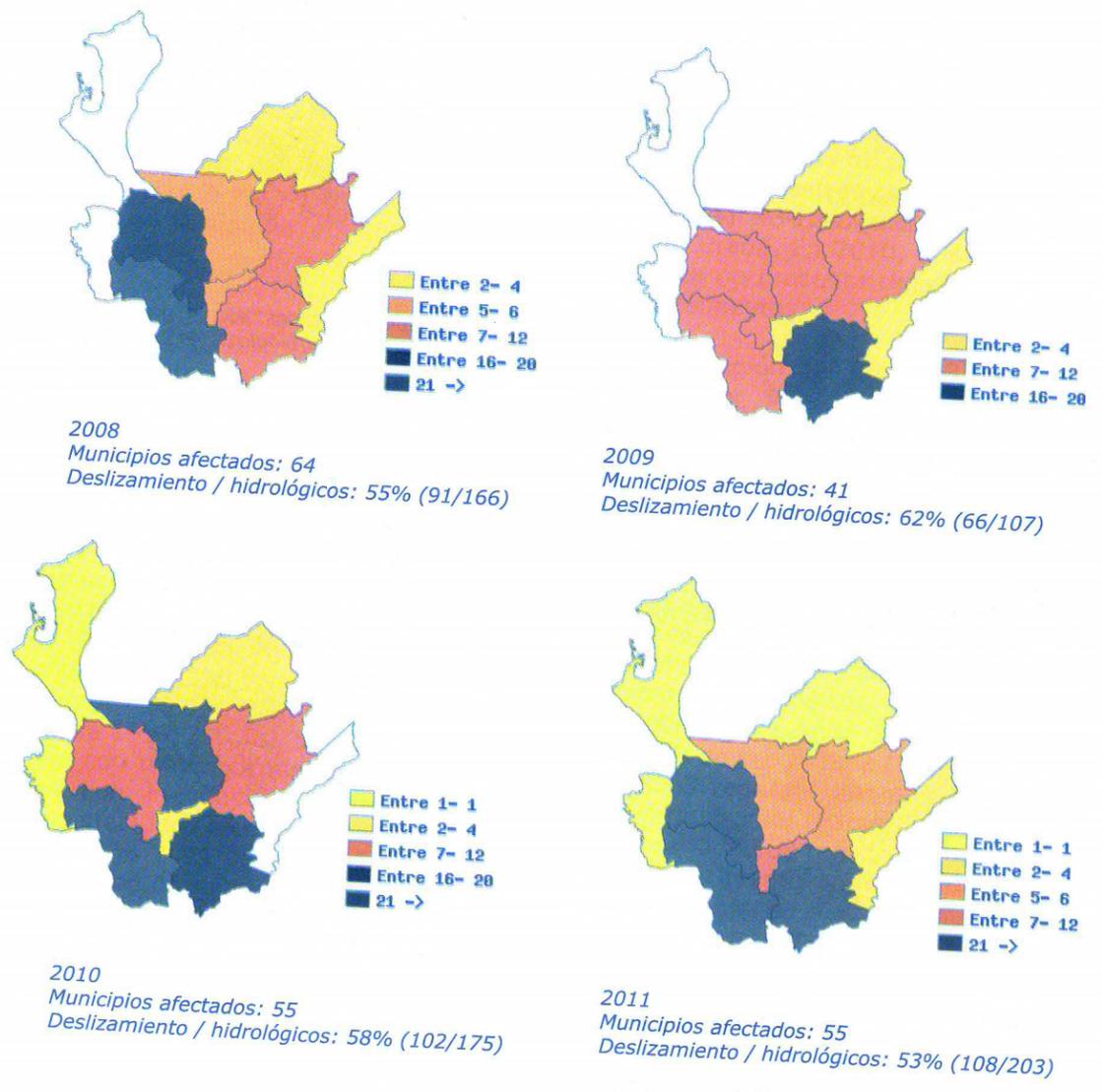


Figura 5. Distribución espacial por subregiones estratégicas de los registros de desastres asociados con eventos de deslizamiento en Antioquia en 2008, 2009, 2010 y 2011



Propuesta para el análisis de elementos clave para la gestión del riesgo por inundación

Se plantea una propuesta de análisis que involucra elementos existentes de planeación técnica, administrativa, jurídica y política del territorio para ser analizados en conjunto, de tal manera que permitan de forma dinámica conocer y entender el riesgo por inundación que es recurrente para unas condiciones específicas de geografía y ocupación humana del territorio (microcuencas) y a partir de allí proponer procesos de gestión integral, tal como se ha definido desde la Administración Nacional.

Se propone una metodología de análisis que evalúa la relación entre 4 elementos, siguiendo unas actividades organizadas en dos fases. Los elementos son: los registros de desastres; la hidrología; los planes de ordenamiento municipales y de cuencas; estudios e informes técnicos. En la primera fase se llevan a cabo las siguientes actividades:

1) En cada caso de estudio se selecciona un tramo de referencia de una corriente con registro de inundación. Tales registros deben encontrarse de preferencia en las bases de datos (p.e. en la de DESINVENTAR). El estado de estos registros es el primer indicativo de la gestión del riesgo. Se espera que cada registro se acompañe de la ubicación del evento, sus causas, y de informes técnicos. De acuerdo con el nivel de detalle se puede determinar la capacidad y la preparación de las organizaciones de atención del riesgo y de la administración pública. También se consultaron en esta etapa datos contenidos en reportes de prensa.

2) Con la información del registro se procede a la ubicación espacial del evento en un mapa. Cada municipio debe tener mapas digitales de su jurisdicción. En este trabajo se ha utilizado la información que ofrece Google Earth, suficiente para los propósitos y el alcance de la investigación.

3) Otra información importante son los registros hidrológicos. Tales registros tienen una estrecha relación con los eventos, permitiendo la identificación del riesgo de acuerdo con los valores de precipitación.

4) Todo municipio cuenta con un Plan de Ordenamiento Territorial y en algunos casos con Planes Integrales de Ordenamiento y Manejo de Microcuencas (PIOM) o de Cuencas (POMCA). Estos planes son revisados a la luz de los registros de los eventos. En este caso se hace posible evaluar la validez de los planes mediante su correspondencia con los registros de eventos. Se puede encontrar poca correspondencia debido a deficiencias en los estudios técnicos que dan origen a los POT, PIOM o POMCA, o bien por incumplimiento de los planes durante las administraciones, o en algunos casos por cambios provocados por desastres naturales.

La segunda fase de la metodología consiste en seleccionar una localidad específica de un evento recurrente en los municipios de estudio y adelantar las siguientes actividades:

- 1) Visita con toma de registro fotográfico.
- 2) Verificación de las obras propuestas para el lugar como medidas de mitigación.
- 3) Evaluación de los estudios técnicos para atender el riesgo.

La metodología se aplica para 3 municipios en el departamento: Medellín, Rionegro y Bello. La aplicación de la metodología para 3 municipios en el departamento y conclusiones resultantes del análisis se recopilan en el documento de actualización. En común, lo que se ha visto en los tres casos presentados es que el riesgo por inundación lleva, por lo general, por parte de las administraciones públicas, a la ejecución de obras para alterar el cauce, ya sea mediante el dragado, o la construcción de muros de contención y canalizaciones. Poco se contempla la reubicación de la población, a no ser en casos extremos donde la zona ya se vuelve inhabitable.



Es pues el suceso natural quien finalmente obliga a tomar esta medida, mas no una adecuada planificación del territorio. Aunque el POT es el mecanismo de planificación del territorio, los tres casos muestran que las zonas de riesgo en el POT no están bien delimitadas. El POT no responde así con efectividad a la planificación del territorio. Esta grave "vulnerabilidad" del POT tiene además dos caras. De un lado, la falta de estudios técnicos de buena calidad, la falta de visiones más holísticas de ciudad, en particular en lo que se refiere a las corrientes superficiales (por ejemplo, el desconocimiento de metodologías para la restauración de cauces y medidas de tipo biotecnológico). Y por el otro lado, la falta de articulación del POT con los desarrollos de la administración municipal. En cuanto a lo primero, es difícil aspirar a estudios técnicos de calidad si no se incluye en las acciones de la administración municipal estudios de diagnóstico y prevención del riesgo con una visión más amplia, en la que se consideren no solo medidas estructurales para el control del riesgo sino también no estructurales (por ejemplo una legislación efectiva para el control de zonas de inundación). En cuanto a la articulación del POT con la administración municipal, la dificultad parece ser aún mayor. La falta de cumplimiento del POT por parte de las administraciones no solo lo hace ineficaz sino además obsoleto.

CONCLUSIONES

La actualización de los registros ha mostrado un aumento en los eventos hidrológicos en 2010 y 2011 y un cambio en la distribución por tipo de evento. Para los años 2008 a 2011 se cuenta con 651 registros, 57% por deslizamientos, 38% por inundación y 5% por avenidas torrenciales.

La actualización de los registros ha mostrado un aumento en los eventos hidrológicos en 2010 y 2011 y un cambio en la distribución por tipo de evento. Para los años 2008 a 2011 se cuenta con 651 registros, 57% por deslizamientos, 38% por inundación y 5% por avenidas torrenciales.

La estructura general de los sistemas de prevención y atención del riesgo, sea de nivel nacional, departamental o municipal, parecen cumplir más acciones de atención que de prevención. Las acciones de atención son la respuesta que toda administración debe cumplir con su comunidad, pero si no se acompañan de planes de prevención, no irán más allá de consumir recursos. Medidas de control de inundaciones, son una forma de medidas de control del riesgo principalmente de tipo estructural. Lo que se ha visto en los tres casos presentados es que el riesgo por inundación lleva, por lo general, por parte de las administraciones públicas, a la ejecución de obras para alterar el cauce, ya sea mediante el dragado, o la construcción de muros de contención y canalizaciones. Poco se contempla la reubicación de la población, a no ser en casos extremos donde la zona ya se vuelve inhabitable. Es pues el suceso natural quien finalmente obliga a tomar esta medida, mas no una adecuada planificación del territorio.

La metodología que se ha propuesto y aplicado en los casos que se han evaluado, ha pretendido mostrar que se cuenta con elementos para el análisis del riesgo. Que se requiere sobre todo más compromiso por parte de los Sistemas para la Prevención y Atención del Riesgo y por parte de las administraciones nacionales, departamentales y municipales. En cuanto a los primeros, la inclusión de elementos más holísticos para el análisis del riesgo. En cuanto a los segundos un mayor compromiso con el diseño y el cumplimiento de los POT.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (2010). Gestión ambiental metropolitana 2010. Medellín: AMVA.
- CTA (Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia) (2010). Actualización del estado del arte del recurso hídrico en el departamento de Antioquia 2007-2009. Convenio Interinstitucional Cátedra del Agua. Medellín
- CRED; OMS; Universidad Católica de Lovaina (2011). Annual Disaster Statistical Review 2010. The numbers and trends. [en línea]. Disponible en Internet: http://www.cred.be/sites/default/files/ADSR_2010.pdf
- CRED; OMS; Universidad Católica de Lovaina (2012). Annual Disaster Statistical Review 2011. The numbers and trends. [en línea]. Disponible en Internet: http://cred.be/sites/default/files/2012.07.05.ADSR_2011.pdf
- DesInventar. Base de datos. [en línea]. Disponible en Internet: <http://online.desinventar.org/EM-DAT>. Base de datos. [en línea]. Bruselas. Disponible en Internet: <http://www.emdat.be/>
- Paredes Peña, Diego Fernando (2012). Evaluación de sitios inundados en el departamento de Antioquia. Un estudio de casos. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil. Escuela de Ingeniería de Antioquia.
- Santana Rodríguez, Luis Marino; Escobar Martínez, Francisco. Las bases de datos globales y SIG en la toma de decisiones: oportunidades y limitaciones. [en línea]. 2005. Disponible en Internet: <http://www.ua.es/grupo/giecryal/documentos/docs/L.M.%20Santana.pdf>
- Weathon, J. M. (2005). Review of river restoration motives and objectives. Recuperado el 2010, de University of Southampton. [en línea]. Disponible en Internet: <http://www.geog.soton.ac.uk/users/wheatonj/downloads/motivesandobjectives.pdf>

SERVICIOS ECOSISTÉMICOS EN EL DEPARTAMENTO DE ANTIOQUIA, COLOMBIA

Autores: - María del Pilar Arroyave M. - Magíster en Ecosistemas Terrestres y Acuáticos
Escuela de Ingeniería de Antioquia
- María Elena Gutiérrez L. Magíster en Biología de la Conservación.
Escuela de Ingeniería de Antioquia
- Juan Camilo Villegas P. - Doctor en Recursos Naturales - Ecohidrología
Universidad de Antioquia

Correo electrónico: maarr@eia.edu.co; ammagut@eia.edu.co; villegas@udea.edu.co

RESUMEN

Los servicios ecosistémicos son la base para la identificación de los ecosistemas estratégicos y para la formulación de acciones encaminadas a su conservación. En el presente artículo se hace una síntesis de los estudios relacionados con la definición, cuantificación y valoración de los servicios ambientales que se han realizado en Antioquia. En la mayoría de los reportes se identifican los servicios ecosistémicos de áreas protegidas y en algunos se incluyen la valoración económica de los mismos y los esquemas de pago por servicios ambientales como estrategia de conservación. Solo un número reducido de estudios trata sobre la estimación cuantitativa por lo que se considera que se deben adelantar proyectos relacionados con este tema. Se proponen unas variables que sirven de indicadores para la medición y seguimiento de esto servicios. La conservación de suelos y la regulación hídrica son los temas con mayor porcentaje de estudios y la región más estudiada es el Valle de Aburrá. Se establece la relación directa el mantenimiento de los servicios ecosistémicos y la sostenibilidad ambiental.

PALABRAS CLAVES

servicios ecosistémicos, ecosistemas estratégicos, regulación hídrica, ciclo de nutrientes, captura de carbono, conservación de suelos, Antioquia.

ABSTRACT

Ecosystem services are the basis for the identification of strategic ecosystems and for the formulation of actions aimed at their conservation. This article is a synthesis of the studies related to the definition, quantification and valuation of the environmental services that have been made in Antioquia. Ecosystem services in protected areas are identified in the majority of reports and some include economic valuation and the payment schemes for environmental services as a strategy for conservation. Only a small number of studies deal with the quantitative estimation; it is considered that projects related to this issue should get ahead. We propose a few variables that serve as indicators for the measuring and monitoring of these services. Soil conservation and water regulation are the themes with highest percentage of studies and the region most studied is the Aburrá Valley. A direct relationship between the services ecosystem and environmental sustainability is established.

KEYWORDS

ecosystem services, strategic ecosystems, water regulation, nutrient cycling, carbon sequestration, soil conservation, Antioquia.

INTRODUCCIÓN

Durante las últimas dos décadas, el reconocimiento de los servicios ambientales o ecosistémicos ha adquirido mayor importancia y uso en las políticas globales de conservación (Bastian et al. 2011). Este concepto fue inicialmente introducido por Costanza et al. (1997), quienes evidenciaron la contribución fundamental de éstos al bienestar de la población mundial y el soporte al funcionamiento de los sistemas bióticos del planeta. Los servicios ecosistémicos fueron formalmente definidos por las Naciones Unidas en el Millenium Ecosystem Assessment (MEA, 2005) como los beneficios que las personas obtienen de los ecosistemas.

En este artículo se presenta una síntesis de la actualización del estado del arte del macroproyecto "Servicios ecosistémicos en el departamento de Antioquia", anteriormente denominado "Interacciones Agua-Suelo-Vegetación". Se pretende dar a conocer los resultados de los estudios más relevantes sobre las interacciones entre estos recursos, asociarlos con los servicios que prestan los ecosistemas y analizar el estado de avance en el tema de los servicios ambientales para las subregiones del departamento de Antioquia, Colombia.

En Colombia, los términos servicios ecosistémicos y servicios ambientales son usados como sinónimos, aunque estos últimos se han asociado principalmente con la valoración económica de los beneficios derivados de las funciones de los ecosistemas. Es así como el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (actualmente Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible) formuló en el año 2008 la Estrategia Nacional de Pago por Servicios Ambientales (MAVDT, 2008) con el fin de "diseñar e implementar instrumentos que coadyuven a la conservación y recuperación de los recursos naturales y los servicios ambientales que proveen, con el consecuente beneficio para la calidad de vida de la población". Sin embargo, el término servicios ecosistémicos ha sido adoptado como el término estándar en la literatura científica internacional desde que fue formalizado por las Naciones Unidas en el MEA (2005).

De acuerdo con el MEA (2005), dichos servicios pueden clasificarse en los siguientes tipos:

- Servicios de provisión:** son los productos materiales obtenidos de los ecosistemas incluyendo alimentos, agua, maderas y fibras.
- Servicios de regulación:** son los beneficios resultantes del sostenimiento de los procesos ecosistémicos, como la regulación del clima e inundaciones, la calidad del agua y del aire, la captura de carbono y el control de enfermedades humanas.
- Servicios culturales:** son los beneficios no materiales provenientes de la percepción de los ecosistemas, como la recreación, la belleza escénica y el enriquecimiento espiritual.
- Servicios de soporte:** son aquellos necesarios para la producción de los demás servicios, como producción primaria, formación de suelos, fotosíntesis y ciclos de nutrientes.

En el desarrollo del proyecto se realizaron las siguientes actividades: búsqueda, comparación, síntesis y análisis de información. Se recopiló la información existente en el medio sobre los servicios ecosistémicos en los centros de documentación de las universidades e instituciones del departamento de Antioquia, y posteriormente se consignó en una base de datos.

El análisis de la información recopilada permitió identificar los estudios relacionados con los servicios ambientales en el departamento y su aplicación en los procesos de gestión de áreas protegidas y en la evaluación de la sostenibilidad ambiental. A partir de este análisis se determinaron las regiones y los temas específicos más estudiados. Así mismo, se identificaron las principales fortalezas y debilidades en el conocimiento de este tema en el departamento, que faciliten formular algunos lineamientos de estrategias y proyectos en el futuro.

Servicios ecosistémicos y ecosistemas estratégicos.

Los ecosistemas estratégicos en una región se definen de acuerdo con los bienes y servicios que estos ecosistemas prestan a la comunidad. Márquez (1996) los define como aquellos que cumplen funciones vitales para el bienestar y desarrollo de la sociedad. Por su parte, en el Plan de Ordenamiento Territorial de Medellín (2006) se definen los ecosistemas estratégicos como "una porción geográfica, en la cual la oferta ambiental, natural o inducida por el hombre, genera un conjunto de bienes y servicios ambientales imprescindibles para la población que los define como tales".

La identificación de los servicios ambientales, además de ser útil para la definición de ecosistemas estratégicos, permite conocer la oferta natural y se constituye en la base para la formulación de los objetivos de conservación de planes de manejo de cuencas hidrográficas y de áreas protegidas. Adicionalmente, son considerados en las políticas territoriales y ambientales, en el análisis de impactos de proyectos de infraestructura y en la evaluación de la sostenibilidad urbana. Un número significativo de los estudios analizados en la presente actualización trata sobre la identificación de los servicios ambientales en determinada región geográfica, y de cómo el reconocimiento de estos servicios se ha utilizado como criterio para la definición de ecosistemas estratégicos.

En un estudio publicado por Corantioquia (2001) se realizó la identificación, caracterización y valoración económica de los servicios ambientales prestados por ecosistemas localizados en el área de influencia del Valle de Aburrá, donde se localiza Medellín, capital del departamento de Antioquia y otros municipios del área metropolitana. La identificación y caracterización de los ecosistemas estratégicos se hizo en función de los servicios ambientales que proporcionan. Para la caracterización se tuvo en cuenta también la oferta ecosistémica, la demanda antrópica de ésta y las amenazas que por acciones del hombre tiene dicha oferta.

Para la valoración económica se parte de estudios de referencia y se aplica el método de valoración marginal que utiliza como medida general la disposición a pagar (Costanza et al., 1997). Los servicios identificados fueron: transporte y depuración de contaminantes, fijación de carbono, regulación hídrica, seguridad alimentaria y provisión de bellezas escénicas y paisajísticas. Finalmente, se desarrollaron propuestas de directrices para la gestión de los ecosistemas estratégicos.

En la misma región, Agudelo (2003) utilizó los servicios ambientales como uno de los criterios para definir los ecosistemas estratégicos del Valle de Aburrá. Se seleccionaron los ecosistemas que tuvieran ciertos elementos como cobertura vegetal, corredores de biodiversidad y variedad de servicios ambientales prestados, entre otras. Similarmente, para la definición del Sistema Metropolitano de Áreas Protegidas en el Valle de Aburrá, se utilizó la oferta de bienes y servicios ambientales como uno de los criterios para su identificación (Hoyos, 2007). Las variables consideradas fueron las siguientes: regulación y potencial hídrico, regulación climática, prevención y control de la erosión y sedimentación, barrera de expansión urbana, depuración de contaminación y disminución de CO₂. Se hizo, además, un reconocimiento y valoración de la existencia de atributos que dan cuenta del aporte de bienes y servicios ambientales. En dicho trabajo se hizo un análisis a través de talleres con un grupo de expertos de universidades, corporaciones autónomas, ONG ambientales y comunidades locales.

Martínez, García y López (2011) identificaron los servicios ambientales que presta una zona de la subregión Norte en el departamento de Antioquia, teniendo en cuenta su alta riqueza en diversidad biológica e hídrica. Los productos finales están conformados por mapas que fueron analizados y que permitieron concluir que la zona estudiada tiene importantes fortalezas para prestar los servicios de regulación de gases, regulación y prevención de desastres, regulación y oferta hídrica, refugio de especies y producción de alimentos y materias primas, dadas sus condiciones de diversidad biogeográfica.

Para la elaboración del diagnóstico de bienes y servicios ambientales del páramo de Belmira, Silva (2007) realizó una caracterización de los principales bienes y servicios ambientales ofrecidos por este ecosistema. Se hizo especial énfasis en el análisis de acceso y disponibilidad de los recursos hídricos en la zona del páramo, con el fin de generar propuestas de uso y manejo más eficiente del agua y de manejo conjunto con la comunidad, además de dar insumos a los procesos de conversión y fortalecimiento de líderes locales en el manejo de los mismos. Se hizo una revisión de información secundaria, entrevistas con organizaciones y usuarios directos del recurso hídrico, una evaluación de la cantidad y calidad del agua, y reuniones con las juntas administradoras de acueductos.

En el Plan de manejo ambiental del páramo de Santa Inés, ubicado en el distrito de manejo integrado del sistema de páramos y bosques altoandinos del noroccidente medio de Antioquia, elaborado por el Instituto Alexander von Humboldt (IAvH) y Corantioquia (2011), se pretende establecer mecanismos claros y concretos para el reconocimiento, conservación, uso sostenible y con sentido social equilibrado de los recursos naturales que deriven del páramo de Santa Inés y sus áreas inmediatas de influencia. De acuerdo con este plan, la zonificación y ordenamiento territorial se basan en el potencial de oferta de los siguientes bienes y servicios ambientales: recursos genéticos (alta biodiversidad), formación y estabilización de suelos, regulación hídrica y escenarios recreativos y de belleza escénica.

En el Plan de manejo sostenible y participativo de los bosques en San Nicolás elaborado por Cornare (2004) se plantea un modelo de financiación alternativo para el manejo sostenible de los bosques en San Nicolás. El Plan permite la implementación de estrategias de conservación de los bosques y del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) para proyectos de cambio de uso del suelo, propuesto como mecanismo de flexibilidad en el protocolo de Kyoto a través de actividades forestales productivas construidas de manera participativa con diversos actores en la región. Este plan justifica la importancia del manejo sostenible de los bosques con base en la calidad y cantidad de los siguientes bienes y servicios:

mitigación del cambio climático con la captura y almacenamiento de gases de efecto invernadero (GEI), regulación hídrica por riego y generación de hidroelectricidad, control de la erosión hídrica, ecoturismo, productos forestales maderables y no maderables.

En el Plan de Ordenación y Manejo de la cuenca del río Aburrá (AMVA et al., 2007) se propone como uno de los lineamientos de política el desarrollo de mecanismos económicos para la gestión ambiental, el cual tiene como objetivo definir los beneficios y costos en los sistemas de pago por servicios ambientales para implementar mecanismos que permitan recaudar recursos económicos para el desarrollo de planes y programas de protección, conservación y uso racional de los recursos naturales en áreas estratégicas.

En síntesis, de acuerdo con este diagnóstico, los servicios ecosistémicos que con mayor frecuencia se abordan en estos estudios son los de regulación, de los que sobresale la regulación hídrica y de gases (tanto contaminación atmosférica como efecto invernadero). El alcance de muchos de estos trabajos llega hasta la identificación, en un momento del tiempo, de atributos físico-bióticos de los ecosistemas que los hacen potencialmente aptos para el mantenimiento de funciones que soportan los servicios. Sin embargo, es necesario que se desarrolle ejercicios de monitoreo y seguimiento que permitan cuantificar y entender efectivamente estos procesos ambientales, y sus potenciales respuestas ante perturbaciones a las condiciones de los ecosistemas. Adicionalmente, es necesario avanzar de la identificación de servicios potenciales (a partir de atributos físico-bióticos) a la valoración (económica y social) de ellos. Esta tarea es urgente y compleja, especialmente en un ámbito como el del departamento, con tasas de transformación ecosistémica elevadas que pueden amenazar la potencialidad de las áreas identificadas para mantener sus condiciones de potencialidad en la oferta de servicios. Por esto, es urgente desarrollar estos mecanismos de valoración, que permitan contraponer el beneficio ecosistémico con el de otros usos económicos del territorio.

Sostenibilidad urbana.

Una ciudad será sostenible ambientalmente si gestiona adecuadamente los ecosistemas que están dentro de su jurisdicción y apoya la gestión de los ecosistemas de los que se derivan los servicios de que ella se beneficia. Este es un reto para la gestión ambiental y la academia, puesto que para algunos servicios ecosistémicos es difícil establecer la conectividad espacial entre la fuente y el receptor del servicio. En el caso de Antioquia, y avanzando en esta dirección, se desarrolló un ejercicio de aplicación de la identificación de los servicios ecosistémicos como herramienta para el análisis de la sostenibilidad ambiental en regiones urbanas (González, 2009) para Medellín y el Valle de Aburrá. Este trabajo propone una metodología para la identificación de servicios ecosistémicos (SE) de importancia en regiones urbanas, para lo cual se presenta un listado de 40 SE identificados en los diferentes estudios a nivel mundial y se definen unos criterios para la selección de éstos. Por último, se expone un análisis sobre la planeación, formulación y ejecución de políticas territoriales y ambientales, a partir de la necesidad del mantenimiento de estos servicios.

González (2010) identificó como servicios ecosistémicos prioritarios para la gestión urbana del Valle de Aburrá los siguientes: generación y suministro de agua, transporte, dilución y tratamiento de contaminantes, generación de oxígeno, asimilación de gases de efecto invernadero y retención de contaminantes del aire, recepción y desintoxicación de residuos sólidos peligrosos, capacidad de respuesta a los cambios ambientales y moderación de los impactos de los

eventos atmosféricos y climáticos extremos, bellezas escénicas, estéticas y paisajísticas, producción de alimentos y materias primas. Para determinar la dependencia de una región urbana respecto a un servicio ambiental, se evaluaron cinco parámetros determinantes de sostenibilidad ambiental: social, ecológica, política, habitabilidad, y económica, y se asignó un puntaje siguiendo un rango desde muy bajo hasta muy alto. Con base en esto se identificaron los servicios ecosistémicos claves para la sostenibilidad ambiental urbana.

Estimación cuantitativa de los servicios ecosistémicos.

Una vez identificados los servicios que prestan los ecosistemas en determinada región, es necesario realizar una cuantificación de éstos. Por ejemplo, en el servicio de reducción de gases de efecto invernadero es importante estimar la cantidad de carbono fijado por unidad de área y tiempo. En la Tabla 1 se presenta una propuesta de variables que pueden ser utilizadas como indicadores para verificar el cumplimiento de cada servicio ecosistémico. Infortunadamente, este tema no ha tenido un gran avance en el departamento, por lo que no se cuenta con mucha información para determinar los valores de estos indicadores. La mayoría de estudios consultados se limitan a la identificación de los servicios ecosistémicos basándose en la percepción de la comunidad y en atributos como la presencia de nacimientos de agua y de vegetación natural poco intervenida.

Tabla 1. Propuesta de indicadores para los servicios ecosistémicos

Servicio ecosistémico	Indicador	Unidad de medida
Regulación Climática	Fijación del carbono	Ton/ha*año
Regulación Hídrica	Porcentaje de la escorrentía con respecto a la precipitación	Porcentaje
Dilución contaminante	DBO	mg/L
	Sólidos suspendidos	Kg/día
	Sustancias tóxicas	Kg/día
Conservación de suelos	Pérdida de suelo	Kg/ha
	Porcentaje áreas erosionadas	Porcentaje
Recreación	Áreas recreativas	Hectáreas

Fuente: elaboración propia

Otros dos indicadores que pueden ser utilizados son el área con coberturas vegetales naturales y la tasa de deforestación. Para Antioquia, se reporta una deforestación promedio anual de 25.280 hectáreas durante el periodo 2000 - 2007 (Yepes et al., 2011), lo que significa que en el departamento se tiene una de las tasas de deforestación más altas del país, donde el promedio anual durante el mismo periodo es de aproximadamente 300.000 hectáreas (Ideam, 2010). La tala afecta la regulación hídrica y climática, el equilibrio del ecosistema, la biodiversidad y la capacidad productiva del suelo.

Con relación a los efectos de diferentes coberturas vegetales en la regulación hídrica, el ciclo de nutrientes y el control de erosión, Ortega et al. (2012) reportaron en un estudio en la quebrada El Hato, subcuenca del río Grande, los beneficios que tienen los bosques naturales en estas funciones ecosistémicas. Al comparar cultivos de papa, pastos, bosque secundario y rastrojo, se registró el mejor efecto regulador en tipo de cobertura boscosa, con valores anuales de 0,3% de escorrentía superficial, 6 kg/ha de pérdida de suelo y flujos de nitrógeno y fósforo en la escorrentía de 6,6 y 0,4 Kg/ha, respectivamente. La escorrentía en los cultivos de papa fue ocho veces mayor que en el bosque y en los pastos fue cien veces mayor. La pérdida de nitrógeno en los pastos fue 108 veces mayor que el bosque y de fósforo fue 48 veces mayor. De estos resultados se concluye la importancia de los bosques en la regulación hídrica y en la conservación del suelo, contribuyendo así al servicio ambiental del suministro de agua, tanto en cantidad como en calidad.

Pago por servicios ambientales como estrategia de conservación.

Desde el punto de vista normativo, el artículo 111 de la Ley 99 de 1993, modificado por el artículo 210 de la Ley 1450 de 2011 (Plan de Desarrollo Nacional), estipula que los departamentos y municipios deben dedicar un porcentaje no inferior al 1% de sus ingresos corrientes para la adquisición y mantenimiento de áreas de importancia

estratégica para la conservación de recursos hídricos que surten de agua los acueductos municipales, distritales y regionales o para financiar esquemas de pago por servicios ambientales. Las autoridades ambientales deben definir las áreas prioritarias a ser adquiridas con estos recursos o dónde se deben implementar los esquemas por pagos de servicios ambientales de acuerdo con la reglamentación que el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial expida para el efecto.

El pago por servicios ambientales corresponde al incentivo económico que las entidades territoriales reconocen a los propietarios, poseedores regulares o tenedores de predios ubicados en las áreas de importancia estratégica que surten de agua los acueductos, en razón a sus acciones o decisiones sobre el uso del suelo que permiten la conservación, restauración y rehabilitación de los ecosistemas naturales y, consecuentemente, la provisión y/o mejoramiento de los servicios ambientales asociados al recurso hídrico.

De acuerdo con el proyecto de decreto para reglamentar el artículo 111, para la selección de los predios, se deberán evaluar al menos los siguientes criterios:

- Presencia en el predio de corrientes hídricas, manantiales, afloramientos o reservorios de agua.
- Proporción de coberturas y ecosistemas naturales poco o nada intervenidos presentes en el predio.
- Ubicación del predio en la zona de mayor recarga o suministro hídrico.
- Grado de amenaza de los ecosistemas naturales por presión antrópica.
- Fragilidad de los ecosistemas naturales existentes.
- Conectividad ecosistémica.
- Incidencia del predio en la calidad y cantidad del agua que reciben los acueductos beneficiados.

Como se puede observar, la aplicación de este artículo requiere la caracterización de los ecosistemas presentes en los predios, la evaluación de los servicios que éstos prestan y el análisis de los impactos humanos que puedan afectar la oferta ambiental. De acuerdo con el informe de la Contraloría de Antioquia (2012), 81 municipios del departamento tienen identificadas las áreas potenciales que se deben adquirir para la protección de cuencas y abastecimiento de acueductos.

Con el fin de valorar los recursos naturales para la gestión ambiental y definir una renta de la conservación del agua en el Páramo de Belmira (Antioquia), González (2002) propone una metodología para definir una renta de la conservación del agua, estimada a partir de un análisis costo-beneficio, de acuerdo con el sistema productivo. Con este estudio se estableció la relación entre prestación de servicios ambientales y renta del suelo, que permita identificar los elementos a considerar en los procesos de planificación y gestión urbana. Se concluye que es mayor el costo de la compra de tierras para la conservación, que el pago de renta por conservación.

Correa (2005) realizó la valoración económica del recurso hídrico como servicio ambiental prestado por el Páramo de Sonsón. El trabajo constituye una aproximación a la valoración económica del recurso hídrico como servicio ambiental prestado por este páramo. Se pretende encontrar una estimación de la disponibilidad a pagar de los habitantes de este municipio por la protección del páramo lo que implica tener agua potable por un tiempo indefinido. Se evidencia que los habitantes del casco urbano del municipio muestran una alta disponibilidad a pagar por la protección del páramo, cuyo valor monetario puede ser utilizado para el desarrollo de un proyecto de recuperación, conservación y manejo integral del ecosistema de manera que se evite la escasez del agua potable en el municipio.

González (2008) elaboró una propuesta de pago por servicios ambientales (PSA) en la cuenca la Sopetrana (Antioquia).

En el estudio se obtuvo un indicador cuantificable de los costos de oportunidad de los usos de suelo y demás características socioeconómicas en la cuenca para sugerir modificaciones y contribuir a la mejora de las condiciones de calidad ambiental y social de ésta. Como resultado principal, se plantean lineamientos metodológicos para la implementación de este tipo de esquemas, los cuales integran el análisis ambiental y social. Este proceso conlleva no sólo a la formulación de los lineamientos básicos para la aplicación de PSA, sino que constituye una propuesta que involucra la participación comunitaria como elemento estratégico en la resolución de conflictos asociados al uso de los recursos en el territorio de los que depende en gran medida el éxito de la gestión del agua.

En la región del oriente antioqueño, Cornare desarrolló un Modelo de Financiación Alternativa para el Manejo Sostenible de los Bosques de San Nicolás (Tobón, 2008). En el estudio se reconoce la importancia, no solamente de la valoración económica de los bienes y servicios forestales en la región, sino la influencia que el valor social y ambiental tiene en la definición de los valores de mercado. Este proyecto se propone probar y perfeccionar, sobre la experiencia de un proyecto piloto, un modelo alternativo de financiación del manejo sostenible de los bosques en el Valle de San Nicolás, que combine el manejo sostenible de los bosques con fuentes de financiación alternativas tales como la inversión privada y las posibilidades que podría ofrecer el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) para la región.

En el municipio de Medellín se cuenta con la formulación del proyecto MDL forestal "Más bosques para Medellín: un ambiente sano para el presente y el futuro" en el municipio de Medellín (Hoyos, 2009). Este proyecto busca obtener recursos internacionales mediante la venta de créditos de carbono a través del establecimiento de plantaciones forestales, sistemas agroforestales, sistemas silvopastoriles y modelos de regeneración natural asistida, teniendo en cuenta la tradición socioeconómica y cultural de la población asentada en los corregimientos del municipio de Medellín.

En la región metropolitana del Valle de Aburrá, se desarrolló el estudio de factibilidad y socialización Institucional de la implementación de un Proyecto Forestal bajo el mecanismo de Desarrollo Limpio - MDL (Carbono y Bosques, 2011). Se encontró un área elegible potencial de 9.436 ha, principalmente en los municipios de Barbosa, Bello y Girardota. Se determinó que las coberturas más apropiadas para la ejecución del proyecto son los pastos (8.545 ha), cultivos (624 ha) y rastrojos bajos (267 ha), debido a las condiciones de elegibilidad en el marco regulatorio del MDL. Durante el estudio, se realizaron diversos acercamientos con expertos forestales de entidades territoriales y académicas, con el fin de definir los modelos forestales productivos más óptimos para las condiciones de la zona, haciendo uso de especies nativas de alto potencial comercial, teniendo en cuenta el juicio y las experiencias desarrolladas por los expertos.

A partir de estas concertaciones, se propusieron sistemas forestales comerciales, agroforestales, silvopastoriles y de regeneración natural asistida.

Temas y subregiones más estudiadas.

En la Tabla 2 se observa que el tema con mayor porcentaje de estudios corresponde al servicio ambiental de la conservación de suelos, seguido de la regulación hídrica, el ciclo de nutrientes y la captura de carbono. Sin embargo, esto no indica que la cuantificación de estos servicios se encuentre en un estado avanzado. La identificación de los servicios ambientales y su valoración económica presentan igual porcentaje, dado que en varios estudios estos dos aspectos se desarrollan de manera conjunta.

Tabla 2. Temas tratados en los estudios consultados

Temas tratados	Número estudios	porcentaje de estudios que trataron el tema
Identificación de Servicios Ambientales	12	6,2
Valoración económica de Servicios Ambientales	11	5,7
Ecosistemas estratégicos	5	2,6
Regulación hídrica	82	42,5
Captura de carbono	18	9,3
Ciclos de nutrientes	31	16,1
Conservación de suelos	93	48,2

Fuente: elaboración propia

En la Tabla 3 se observa que la subregión que presenta el mayor número de estudios es el Valle de Aburrá, donde se han desarrollado varios trabajos relacionados con la identificación de servicios ambientales, su valoración económica y la evaluación de la sostenibilidad ambiental urbana. Le siguen la región Nordeste, Norte y Oriente,

donde principalmente se han identificado ecosistemas estratégicos y áreas para la implementación de proyectos de desarrollo limpio, generalmente de fijación de carbono. El bajo porcentaje reportado para las subregiones del Magdalena Medio y Urabá indican la necesidad de llevar a cabo un mayor número de estudios en estas áreas.

Tabla 3. Subregiones consideradas en los estudios consultados para Antioquia

Subregiones estudiadas	Número estudios	porcentaje de estudios que trataron el tema
Bajo Cauca	7	5,9
Magdalena Medio	3	2,5
Nordeste	18	15,1
Norte	14	11,8
Occidente	6	5,0
Oriente	12	10,1
Suroeste	7	5,9
Urabá	2	1,7
Valle de Aburrá	65	54,6

Fuente: elaboración propia

CONCLUSIONES

- En la mayoría de los estudios consultados se identifican los servicios ecosistémicos asociados a una región particular como criterio determinante para la definición de los ecosistemas estratégicos de dicha región. De esta forma, el concepto de "servicio ecosistémico" se ha desarrollado como una respuesta frente a la necesidad de identificar de forma concreta (y en muchos casos cuantitativa) la importancia funcional de un ecosistema. Se resalta, entonces, que son estos servicios los factores que, en muchos casos, son fundamentales para soportar la denominación de un ecosistema como uno de tipo estratégico, y que favorezca las acciones encaminadas a su conservación.

- En la mayoría de los planes de manejo consultados de áreas protegidas y de microcuencas se realiza la identificación de los servicios ambientales, y su conservación se reconoce como un objetivo clave que hace parte de los lineamientos y estrategias definidas para garantizar la sostenibilidad ambiental.

- La identificación de los servicios ambientales es realizada como paso previo a la valoración económica de los mismos. Esta valoración constituye otra herramienta de creciente uso en las actividades relacionadas con la conservación de los ecosistemas. Sin embargo, dado el nivel de complejidad involucrado en dicha valoración y la incertidumbre asociada a los valores calculados, esta valoración se ha usado más como una aproximación a un valor idealizado y en muchos casos como fundamento para discusiones de tipo académico.

- En algunos de los estudios consultados se expone el pago por servicios ambientales como una estrategia de conservación. En estos estudios se hace referencia a los costos de oportunidad por las actividades de conservación, es decir, el valor económico que deja de percibirse al destinar un área a la conservación y no a una actividad de explotación económica. En algunos de los estudios se encontró que el valor de los servicios ambientales sobrepasa significativamente los costos de oportunidad, lo que soporta el uso de incentivos económicos para favorecer el establecimiento de áreas de conservación en lugar de su explotación. Además, el uso de estas estrategias, de impacto social, involucra a los diferentes actores que hacen uso de los recursos naturales.

- En esta revisión se hace una propuesta inicial de algunas variables y sus unidades de medida, que puedan ser utilizadas como indicadores para verificar el cumplimiento de cada servicio ecosistémico. Estas variables se proponen como una síntesis, de acuerdo con lo propuesto en los diferentes estudios consultados. En Antioquia son escasos los estudios que cuantifiquen estas variables, por lo que se recomienda la realización de más estudios rigurosos y tipo científico que permitan obtener aproximaciones a estos indicadores para el departamento.

- Algunos estudios indican altas tasas de deforestación en el departamento de Antioquia, con su consecuente pérdida de servicios ambientales.

Por lo tanto, se requiere que en los planes de desarrollo de los entes territoriales y de las autoridades ambientales se incluyan los mecanismos para garantizar la preservación de los bosques en Antioquia y las funciones ecosistémicas requeridas para garantizar la sostenibilidad ambiental de las regiones.

- Los estudios técnicos que demuestren la relación entre los ecosistemas y los servicios ambientales que prestan son escasos.

En la mayoría de los estudios no hay una cuantificación exacta de la magnitud de los bienes y servicios ambientales, y por lo tanto sólo se conoce su "valor aproximado" en términos económicos. Por esta razón, se requiere el desarrollo de investigaciones que cuantifiquen estos servicios, con el fin de contar con métodos objetivos para su valoración económica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agudelo, R. (2003). Ecosistemas estratégicos de la ecorregión del Valle de Aburrá. *Eolo Revista Ambiental*, 08, 18-20.
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá, Cornare, Corantioquia y Universidad Nacional (2007). Plan de ordenación y manejo de la cuenca del río Aburrá.
- Bastian, O., Haase, D., & Grunewald, K. (2011). Ecosystem properties, potentials and services - The EPPS conceptual framework and an urban application example. *Ecological indicators*, 7-16.
- Centro de Investigación en Ecosistemas y Cambio Global, Carbono y Bosques - Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (2011). Estudio de Factibilidad y Socialización Institucional de la Implementación de un Proyecto Forestal Bajo el mecanismo de Desarrollo Limpio - MDL en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Medellín: Área Metropolitana del Valle de Aburrá.
- Contraloría General de Antioquia. (2012). Informe anual sobre el Estado de los Recursos Naturales y del Ambiente en Antioquia 2012.
- Corantioquia. (2001). Identificación, caracterización y valoración económica de los servicios ambientales prestados por ecosistemas localizados en el área de influencia del Valle de Aburrá. Medellín: Corantioquia.
- Cornare. (2004). Plan de manejo sostenible y participativo de los bosques en San Nicolás Rionegro.
- Correa, F. J. (2005). Valoración económica de ecosistemas estratégicos asociados a fuentes hídricas que abastecen acueductos veredales. *Semestre económico*, 08(16), 29-48.
- Costanza, R., D'Arge, R., de Groot, R. S., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., y otros. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 253-260.
- González, A. (2009). Los servicios ecosistémicos como herramienta para el análisis de la sostenibilidad ambiental en regiones urbanas: Medellín y el Valle de Aburrá. Medellín: Tesis de maestría, Universidad Nacional sede Medellín.
- González, A. (2010). Regiones urbanas. Sostenibilidad ambiental y servicios ecosistémicos. *Eolo : Revista Ambiental*, 15, 137-153.
- Inzábal, A. M. (2008). Propuesta de pago por servicios ambientales (PSA) en la cuenca la Petrana (Antioquia). Medellín: Tesis, Universidad Nacional sede Medellín.
- Inzábal, E. (2002). Valoración de recursos naturales para la gestión ambiental. Renta de conservación del agua. Paramo de Belmira (Antioquia). *Revista Entornos (Neiva)*, 15, 29-30.
- Joyos, C. (2009). Formulación del proyecto MDL forestal "Más bosques para Medellín: un ambiente sano para el presente y el futuro" en el municipio de Medellín (Antioquia - Colombia). *Revista Producción+Limpia, Corporación Universitaria La Sallista*, 04(01), 83-108.
- Joyos, C. H. (2007). El sistema metropolitano de áreas protegidas. *Eolo: Revista Ambiental*, 2, 42-49.
- Instituto Alexander Von Humboldt y Corantioquia. (2011). Plan de manejo ambiental del páramo de Santa Inés en el distrito de manejo integrado - DMI del sistema de páramos y bosques altoandinos del noroccidente medio de Antioquia - SPBANMA.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2010). Informe anual sobre el estado del medio ambiente y los recursos naturales renovables en Colombia - Bosques 2009. Bogotá D.C., 236 p.
- Lopera, G., Gutiérrez, V. H., & Lema, Á. (2003). Fijación de carbono en plantaciones tropicales de *Pinus patula*. En J. I. Del Valle, S. A. Orrego, & F. H. Moreno, *Medición de la captura de carbono en ecosistemas tropicales de Colombia: Contribuciones para la mitigación del cambio climático* (pág. 314). Medellín: Panamericano Formas e Impresos.
- Márquez, G. (1996). Ecosistemas estratégicos y otros estudios de Ecología ambiental. Bogotá: Fondo FEN.
- Martínez, A. C., García, A., & Lopez, B. E. (2011). Identificación de servicios ambientales en una zona del norte antioqueño. Medellín: Tesis especialización, Universidad de Antioquia.
- MEA, Millenium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Washington DC: Island Press.
- MAVDT, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2008). *Estrategia Nacional de Pago por Servicios Ambientales*. 97 p.
- Moreno, F. H., del Valle, J. I., & Orrego, S. A. (2008). Dinámica del carbono en bosques tropicales del norte de los Andes. *Memorias Seminario Internacional Bosques Tropicales*, (pág. 40). Medellín.
- Municipio de Medellín. (2006). Acuerdo 046 de 2006: Plan de Ordenamiento Territorial para el municipio de Medellín. Medellín: Gaceta oficial.
- Ortega, L.F., León, J.D, Villegas, J.C y Lara, C.E. (2012). Estudio comparativo del efecto de diferentes coberturas vegetales sobre funciones ecosistémicas en los Andes colombianos. *Memorias del 5º Simposio Nacional Forestal*. Medellín, 11 y 12 de octubre de 2012. Colombia Forestal, 15:64
- Silva, L. A. (2007). Diagnóstico de bienes y servicios ambientales del páramo de Belmira. Bogotá: Instituto Alexander Von Humboldt.
- Tobón, M. P. (2008). Valoración de Bienes y Servicios Forestales en el Proyecto OIMT 54//99 (F): Modelo de Financiación Alternativo para el Manejo Sostenible de los Bosques de San Nicolás. Rionegro: Cornare.

GENERACIÓN, TRANSPORTE Y DEPÓSITOS DE SEDIMENTOS EN EL DEPARTAMENTO DE ANTIOQUIA

Autores: - Luis Javier Montoya J. - Doctor en Ingeniería
Universidad de Medellín
- Verónica Valencia G. - Ingeniera ambiental
Universidad de Medellín

Correo electrónico: ljmontoya@udem.edu.co; vvalencia@udem.edu.co

RESUMEN

Este artículo presenta una revisión de los principales estudios en materia de erosión y de transporte de sedimentos en el departamento de Antioquia (Colombia) realizados entre 2009 y 2012. Presentándose inicialmente una corta descripción de las principales técnicas utilizadas en estudio de transporte de sedimentos, luego los estudios encontrados son organizados y analizados de acuerdo a su tema. Se presentan estudios relacionados con la erosión, el transporte de sedimentos o la sedimentación. Finalmente se presenta un análisis de las perspectivas de estos estudios en la región y de las principales carencias de información en el tema.

PALABRAS CLAVES

erosión, transporte de sedimentos.

ABSTRACT

This paper shows a revision of the main studies related with erosion and sediments transport in the Antioquia department (Colombia) done between 2009 and 2012. It shows a short description of the main techniques used at the study of sediments transport. A review of the main studies found is showed. These are organized by studies related with erosion, sediment transport or sediment deposition. Finally, an analysis of the perspectives of the studies in the region was done.

KEYWORDS

erosion, sediments transport.

INTRODUCCIÓN

Para una adecuada evaluación del estado de los recursos hídricos, es muy importante estudiar la dinámica de los sedimentos en cuencas hidrográficas, para ello es necesario conocer los procesos de generación, transporte y depósito de los sedimentos en ambientes naturales, la cual está muy relacionada con la dinámica fluvial, los patrones de alineamiento de los ríos y corrientes, en particular, para cuencas de montaña la dinámica de los sedimentos y los procesos erosivos pueden ser particularmente activos.

Conocer los procesos de generación transporte y depósito de sedimentos es importante para las entidades encargadas del manejo de las cuencas hidrográficas.

Un aspecto importante es estimar la pérdida de suelo y nutrientes por procesos erosivos en cuencas. Diferentes modelos existen para dicha estimación, sin embargo estos a su vez difieren mucho entre sí, tanto en su complejidad, como en los parámetros requeridos para la estimación y en la manera como son abordados dichos procesos. En este artículo se presenta una muy breve descripción de algunas técnicas utilizadas para dichas estimaciones.

El objetivo de este artículo es presentar un panorama en materia de generación, transporte y depósito de sedimentos en las cuencas del departamento de Antioquia, realizar una recopilación de los principales modelos y técnicas utilizables en esta materia.

Con ello se espera brindar herramientas para futuras investigaciones, además se muestra una compilación de estudios realizados en los últimos años en el departamento con el fin de evaluar en qué situación se encuentra la investigación realizada en el tema y de esta forma dar una orientación sobre los vacíos sobre la misma y hacia donde se deben orientar los trabajos futuros.

La metodología seguida consistió en la revisión de estudios disponibles en bibliotecas, bases de datos y centros de documentación de la región.

Este artículo presenta una revisión de modelos en materia de sedimentos, una revisión de estudios publicados en el departamento de Antioquia y finalmente, se realiza un análisis de las carencias de información identificadas.

Generalidades en la generación, transporte y depósito de sedimentos

Los procesos de generación, transporte y depósito de sedimentos son un tema muy amplio y evidenciado en diferentes situaciones, por lo que se presentará un listado de algunas de sus manifestaciones, además de los sub-procesos involucrados intentando definir cada uno de ellos, definir los fenómenos involucrados y aclarar las relaciones presentes en todo este proceso.

- Revisión de modelos para estimación de la erosión

El principal factor de generación de sedimentos es la erosión, esta puede ser definida como el proceso de desprendimiento y transporte de las partículas de suelo por la acción de agentes erosivos como el viento, la lluvia o la escorrentía. Para la cuantificación de los procesos erosivos se utilizan diferentes términos, como lo es la tasa erosiva, la cual se refiere a la cantidad de suelo erosionado de una determinada área; el aporte de sedimentos que hace referencia a la cantidad del sedimento erosionado y que finalmente es transportado; la producción de sedimentos que es la cantidad de estos a la salida de una cuenca por unidad de tiempo y se refiere a la cantidad de material erosionado por la escorrentía y que es entregado a la corriente (Aksoy et al. 2005).

Al comparar la tasa erosiva y la producción de sedimentos se puede presentar diferencias, ya que hay un porcentaje de los sedimentos que se deposita al interior de la cuenca, este proceso generalmente aumenta a medida que se incrementa el área de drenaje de la cuenca.

Se podrían distinguir dos tipos de erosión: una natural y otra acelerada o inducida por la actividad humana, aunque en muchos casos puede ser difícil distinguir entre los dos procesos. Entre las principales fuentes de erosión acelerada se podrían mencionar las actividades agrícolas, la urbanización, las carreteras, puentes, vías férreas, la minería, las presas y la modificación de los ríos.

En los últimos años los modelos para la estimación de los procesos erosivos y el transporte de sedimentos han tenido grandes avances, principalmente por la incorporación de modelos computacionales, los modelos existentes en la actualidad se diferencian entre sí en las hipótesis de partida, las escalas de representación de los procesos, la integración con otros modelos y el objetivo para el que fueron desarrollados. Se tienen tres grandes grupos de modelos, a) los modelos empíricos que se construyen a partir de mediciones de campo en determinadas zonas, por lo que su validez está dada para las condiciones en las que fueron determinados, algunos de estos modelos son el USLE, MUSLE, RUSLE, SEDD, AGNPS. b) están los modelos de erosión que se concentran en representar las principales relaciones en la cuenca, representándola como una serie de elementos pequeños que permiten una mejor representación de los procesos la celda involucra una serie de relaciones matemáticas que simulan los procesos físicos relevantes para el movimiento, almacenamiento o erosión en la cuenca, uno de estos es el modelo LASCAM. c) por último se encuentran los modelos que utilizan la ecuación de conservación de masa de sedimentos, ejemplos de estos modelos son ANSWERS, LISEM, CREAMS, WEPP, KINEROS, KINEROS2, WESP, SEM, SHESED, EUROSEM RUNOFF, y CASC2D-SED, que son conocidos con el nombre de modelos físicamente basados. Una revisión más amplia de estos modelos se encuentra en Merritt et al. (2003).

Transporte de sedimentos en corrientes

El transporte de sedimentos puede ser enfocado desde dos perspectivas, una en la cual se miden directamente en el río los valores de la carga de sedimentos y otra donde se intenta representar la forma en que se produce el arrastre de sedimentos a partir de las características hidráulicas y de los sedimentos presentes en el lecho. Hay que anotar, que la mayoría de los estudios son para ríos con lechos aluviales y que existen relativamente menos estudios en ríos de montaña o con características torrenciales como lo son una parte importante de las corrientes del departamento de Antioquia.

Diferentes estudios se han interesado por estudiar las cargas de sedimentos en el mundo. Fournier (1960) fue el primero en determinar un patrón de erosión a nivel global con los datos de carga en diferentes corrientes. Los anteriores autores han enfrentado la dificultad de encontrar datos inconsistentes de carga de sedimentos, debido a las notorias diferencias en los datos de carga, escasez de los registros, a las inconsistencias en los mismos cuando se encuentran disponibles, a la extrapolación de resultados de campañas muy cortas de medición y a las diferencias en las técnicas de medición. Según los datos presentados por Walling y Webb (1983) las cargas máximas de sedimentos están asociadas con las cuencas ubicadas en China, Oceanía, Los Andes en la costa Pacífica Americana y en las costas del mar Mediterráneo. Valores bajos en la carga de sedimentos se presentan en las áreas desérticas y en las zonas glaciares. Sin embargo, como mencionan Walling y Webb (1996) estas representaciones son aún limitadas, debido a que tan solo se incorporan los datos de las principales corrientes y no consideran variaciones temporales en la carga, originadas por la variabilidad climática.

Considerando los registros antes mencionados de la distribución de sedimentos en el mundo, en líneas muy generales se puede decir que no necesariamente las cuencas más grandes son las que tienen los mayores rendimientos de cargas de sedimento, algunas cuencas pequeñas en zonas de montaña, como las del pacífico presentan altos rendimientos.

También se ha encontrado que al igual que los caudales, las corrientes en zonas tropicales son las que reportan cargas de sedimentos más altas, además existe una fuerte influencia de la variabilidad climática en la carga de sedimentos que es difícil de registrar, donde eventos extremos pueden causar transportes significativos aún en zonas donde normalmente el transporte no sea apreciable; por ejemplo, en las zonas desérticas la ocurrencia de tormentas desencadenan transportes altos de la carga de sedimentos, pero éstas son poco frecuentes; eventos extremos, por lo general catastróficos, como crecientes muy fuertes pueden desencadenar avalanchas con alta capacidad de transporte, estos son los conocidos aludes muy frecuentes en las zonas andinas.

En Colombia, han sido pocos los estudios realizados en materia de transporte de sedimentos, a pesar de la importancia que tiene el tema para el desarrollo del país. Al estudiar el tema se encuentra que las tasas de arrastre de sedimentos en cuencas del departamento de Antioquia son alarmantes en comparación con otras corrientes de América o del Mundo. Milliman y Meade (1983) y Milliman (1990) presentan un panorama de los aportes de sedimentos al mar de los principales ríos del mundo, según sus estudios los ríos de Sur América aportan un 11 % de la carga de sedimentos a los océanos y un 23% de las descargas líquidas (Restrepo & Kjerfve, 2000) (Milliman J. D., 1990), los ríos de la Asia Meridional y Oceanía aportan un 70% (Milliman J. D., 1990). Por su parte Restrepo et al. (2006) analizando el comportamiento de los sedimentos del río Magdalena encontró rendimientos de entre 128 a 2200 t/km²/año analizando 32 subcuencas de dicho río. Montoya y Montoya (2005) presentan un análisis de la carga de sedimentos en diferentes cuencas en el departamento de Antioquia, encontraron altos rendimientos en la carga de sedimentos en ríos como el río Tarazá (3004.21 ton/km²/año), Riosucio (1389.98 ton/km²/año), o el río Cauca (1287.55 ton/km²/año) que presentan altos valores en la carga. Para algunas corrientes como el río Cauca o el río Magdalena, se observa el aumento tanto en la carga como en el rendimiento de la carga de sedimentos en su paso por el departamento, notándose en algunos casos

(como el del río Cauca) aumentos en la carga del 77 % y de los rendimientos de un 47 %, esto ilustra como los procesos de generación de sedimentos son muy activos en esta zona, esto puede explicarse en parte por factores climáticos (como la precipitación) y por la escarpada topografía de la zona (que propicia los procesos erosivos).

- Depósito de sedimentos

La sedimentación, proceso por el cual el material sólido en movimiento por efecto del agua se deposita. La sedimentación puede ser un proceso natural, pero también se puede producir como resultado de la actividad humana, cuando se inducen cambios en la dinámica de los ríos o corrientes. Las causas por las que se puede generar depósitos de sedimentos son varias, entre ellas se pueden mencionar: (1) los flujos de lodos, estos se dan en corrientes con altas pendientes, generan depósitos con una gran variedad de tamaños y materiales. En las zonas andinas tropicales, coexisten corrientes que transitan por zonas altas pendientes y en las que ocurren eventos de lluvia con altas intensidades, que generan hechos como las avenidas torrenciales que son responsables de algunos de estos depósitos cercanos a las corrientes. Si bien estos eventos ocurren de forma natural, la intervención de la ladera, la deforestación u otros procesos antrópicos pueden favorecer o agravar la ocurrencia de este tipo de eventos. (2) Las barras e islas y depósitos en zonas de bajo flujo en el río, estas pueden generar problemas en estructuras hidráulicas, canales, alcantarillas o tuberías, generando problemas en obras hidráulicas. En ríos con meandros la migración de los mismos puede ocasionar problemas en las orillas que se ven sometidas a dicha migración lateral. (3) En zonas mineras se puede producir grandes sedimentaciones y zonas de depósito corriente abajo, además de la contaminación que se genera a las fuentes hídricas. (4) La sedimentación en lagos y embalses se da por el atrapamiento al interior de estos de los sedimentos arrastrados por las corrientes afluentes, generando pérdida en el volumen de los mismos afectando su vida útil. Fenómenos como las corrientes de densidad y las alteraciones en la batimetría del embalse son fenómenos asociados con estos procesos de sedimentación en los embalses.

REVISIÓN DE ESTUDIOS EN EL DEPARTAMENTO DE ANTIOQUIA PUBLICADOS ENTRE LOS AÑOS 2009-2012

- Procesos erosivos

Se realizó una recopilación de estudios relacionados con la generación de sedimentos en el departamento de Antioquia, que sean de libre consulta y que hayan sido realizados se clasifiquen en estudios enfocados en analizar los procesos erosivos o la producción de sedimentos.

En términos generales se encontró pocos estudios en materia de erosión y de producción de sedimentos. Varios estudios apuntaron a analizar procesos erosivos desencadenados en vías (Álvarez, 2011; Arrieta R., 2011; Escobar, 2011), también algunos autores han estudiado los riesgos de erosión en los suelos en la zona cafetera (Hincapié G., 2010) y mecanismos para la prevención y mitigación por deslizamiento en dichas zonas (Salazar, 2010). También se han estudiado los procesos erosivos en algunas cuencas abastecedoras de agua para el valle de Aburrá, en las afluencias a los embalses de la Fe y Riogrande, Escobar y Rosanía (2011) estudiaron los procesos erosivos en la cuenca de la quebrada San Francisco, la cual es afluente del embalse Riogrande II. Además se encontraron algunos estudios de procesos erosivos en algunas cuencas locales como la quebrada La Murcielaga en Piedras Blancas (Jaramillo, 2005). Rico (2006) presentan una cuantificación de la erosión en las fincas bananeras de la zona de Urabá. Ortiz (2003) realiza una descripción del impacto económico de la erosión del suelo aplicado a la cuenca del río Negro. De Greiff et al. (2004) presentan un análisis de los procesos erosivos en el valle alto del río Medellín. Restrepo y Restrepo (2005) analizan la producción de sedimentos en la cuenca del río Magdalena donde reportan una producción de sedimentos de 689x528 t/ km2/ año, reportando que los principales parámetros que explican la varianza en la producción de sedimentos son la escorrentía y el caudal máximo. Restrepo, (2005) presenta también una compilación de estudios sobre los sedimentos del río Magdalena, donde se analiza el efecto de factores naturales y antrópicos sobre la producción de sedimentos en la cuenca.

En la dinámica costera Posada (2012) estudia el efecto del cambio de las coberturas del suelo sobre la geomorfología costera en las cuencas de los ríos Acandí y Turbo del golfo de Urabá, identificando que en esta zona los cambios en el uso del suelo, la deforestación y las prácticas agrícolas, influyen en la cantidad y calidad del aporte de sedimentos en suspensión que es transportado por los ríos, afectando la dinámica costera, por ello buscaron generar un modelo para establecer relaciones entre las variables asociadas al crecimiento poblacional, la dinámica económica y los cambios de coberturas y producción de sedimentos relacionados con el cambio en las geofformas en estas cuencas costeras.

- Transporte y dinámica fluvial

Otros estudios reportan resultados sobre el transporte de sedimentos en las principales corrientes del departamento. Además, se analizaron estudios que presenten indicios sobre procesos erosivos asociados a la morfología en las corrientes de Antioquia. Se encontró un estudio para algunos tramos del río Medellín, Ceballos (2007) y en el río León donde, Duque (2008) utilizando el modelo CCHE2D analiza los procesos de división del flujo líquido y sólido en difluencias y confluencias y los cambios morfológicos debido a crecientes extremas de flujo y sedimento.

Se encontró solamente un estudio que abordó el tema del transporte de sedimento y la dinámica fluvial, Ceballos (2011) analiza los procesos de erosión y sedimentación estudiando tres tramos del cauce de la quebrada La Marinilla para conocer su movilidad, condicionada por la intervención antrópica y las fluctuaciones del nivel base (río Negro), utilizando el modelo numérico CCHE2D, simulando los procesos de degradación y degradación del canal y los cambios morfológicos del mismo, también utilizan el modelo RVR Meander (Abad & García, 2006) para caracterizar y analizar la migración de meandros en dicho cauce. Encontrando que las estructuras de puentes implementados sobre el cauce de la quebrada La Marinilla y las fluctuaciones del nivel en el río negro pueden modificar y limitar la movilidad del canal en el tiempo.

- Procesos de dispersión de sedimentos y de sedimentación

Se revisaron estudios de dispersión de sedimentos y sedimentación en diferentes ambientes acuáticos como embalses, ciénagas, estuarios y zonas costeras. Se encontró varios estudios relacionados con la dispersión de sedimentos en el golfo de Urabá, entre los que se pueden mencionar, Bernal et al. (2005), Montoya y Toro (2006), Téllez (2006), Garizabal (2007), Roldan, 2008 y Álvarez (2008), estos estudios utilizando mediciones en el golfo y modelación numérica presentan algunas rutas de dispersión de sedimentos en esta zona, revelando la fuerte influencia de la pluma del río Atrato en la dinámica del golfo y en la dispersión de sedimentos (Montoya & Toro, 2006).

En materia de dispersión de sedimentos en zonas estuarinas y costeras, se encontraron los estudios de Montoya (2010) quien analiza la dinámica oceanográfica del golfo de Uraba y su relación con los patrones de dispersión de contaminantes y sedimentos, utilizando modelos numéricos analizan los patrones de transporte de estos sedimentos en el golfo y analizan la influencia de diferentes forzadores oceanográficos y climáticos como las mareas y los vientos en dicha dispersión, también analizan el efecto de la estratificación de esta dinámica. Álvarez (2010) presenta una metodología para estudiar la evolución morfodinámica de desembocaduras de ríos en una escala intra-anual utilizando modelación numérica y mediciones de campo, aplicaron la metodología propuesta en la desembocadura del río León en el golfo de Urabá. Velásquez (2011) analizan la sensibilidad de un modelo de transporte de sedimentos en el golfo de Urabá. En la misma zona otros autores han realizado algunas indagaciones sobre los efectos ambientales que tienen los sedimentos sobre el recurso hídrico (Gómez, 2011) (Hoyos, 2011)

En materia de sedimentación en embalses se han realizado algunos esfuerzos para determinar las características físicas y químicas de los sedimentos embalses la fe, Riogrande y Porce II, pero no se encontraron publicaciones en el período de estudio de la presente actualización.

PERSPECTIVAS EN LOS ESTUDIOS DE SEDIMENTOS

Se puede identificar una fuerte dependencia de la carga de sedimentos con el clima, la geomorfología, la geología, los usos del suelo y la intervención humana. También hay que considerar que la carga de sedimentos puede variar a lo largo de una corriente. No es igual el comportamiento de las cuencas en las zonas de montaña a cuencas que tienen amplias zonas de depósito.

A continuación se mencionan algunos aspectos particulares que a consideración de los autores se tendrán que estudiar a fondo a futuro, debido al desarrollo a mediano y largo plazo esperado para el departamento de Antioquia.

- Efectos de la minería en la producción de sedimentos

Entre los diferentes impactos de actividades mineras se pueden encontrar las alteraciones en la dinámica fluvial de las corrientes afectadas en zonas por dicha actividad. Alteraciones en los alineamientos y en los trazados de las corrientes pueden generar variaciones en el nivel base local alterando de esta forma la dinámica fluvial natural, también se pueden producir cambios en las tasas de erosión o sedimentación de la zona, como lo son las alteraciones en los cauces por excavaciones, diques o presas generan cambios en los perfiles locales de la corriente. Las descargas o los procesos extractivos mineros pueden producir la incorporación de partículas sólidas a la corriente, generando aumentos locales en la carga de fondo y suspensión de sedimentos, con el consecuente incremento de la tasa de sedimentación aguas abajo de la explotación. En algunos casos estos sedimentos pueden estar cargados de metales, produciendo el drenaje ácido de las minas, por escorrentía y lixiviación. Aunque son muy pocos los estudios que valoren los impactos y realicen estimaciones de estas actividades realiza una valoración de algunos de los impactos generados en la zona por esta actividad a partir de estimaciones de la huella hídrica (en particular de la huella gris) por actividades del sector minero en la cuenca del río Porce.

54

Existen diferentes técnicas para el control de sedimentos por actividades mineras. Dichas técnicas se pueden clasificar en: (1) técnicas de control en la fuente, (2) técnicas de retención intermedia o en los procesos al interior de la mina y (3) técnicas de control en la descarga. En las primeras existen diferentes estrategias para el control de la erosión, manejo adecuado del agua de proceso para evitar que esta llegue a las zonas expuestas y la rápida revegetalización de las zonas de extracción. Entre las técnicas al interior de la mina se pueden mencionar las trampas de sedimentos y sedimentadores, por su parte las técnicas más sutilizadas antes de la descarga son las presas o lagunas de sedimentación.

- Sedimentación en embalses

Uno de los mayores impactos de los sedimentos se produce cuando estos son atrapados por los embalses, donde dichos sedimentos producen una reducción en la vida útil de este último, ya que al sedimentarse ocupan un volumen del embalse, reduciendo de esta forma su vida útil y causando obstrucción en las obras de toma. Además de lo descrito anteriormente, esta situación tiene incidencia sobre la calidad del agua en el embalse, pues junto con los sólidos, son arrastrados otras sustancias contaminantes y nutrientes, lo cual afecta la calidad del agua tomada para diferentes usos.

- Generación de sedimentos en cuencas hidrográficas

La dinámica sedimentológica en las cuencas hidrográficas, constituye un problema complejo, que debe ser abordado si se pretende modelar de manera adecuada el sistema hidrológico y ambiental de la cuenca, y la hidráulica de los ríos en la misma. Entre los modelos de erosión de suelos más ampliamente difundidos se encuentran la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE), la ecuación de suelos revisada (RUSLE) y el WEPP (Water Erosion prediction project), este último un esfuerzo

de la USDA que constituye un modelo de simulación que predice pérdida de suelo y deposición más que un promedio de la pérdida neta de suelo (Tiwari, Risse, & Nearing, 2000). Recientemente con la aparición de modelos hidrológicos distribuidos, que permiten incluir la variabilidad espacial de la lluvia, y de las características del suelo de la cuenca, la estimación de la producción de sedimentos a nivel de cuenca y de celda, se ha incorporado, ya sea desde la aplicación distribuida de las ecuaciones de la RUSLE, acopladas con el modelo hidrológico y con un mecanismo de transporte de sedimentos, o la incorporación misma de un modelo de sedimentos ajustado a un modelo hidrológico tal es el caso del modelo expuesto por Kabir et. al. (2011), o del modelo TETIS-SED, el cual es el resultado de integrar el submodelo de erosión del CASC2D-SED dentro del modelo hidrológico TETIS. (Bussi & Francés, 2010). Algunas aplicaciones de este modelo se han realizado en Colombia. Tal es el caso del estudio de la cuenca del río La Miel y del río Risaralda (Tavera & Vélez, 2012).

- Análisis de paleoindicadores en depósitos de sedimentos

Relacionado con la búsqueda de evidencia de avenidas extremas, que permitan ampliar el registro de caudales y mejorar la estimación de caudales de altos períodos de retorno, se encuentra el análisis de paleoindicadores en depósitos de sedimentos. Los paleoindicadores, son evidencias dejadas por las crecidas, las cuales no fueron registradas sistemáticamente. Las crecidas, que han dejado esta evidencia se conocen con el nombre de paleocrecidas, las cuales no necesariamente ocurrieron en años remotos, y se estima su caudal a partir de diferentes evidencias, como pueden ser depósitos de sedimentos en lugares altos alcanzados por el agua y sedimentos arrastrados durante la crecida.

La técnica de ampliación de registros de caudales, a partir de la información de paleocrecidas ha sido ampliamente utilizada, en su mayoría en zonas áridas o

semi-áridas (Benito, y otros, 2011) (Botero & Francés, 2010) (Baker, 2008), y en algunas ocasiones en zonas húmedas y tropicales (Kidson, Richards, & Carling, 2005), con buenos resultados. El análisis de paleoindicadores en depósitos de sedimentos, es una herramienta a explorar en nuestro departamento, ya que el uso de esta información combinada con la modelación hidráulica permitiría una mejor caracterización de zonas de riesgo por inundación.

CONSOLIDADO DE ESTUDIOS Y CARENCIAS DE INFORMACIÓN

A partir de la revisión de la información, es posible arriesgarse a mencionar, los tópicos sobre los cuales se debe investigar en este tema en el futuro y en donde se encuentran las mayores carencias de información. En el tema de generación de sedimentos es importante continuar avanzando en la construcción de modelos distribuidos de generación de sedimentos en cuencas hidrográficas, modelos que consideren las diferentes características topográficas y usos del suelo presentes en la zona. Es necesario tener información en campo sistemática que permita la calibración de estos modelos, además no se tienen establecidas tasas de erosión para las diferentes cuencas o zonas del departamento. Es importante para la investigación futura y la toma de decisiones, contar con un mapa de procesos erosivos en el departamento de Antioquia, de tal forma que se haga seguimiento y control a los mismos, con el fin de tener una idea de las zonas donde se presenta una mayor pérdida de suelo.

En cuanto al transporte de lodos y sedimentos, es muy importante ahondar en los riesgos asociados a los flujos torrenciales y en la comprensión de la dinámica fluvial de los ríos. Muchas de las poblaciones del departamento se encuentran localizadas en zonas de riesgo de eventos aluvio-torrenciales, o se ven afectadas por procesos morfológicos de los ríos quienes con su dinámica afectan la población asentada en sus riveras, por ello es muy importante profundizar en dichos temas

55

de tal forma que se haga un adecuado manejo de las riveras de los ríos y una valoración de la amenaza de la población allí asentada. Para este fin, podrían implementarse nuevas fuentes de datos como los paleoindicadores, de tal manera que complementen los estudios de riesgo por eventos aluvio-torrenciales. Finalmente, en el tema de depositación de sedimentos se establece que es muy importante realizar estudios de dispersión de sedimentos en ciénagas, embalses y estuarios del departamento, para una mejor comprensión de los procesos de dispersión de los mismos.

Aunque son pocos los estudios en modelación de transporte de sedimentos y de la dinámica fluvial, se debe avanzar en esta clase de estudios, como los identificados en esta actualización.

En general, se cuenta con poca información sobre el tema de sedimentos en Antioquia y son relativamente pocos los estudios que apuntan al avance en el conocimiento del mismo. Se sugiere direccionar la investigación, más que a la solución de problemas concretos y puntuales, hacia la construcción de estudios que aborden de una forma más amplia la generalidad del problema y los procesos involucrados. Por último, se evidencia la necesidad de mejorar los sistemas de medición de sedimentos en las corrientes del departamento y de realizar estudios que apunten a una descripción de dichas mediciones de tal forma que se puedan observar tendencias en las mismas o patrones de cambio en dicha variable.

Se observaron pocos estudios en las bibliotecas y centros de documentación consultados que realizaran seguimientos a la sedimentación en embalses. Adicionalmente, no se encontraron estudios en las zonas urbanas, que analicen la producción, transporte y depósito de sedimentos y su afectación sobre los sistemas de drenaje urbano.

A pesar de las implicaciones ambientales de la minería, los efectos de la misma sobre la carga de sedimentos ha sido poco valorada estudiada.

No se cuenta con estudios de sedimentación en ciénagas, lagos o humedales y considerando que estos sistemas tienen una importante función ambiental en el tema de retención de sedimentos, sería importante que se valorara mejor dicha funcionalidad.

CONCLUSIONES

En términos generales en el tema de generación, transporte y depositación de lodos y sedimentos se encontró poca información. Se observan pocos avances en estudios en el tema. Se observa que el tema se encuentra aún en desarrollo y que involucra una serie de componentes que lo constituyen un problema complejo, como diferentes tipos de elementos físicos, geográficos, climáticos e hidrológicos, que a su vez, tienen consecuencias e implicaciones sociales, económicas y ambientales.

En respuesta al objetivo de esta actualización, se evidenció que de acuerdo a la revisión de estudios disponibles, en términos generales son pocos los estudios realizados en este tema y varios de los estudios encontrados responden a problemas localizados más que a estudios de cuenca.

En términos generales se puede decir que las corrientes del departamento de Antioquia tienen un alto transporte de sedimentos, por esto es importante mantener una medición continua en el tiempo y en el espacio de la carga de sedimentos de muchas de estas corrientes, especialmente aquellas sean de importancia social, económica y/o ambiental.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abad, J., & García, M. (2006). A toolbox for remeandering of channelized streams. *Computers & Geosciences* 32, 92-101.
- Aksoy, H., & Kavvas, M. (2005). A review of hillslope and watershed scale erosion and sediment transport models. *Catena* 65, 247-271.
- Álvarez, A. (2008). Estudio del transporte de sedimentos superficiales en el piso marino del Golfo de Urabá. Medellín. Medellín: Trabajo de grado - Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.
- Álvarez, A. (2011). Caracterización geotécnica de sitios críticos de la vía marginal del Cauca en el tramo Bolombolo-Santa Fe de Antioquia. Trabajo de grado - Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.
- Álvarez, O. (2010). Modelación morfodinámica de desembocadura a escala intra-anual. Trabajo de grado - Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.
- Arrieta R., M. (2011). Biomineralización aplicada a la mitigación de procesos erosivos superficiales, en un suelo tropical de la ciudad de Medellín. Trabajo de grado - Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.
- Benito, G. A., Botero, B., Thorndycraft, V., Rico, M., Y., S.-M., Sopeña, A. et al. (2011). Rainfall-runoff modelling and palaeoflood hydrology applied to reconstruct centennial scale records of flooding and aquifer recharge in ungauged ephemeral rivers. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15, 1185-1196.
- Bernal, G., Toro, F., Montoya, L., & Garizabal, C. (2005). Estudio de la dispersión de sedimentos del río Atrato y sus impactos sobre la problemática ambiental costera del Golfo de Urabá. Trabajo de grado - Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.
- Ceballos, J. (2007). Estudios y diseños de obras de protección en el río Medellín tramos no canalizados. Trabajo de grado - Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.
- Ceballos, J. D. (2011). Modelación hidráulica y morfodinámica de cauces sinuosos aplicación a la quebrada La Marinilla (Ant). Trabajo de grado - Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.
- De Greiff, P., Hermelin, M., & D., R. (2004). Procesos erosivos en una microcuenca andina: el valle alto del río Medellín, cordillera central. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. Vol. 28, No. 109, Dic., 487-496.
- Duque, O. (2008). Simulación hidráulica de confluencias y difluencias, aplicación al Río León en el Urabá Antioqueño. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Escobar, L. J. (2011). Clasificación y caracterización de suelos tropicales en un talud de la autopista Medellín - Bogotá en el tramo de vía entre Marinilla y Santuario. Trabajo de grado - Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.
- Escobar, P., & Rosanía, T. (2011). Métodos de prevención aplicables para el problema de colmatación por sedimentos en embalses caso - cuenca quebrada san francisco - los atajos. Trabajo de grado - Escuela de Ingeniería de Antioquia.

- Fournier, F. (1960). *Climat et Erosion*. P.U.F. 128.
- Garizabal, C. (2007). Problemática ambiental del Golfo de Urabá en relación con los procesos de erosión - sedimentación costeros. Trabajo de grado - Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.
- Gómez, E. (2011). Influencia de factores ecológicos en la distribución, abundancia y variaciones de foraminíferos béticos recientes en ecosistemas de manglar en el Golfo de Urabá. Trabajo de grado - Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.
- Hincapié G., E. (2010). Riesgo a la erosión en suelos de ladera de la zona cafetera. *Avances técnicos CENICAFE* (400), 1-8.
- Hoyos, R. (2011). Respuesta de la regeneración natural de los manglares del Delta de Turbo y la bahía El golfo de Urabá- Colombia, a la variabilidad ambiental y climática interanual. Trabajo de grado - Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.
- Jaramillo, S. (2005). Pérdidas de suelo en ecosistemas forestales de la microcuenca La Miel, Piedras Blancas, Antioquia. Trabajo de grado - Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.
- Merritt, W., Letcher, R., & Jakeman, A. (2003). A review of erosion and sediment transport models. *Environmental modelling and software* 18, 761-799.
- Milliman, J. D. (1990). El sedimento fluvial en los mares costeros: flujo y destino final. *Naturaleza y sus recursos*, 26 (4), 12-22.
- Milliman, J., & Meade, R. (1983). World-Wide delivery of river sediment to the oceans. *Journal of geology*, Vol 91(1), 1-21.
- Montoya, L. (2010). Dinámica oceanográfica del golfo de Urabá y su relación con los patrones de dispersión de contaminantes y sedimentos. Trabajo de grado - Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.
- Montoya, L. J., & Montoya, R. D. (2005). Transporte de sedimentos en las corrientes del Departamento de Antioquia. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 101-109.
- Montoya, L., & Toro, F. (2006). Calibración de un modelo hidrodinámico para el estudio de los patrones de circulación en el golfo de Urabá, Colombia. *Avances en Recursos hídricos* 13, 37-54.
- Ortiz, M. (2003). Impacto económico de la erosión del suelo: análisis de largo plazo aplicado a la cuenca del río Negro (Antioquia). Trabajo de grado - Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.
- Posada M., L. E. (2012). Efecto del cambio de las coberturas del suelo sobre la geomorfología costera en las cuencas de los ríos Acandí y Turbo del golfo de Urabá. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Restrepo, J. (2005). Los sedimentos del río Magdalena: reflejos de la crisis ambiental. Medellín: Universidad EAFIT. 256 p.
- Restrepo, J., & Kjerfve, B. (2000). Magdalena river: interannual variability (1975-1995) and revised water discharge and sediment load estimates. *Journal of Hydrology*, 1-13.
- Restrepo, J., & Restrepo, J. (2005). Efectos naturales antrópicos en la producción de sedimentos de la cuenca del río Magdalena. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas*. Vol. 29, no. 111. Jun., 239-254.
- Restrepo, J., Kjerfve, B., Hermelin, M., & Restrepo, J. (2006). Factors controlling sediment yield in a major South American drainage basin: the Magdalena River. *Journal of Hydrology*, 316, 213-232.
- Rico, T. (2006). Cuantificación de la erosión en fincas bananeras de Urabá. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Roldan, P. (2008). Modelamiento del patrón de circulación de la Bahía Colombia, Golfo de Urabá. Medellín: Tesis de Maestría.
- Salazar, L. (2010). Manejo de suelos y aguas para la prevención y mitigación de deslizamientos en fincas cafeteras. *Avances técnicos CENICAFE* (401), 1-8.
- Téllez, L. (2006). Provincias de los minerales densos en los sedimentos del fondo marino del Golfo de Urabá. Trabajo de grado - Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.
- Velásquez, L. (2011). Análisis de sensibilidad a un modelo de transporte de sedimentos: Golfo de Urabá Colombia. Trabajo de grado - Universidad EAFIT.
- Walling, D., & Webb, B. (1983). Patterns of sediments yield. *Background to Paleohydrology*.
- Walling, D., & Webb, B. (1996). Erosion and sediment yield: a global overview. *Erosion and Sediment Yield: Global and Regional Perspectives*. IAHS(236).

EVALUACIÓN DE INCERTIDUMBRE PREDICTIVA DE CAUDALES ESTIMADOS EN CUENCAS NO AFORADAS MEDIANTE APLICACIÓN DE UN POS-PROCESADOR BAYESIANO

Autores: - Juan Camilo Múnera. Magíster en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos. Máster en Ingeniería de Puertos y Costas. Universidad Politécnica de Valencia.
 - Félix Francés G. Doctor en Hidrología y Recursos Hídricos. Universidad Politécnica de Valencia,
 - Ezio Todini. Ingeniero hidráulico. Universidad de Bologna, Italia

Correo electrónico: juamues1@doctor.upv.es; ffrances@hma.upv.es; ezio.todini@unibo.it

RESUMEN

En este trabajo se presenta una metodología para evaluar la incertidumbre predictiva (IP) asociada a los caudales estimados con modelos hidrológicos distribuidos en puntos aforados y no aforados de una cuenca, mediante el procesamiento a posteriori de las simulaciones utilizando el pos-procesador estadístico de incertidumbre de tipo bayesiano Model Conditional Processor (MCP). Inicialmente, el MCP se propuso para su aplicación en sitios con información histórica continua (estaciones de aforo) que permitiera calibrar y validar este pos-procesador estadístico, basado en una aproximación multi-Normal para estimar la IP, definida como la probabilidad de ocurrencia de un evento real condicionada a las simulaciones o predicciones realizadas con uno o varios modelos hidrológicos. Una ventaja del MCP respecto a otros métodos de análisis de incertidumbre es que permite combinar simulaciones de varios modelos de naturaleza diversa en forma efectiva, y de este modo reducir la IP. En este trabajo, el MCP se ha aplicado a varias subcuencas del Río Illinois incluidas en el proyecto de Intercomparación de Modelos Hidrológicos Distribuidos (DMIP2) de NOAA-NWS (EEUU); para ello, se utilizaron las simulaciones realizadas con 4 modelos hidrológicos. Para extender la metodología a cuencas no aforadas, se propone una modificación del MCP que consiste en ajustar la función de densidad de probabilidad (fdp) paramétricas a las series observadas y simuladas en lugar de utilizar las fdp empíricas propuestas en la formulación original; adicionalmente, se contempla una regionalización de los L-momentos de la serie de caudales observados en función de sus equivalentes simulados por los modelos, así como la regionalización de un parámetro adicional por cada modelo que permite cuantificar la fdp conjunta entre los caudales observados y simulados. Los resultados obtenidos indican que la metodología propuesta es robusta y útil para estimar la IP.

PALABRAS CLAVES

Incertidumbre predictiva, cuencas no aforadas, MCP, transformación NQT.

ABSTRACT

This work aims at presenting the results of a Bayesian methodology, in order to assess predictive uncertainty (PU) related to flows simulated with distributed hydrological models at gauged and ungauged basins, by the pos-processing of simulations using the Bayesian statistical model Conditional Processor (MCP). Initially, the MCP was proposed for its application in gauging stations, with a continuous historical record of flows that allows the calibration and validation of the statistical model, which is based in a multi-Normal approach to estimate the PU, defined as the probability of occurrence of an actual event conditional on the predictions or simulations made with one or more hydrological models. An advantage of MCP is that it allows effectively combining several forecasting models of diverse nature, thereby reducing the PU. The MCP has been applied to several sub-basins of the Illinois River included in the Distributed Hydrological Model Intercomparison (DMIP2) NOAA-NWS (USA); for this, we used simulations made with four selected hydrological models. In order to extend the MCP methodology to ungauged sites, a modification of the MCP is proposed, which is to adjust parametric pdfs to the observed and simulated series instead of using the empirical pdfs proposed in the original formulation. Additionally, a regionalization of the L-moments of observed flows based on their equivalent simulated flows and a regionalization of an additional parameter for each simulation model to quantify the joint pdf between observed and simulated flows. The results show that the proposed approach is robust and very useful to estimate the PU.

INTRODUCCIÓN

Las decisiones relacionadas con temas de manejo de emergencias por avenidas conllevan importantes consecuencias económicas y sociales. En la práctica hidrológica resulta fundamental asignar una medida de la incertidumbre a la estimación de caudales o de cualquier otra variable de estado, realizada con algún modelo hidrológico, o en otras palabras, establecer con qué probabilidad se puede verificar la ocurrencia real de un caudal de cierta magnitud, condicionado a la estimación que se ha realizado sobre éste con el modelo o modelos de predicción o simulación utilizados. Una aproximación probabilística del problema deriva del hecho de que cualquier modelo hidrológico de tipo conceptual o físicamente basado, o bien de cualquier otra tipología (esquemas hidráulicos de propagación de avenidas, modelos basados en los datos o modelos híbridos entre los anteriores) puede tener mayor o menor grado de acierto sobre la variabilidad espacio-temporal de los caudales o niveles de flujo simulados; más específicamente, interesa acertar las características principales de un evento de crecida, como la magnitud y el tiempo de ocurrencia del caudal pico del hidrograma, así como la forma de la rama de recesión al finalizar la tormenta causante del evento.

Los resultados de tales modelos no pueden ser tomados a la ligera como valores ciertos de tales eventos -como es usual en la práctica hidrológica operacional-, ya que éstos se ven afectados por una serie de errores de diferente índole, como los que son debidos a las observaciones de la propia variable a predecir (el nivel, caudal o volumen), la incertidumbre en la precipitación y demás variables hidrometeorológicas de entrada al modelo (bien sea en modo simulación o predicción), y otras fuentes de error inherentes a los modelos utilizados, como las condiciones de contorno, el estado inicial del sistema, y finalmente, los errores asociados a la estructura de los modelos y la estimación de sus parámetros. Por otro lado, estos últimos a su vez están influenciados por los errores de observación de la propia variable de interés (Montanari y Brath, 2004).

Aún en casos ideales con gran disponibilidad de información y un alto rigor técnico científico, algunos de los errores mencionados pueden ser importantes, pero mucho más serio cuando los modelos utilizados no son lo suficientemente robustos o resultan adecuados al problema que quiere resolver. En función de la conceptualización y parametrización adoptadas en el modelo para describir los procesos hidrológicos determinantes en la cuenca, éste puede tener mayor o menor habilidad para representar los mecanismos de respuesta de la cuenca, procesos que habitualmente presentan un comportamiento altamente no lineal.

La calidad de una simulación o predicción realizada con un modelo hidrológico dependerá, por un lado, de la calidad de la información disponible para representar la variabilidad espacio-temporal de las variables hidrometeorológicas, pero también de la capacidad del modelo para propagar en el tiempo el estado de humedad en la cuenca responsable en buena medida de la no linealidad. Independiente del modelo o modelos utilizados, en aquellas situaciones en las que es posible predecir una avenida en tiempo real con la ayuda de los modelos disponibles, resulta fundamental poder asignar a las predicciones realizadas una medida de la incertidumbre que indique con qué probabilidad será verificado un evento que pueda sobrepasar un cierto umbral de interés, por ejemplo el nivel de una margen o dique de protección (o el caudal asociado al mismo), condicionado a las simulaciones realizadas con los modelos. La función de distribución que permite evaluar esta probabilidad se denomina incertidumbre predictiva (IP).

Montanari y Brath (2004) mencionan varias aproximaciones para estimar la incertidumbre asociada a los modelos lluvia-escorrentía, bien sea en estudios orientados a simulación histórica o en casos de predicción y mencionan tres opciones:

La primera consiste en estructurar el modelo lluvia-escorrentía como de tipo probabilístico, lo que permite estimar los intervalos de confianza de la estimación o predicción óptima; la segunda se basa en describir la incertidumbre analizando las propiedades estadísticas de los errores del modelo respecto a los valores observados de la serie histórica, y la tercera se centra en propagar por separado las posibles fuentes de incertidumbre a través del modelo para generar momentos estadísticos o distribuciones de probabilidad para diversas salidas del modelo utilizando simulación y técnicas de muestreo tipo Monte Carlo.

Krzysztofowicz (1999) introduce un procesador de incertidumbre hidrológica denominado Hydrologic Uncertainty Processor (HUP), orientado a la evaluación de la IP en las predicciones hidrológicas, creando las bases para su estimación objetiva (Todini, 2008; Coccia y Todini, 2011). Más recientemente, se han hecho algunos intentos de combinar las predicciones realizadas con varios tipos de modelos mediante la técnica conocida como Bayesian Model Averaging (BMA) (Raftery et al, 2003; Raftery et al, 2005; Vrugt y Robinson, 2007).

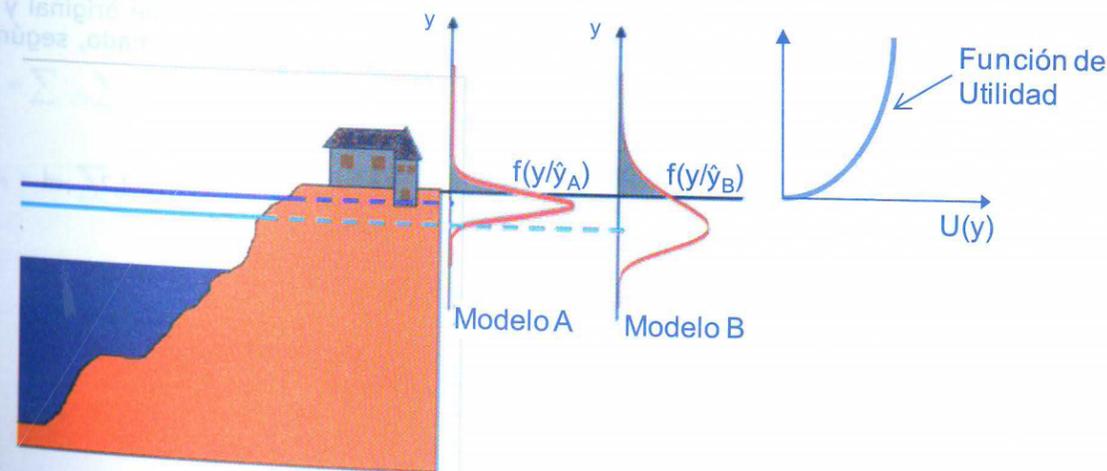
A partir de estas dos aproximaciones, Todini (2008) introduce un Pos-procesador Bayesiano denominado Model Conditional Processor (MCP), basado en una aproximación multi-Normal para estimar la IP.

Esta última metodología puede ser vista como una extensión del procesador Bayesiano HUP, así como una generalización de la metodología BMA. Una ventaja del MCP respecto a las otras aproximaciones mencionadas, es que permite combinar en forma efectiva las simulaciones de modelos de tipologías diferentes, que van desde los físicamente basados hasta los modelos basados en los datos, beneficiándose de la robustez de los primeros y de la adaptabilidad de los últimos (Todini, 2008). La estimación de la IP presentada en este trabajo se basa en el método MCP que se describe a continuación.

LA INCERTIDUMBRE PREDICTIVA Y EL MCP

Para entender completamente el significado de la IP, es necesario notar que lo que causará los daños derivados de una inundación es la ocurrencia futura real de un caudal y no la predicción del modelo (Todini, 2009). En otras palabras, sólo ocurrirán daños cuando el flujo se desborde al sobrepasar el nivel de la margen o dique de protección, independiente de la calidad de la predicción realizada. En la Figura 1 se ilustra la IP obtenida para dos modelos con la misma probabilidad de exceder el nivel de la margen pero con diferente nivel de confiabilidad y valor esperado asociado a la predicción realizada.

Figura 1 : Comparación entre el valor esperado de las predicciones de dos modelos con diferente confiabilidad, para un caso hipotético en que la probabilidad de excedencia del nivel de la margen debido a ambas predicciones es la misma (adaptado de Coccia y Todini, 2011).



En ambos modelos, la Función de Utilidad evaluada en el valor esperado de las predicciones (líneas punteadas) es cero, a diferencia de lo que ocurre si se cuantifica el valor esperado de la Función de Utilidad considerando la función de densidad de probabilidad (fdp) del nivel de flujo condicionado a las predicciones realizadas con los diferentes modelos utilizados:

$$E\{U(y_t)\} = \int_0^{+\infty} U(y_t) f(y_t / \hat{y}_{t/t_0}^A, \hat{y}_{t/t_0}^B, \dots, \hat{y}_{t/t_0}^N) dy \neq 0$$

En vista de la importancia de abordar el tema desde esta perspectiva, en las últimas décadas se ha incrementado el interés de la comunidad científica de hidrólogos y meteorólogos en la evaluación de la incertidumbre asociada a las predicciones basadas en modelos (Coccia y Todini, 2011), aumentando el número de publicaciones en este tema de forma exponencial.

La Incertidumbre predictiva IP, se define como la probabilidad de ocurrencia de un evento futuro real pero desconocido en el tiempo presente, condicionada a todas las observaciones y conocimientos del fenómeno que son aprovechables hasta el momento actual y de la información que se puede deducir mediante un proceso de aprendizaje inferencial (Todini, 2008). Resulta fundamental estudiar y describir matemáticamente esta IP, que al tener un carácter probabilístico, se debe cuantificar en términos de una fdp que deberá encapsular toda la información histórica disponible abarcando la mayor cantidad posible de situaciones hidrológicas diferentes registradas en el pasado, de tal modo que permita anticipar una situación semejante que se pueda presentar en el horizonte de predicción. Una vez estimada la fdp asociada a la predicción, ésta servirá a los encargados de la gestión de emergencias para aumentar la confiabilidad en sus procesos de toma de decisiones.



La metodología propuesta del MCP posibilita evaluar la IP total combinando tanto las incertidumbres de tipo meteorológico (previsión de la lluvia futura) como hidrológicas (modelos de transformación lluvia - escorrentía), mediante la derivación para varios horizontes temporales de la predicción, de la función de densidad de probabilidad conjunta multivariada entre la variable observada y las previsiones de uno o varios modelos. La combinación de modelos de diferente naturaleza busca sacar ventaja de sus características particulares y de diferentes capacidades para reducir la incertidumbre predictiva. En esta aproximación primero se hace una transformación no paramétrica de las observaciones y las previsiones de los modelos a un espacio multi-Normal mediante la operación Normal Quantile Transform (NQT), descrita en detalle por Kelly y Krzysztofowicz (1997), con la intención de generar nuevas variables en el campo transformado, cada una de ellas con distribución marginal Normal Estándar.

LA TRANSFORMACIÓN NQT

Si llamamos y a la variable observada en el campo original, y denominamos $\hat{y}_1, \hat{y}_2, \dots, \hat{y}_N$ a las variables referidas a los N modelos de predicción, todas éstas serán convertidas a las correspondientes variables transformadas, η y $\hat{\eta}_1, \dots, \hat{\eta}_N$ respectivamente, cada una de ellas con distribución marginal $N(0,1)$. La probabilidad asignada a cada valor de la serie histórica de alguna de estas variables debe ser la misma en el campo Gaussiano y en el campo original, siendo esta probabilidad el vínculo entre la variable original y su análoga en el campo transformado, según la expresión:

$$P(y < y_i) = P(\eta < \eta_i) = \frac{i}{m+1}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad [1]$$

En la ecuación [1], P indica la probabilidad de excedencia estimada con la distribución empírica Weibull plotting position, m es el número de datos de la serie histórica considerada e i es la posición de la serie ordenada de menor a mayor. Esta expresión es igualmente válida para la conversión al campo Normal de las series correspondientes a los modelos de predicción. El uso de la distribución empírica implica la necesidad de ajustar un modelo complementario en el campo original a cada una de las colas de la distribución de las variable transformadas, para cubrir los cuantiles con probabilidad mayor a la correspondiente al máximo valor registrado en la muestra con probabilidad $n/(n+1)$, o menor al valor mínimo registrado con probabilidad $1/(n+1)$.

Una vez transformadas todas las variables al campo multi-Normal, se formula la hipótesis de que la distribución conjunta entre la variable observada y las N variables correspondientes a las previsiones de los diferentes modelos es una distribución Normal Multivariada (o Metagaussiana). Según el Teorema de Bayes, a partir de esta distribución conjunta Normal Multivariada en el campo transformado es posible calcular la fdp de la variable observada condicionada a las previsiones de los diferentes modelos, es decir, la IP en el campo Gaussiano, la cual se obtiene según la expresión:

$$f(\eta | \hat{\eta}_1, \dots, \hat{\eta}_N) = f(\eta, \hat{\eta}_1, \dots, \hat{\eta}_N) / f(\hat{\eta}_1, \dots, \hat{\eta}_N) \quad [2]$$

Se puede demostrar que esta fdp condicionada resulta ser Normal, cuyo valor medio y varianza, respectivamente, resultan ser:

$$\mu_{\eta|\hat{\eta}} = \sum_{\eta\hat{\eta}} \sum_{\hat{\eta}\hat{\eta}}^{-1} \hat{\eta} \quad [3]$$

$$\sigma^2_{\eta|\hat{\eta}} = 1 - \sum_{\eta\hat{\eta}} \sum_{\hat{\eta}\hat{\eta}}^{-1} \sum_{\eta\hat{\eta}}^T \quad [4]$$

En las ecuaciones [3] y [4], $\sum_{\eta\hat{\eta}}$ es un vector fila de dimensión $(1, N)$ que contiene las covarianzas entre la variable observada y cada uno de los modelos de predicción; $\sum_{\hat{\eta}\hat{\eta}}$ es la matriz de covarianzas (N, N) entre los diferentes modelos; finalmente, $\hat{\eta}$ es un vector columna con las previsiones de todos los modelos $(N, 1)$. Un desarrollo más detallado de estas ecuaciones se puede consultar en Coccia y Todini (2011). Para un instante específico de tiempo en el que se tienen las previsiones de N modelos: $\hat{y}_1 = \hat{y}_1^*, \hat{y}_2 = \hat{y}_2^*, \dots, \hat{y}_N = \hat{y}_N^*$ transformadas al campo Normal, $\hat{\eta}_1 = \hat{\eta}_1^*, \hat{\eta}_2 = \hat{\eta}_2^*, \dots, \hat{\eta}_N = \hat{\eta}_N^*$ se calcula el valor esperado correspondiente a la combinación de las previsiones de los modelos, a partir de la fdp condicionada (ecuación [2]) con momentos dados por las ecuaciones [3] y [4]. El valor esperado de esta fdp en el campo Gaussiano es:

$$\eta^* = E[f(\eta | \hat{\eta}_1 = \hat{\eta}_1^*, \dots, \hat{\eta}_N = \hat{\eta}_N^*)] = \sum_{\eta\hat{\eta}} \sum_{\hat{\eta}\hat{\eta}}^{-1} \begin{bmatrix} \hat{\eta}_1^* \\ \vdots \\ \hat{\eta}_N^* \end{bmatrix} \quad [5]$$

Los intervalos de confianza de la predicción basada en la combinación de modelos para el nivel de significancia requerido, por ejemplo, para un 90%, se calculan como:

$$\eta^*_{5-95} = \eta^* \pm 1.645 \sigma_{\eta|\hat{\eta}} \quad [6]$$

Debido a la no linealidad en el proceso de transformación NQT, para obtener la IP completa en el campo original, $f(y | \hat{y}_1, \dots, \hat{y}_N)$ es necesario discretizar los valores de la IP en el campo Normal $f(\eta | \hat{\eta}_1, \dots, \hat{\eta}_N)$ y posteriormente convertir los cuantiles muestrales al campo original mediante el proceso de transformación inversa NQT-1. Del mismo modo, es posible convertir los cuantiles calculados en el campo Normal con la ecuación [6] a los valores correspondientes a la variable observada y en el campo original.



Una vez realizada la conversión de toda la IP al campo original, es posible calcular el valor esperado de la predicción basada en la combinación de las previsiones de los diferentes modelos utilizados: $E(y | \hat{y}_1, \dots, \hat{y}_N)$. Debido a la no linealidad del proceso, esta operación no es equivalente a convertir el valor esperado obtenido en el campo Normal con la ecuación [5]. En el caso más simple de un único modelo de predicción, la distribución conjunta en el campo transformado será Normal Bivariada con momentos:

$$\mu_{\eta, \hat{\eta}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad [7]$$

$$\Sigma_{\eta, \hat{\eta}} = \begin{bmatrix} 1 & \rho_{\eta \hat{\eta}} \\ \rho_{\eta \hat{\eta}} & 1 \end{bmatrix} \quad [8]$$

Debido a la transformación realizada al campo Gaussiano, las nuevas variables tienen distribución Normal Estándar, $N(0,1)$, y por tanto, la covarianza entre η y $\hat{\eta}$ es equivalente al coeficiente de correlación entre las variables ($\rho_{\eta, \hat{\eta}}$) es decir, la ecuación [8] se puede escribir como:

$$\Sigma_{\eta, \hat{\eta}} = \begin{bmatrix} 1 & \rho_{\eta \hat{\eta}} \\ \rho_{\eta \hat{\eta}} & 1 \end{bmatrix} \quad [9]$$

Reemplazando la ecuación [9] en las ecuaciones [3] y [4] se obtienen los momentos de la IP en el campo Normal para un único modelo de predicción:

$$\mu_{\eta \hat{\eta}} = \rho_{\eta \hat{\eta}} \cdot \hat{\eta} \quad [10]$$

$$\sigma^2_{\eta \hat{\eta}} = 1 - \rho_{\eta \hat{\eta}}^2 \quad [11]$$

El proceso descrito anteriormente no tiene en cuenta el hecho de que muchos modelos presentan un comportamiento diferente para reproducir por un lado los caudales bajos propios de la condición más habitual cuando no está lloviendo, y por otro lado, los caudales mayores que se presentan durante las crecidas. Adicionalmente, los primeros normalmente tienen una frecuencia mucho mayor, y por tanto, un mayor peso en el cálculo del coeficiente de correlación en la calibración del modelo estadístico. Por esta razón, en este trabajo se ha explorado la utilización de fdp conjuntas multivariadas truncadas, buscando mejorar la adaptación al separar los datos en dos muestras correspondientes a los caudales bajos y altos respectivamente (Figura 2). Se observa cómo en el caso de un solo modelo, al dividir los datos en dos muestras y ajustar a cada una de ellas una fdp conjunta bivariada truncada, el valor esperado obtenido en ambas muestras se ajusta mucho mejor a los valores observados -especialmente en los altos-, a la vez que la banda de incertidumbre se estrecha en ambos conjuntos, pero muy significativamente en ésta última.

Con la separación en muestras se pretende describir la IP de un modo más realista en ambos conjuntos de datos, y estimar el valor esperado de la predicción teniendo en consideración la variabilidad hidrológica en dos situaciones claramente diferenciadas. La distribución conjunta Normal truncada se describe en detalle en Coccia y Todini (2011). En la Figura 2 se presenta un ejemplo de aplicación de la metodología en el caso de utilizar un único modelo de predicción.

CASO DE ESTUDIO

Para la aplicación de la metodología propuesta se ha seleccionado la cuenca del Río Illinois localizada en el estado de Oklahoma, incluida en la segunda fase del proyecto de Intercomparación de Modelos Hidrológicos Distribuidos (DMIP2) (Smith et al, 2004) del National Weather Service (NOAA/NWS) de

Estados Unidos (Figura 3). Este proyecto surgió del interés de este organismo en evaluar la conveniencia de incorporar modelos hidrológicos distribuidos para la predicción de avenidas en la gestión de emergencias por inundaciones.

Figura 2 Aplicación del MCP en la cuenca Baron Fork utilizando el modelo TETIS. (Izq.) Sin separación de muestras. (Der.) Separación en dos muestras, cada una corresponde a una fdp bivariada truncada.

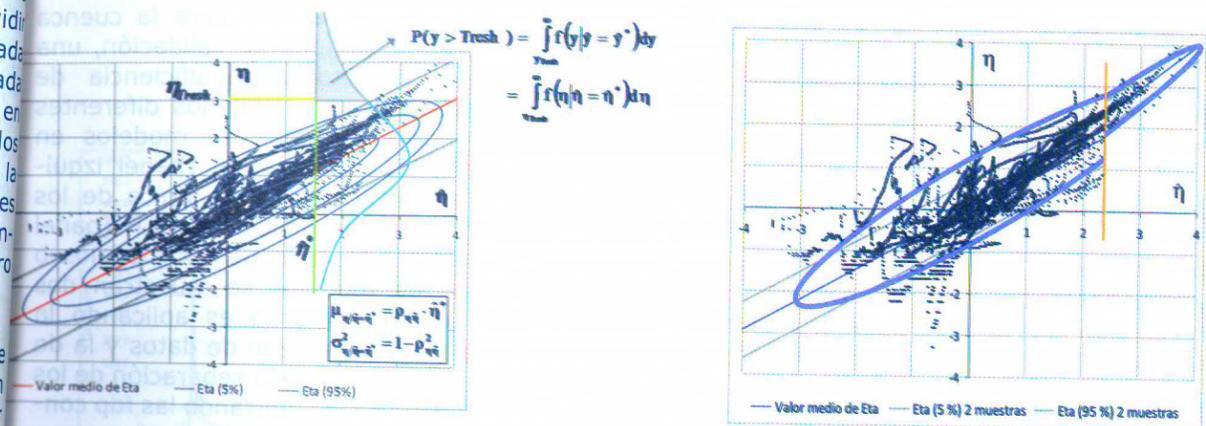
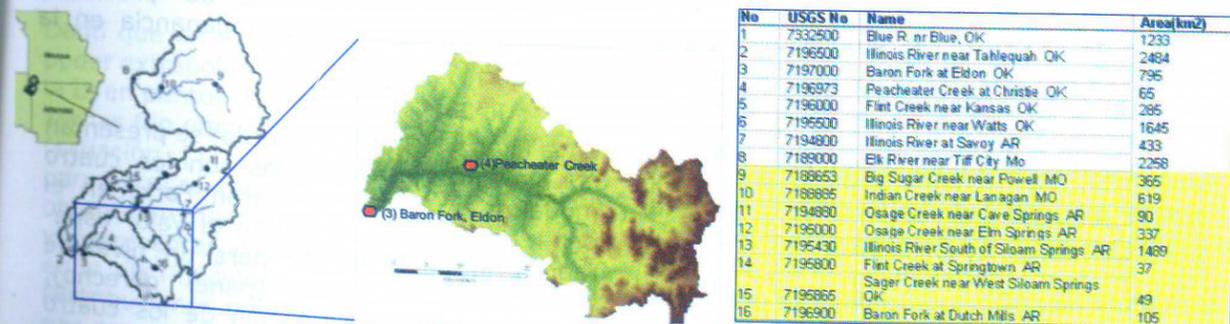


Figura 3 Cuencas de estudio proyecto DMIP2 en la región de Oklahoma (Fuente: Proyecto DMIP2, NOAA)



La cuenca de estudio se caracteriza por tener un clima semiárido con presencia de tormentas convectivas significativas y muy poca precipitación en forma de nieve (Carpenter y Goorgakakos, 2004). Una descripción más completa de la cuenca de estudio, así como de la formulación y objetivos científicos del proyecto DMIP2 se puede encontrar en Smith et al (2004). Para el proyecto DMIP2, el NWS puso a disposición de la comunidad hidrológica una base cartográfica de características físicas y ambientales de la cuenca, así como las series históricas disponibles de las principales variables hidro-meteorológicas, como los caudales en las estaciones de aforo y los campos de precipitación en la región de estudio estimados a partir de Radar (NEXRAD), ambos con resolución temporal horaria. La ETP y la Temperatura para el mismo período de tiempo (01/10/1995-30/09/2002) se han obtenido de NCEP/NCAR Reanalysis Project con resolución temporal de 3 horas.

En el estudio se utilizaron las simulaciones realizadas con cuatro modelos hidrológicos distribuidos seleccionados entre los participantes del proyecto DMIP2, para la evaluación de la incertidumbre predictiva. Los cuatro modelos seleccionados son: M. de Sacramento de NOAA-NWS (LMP); M. SWAT de Agricultural Research Service (ARS); M. GR4J de la agencia francesa CEMAGREF (CEM) y M. TETIS (Vélez, 2001; Vélez y Francés, 2002; Francés et al, 2007) de la Universidad Politécnica de Valencia. Entre los cuatro modelos mencionados, en este trabajo sólo se calibró y validó el modelo TETIS, el cual fue calibrado en la estación de aforo Baron Fork, cercana a la ciudad de Eldon (Múnera et al, 2010), con un área de drenaje de 795 km². Las simulaciones de los tres modelos restantes fueron realizadas por las respectivas instituciones participantes en el proyecto DMIP2, y se obtuvieron directamente de la página web del mismo.

APLICACIÓN DEL MCP EN CUENCAS AFORADAS

El MCP se ha aplicado inicialmente por separado para cada modelo de previsión, y posteriormente se ha realizado la estimación de la IP para las 4 combinaciones posibles



con dos modelos, posteriormente, para las combinaciones posibles con tres modelos y por último, la combinación de los cuatro modelos. La combinación de más de un modelo de previsión se realiza en tres fases con el MCP: en la fase I se procesa cada modelo y se calcula el valor esperado de la distribución predictiva en cada uno de ellos para cada paso de tiempo. En la fase II se combinan las series de valores esperados obtenidas en la fase I para cada modelo utilizando la aproximación multivariada, obteniendo como resultado el valor esperado de la combinación de modelos, de acuerdo a la ecuación. [5]. Finalmente, en la fase III se procesa el valor esperado de la combinación de modelos que resulta en la fase II como fuese un único modelo.

En la Figura 4 se presenta para la cuenca Baron Fork en el período de validación, una comparación del índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe calculado para los diferentes modelos y combinaciones de modelos durante todo el período de validación (panel izquierdo), así como la desviación típica de los errores obtenidos al aplicar el MCP (panel derecho). Para cada uno de los modelos y combinaciones de modelos se muestran en barras, la de la izquierda es aplicando la metodología a toda la serie de datos y la de la derecha corresponde a la separación de los datos en dos muestras utilizando las fdp conjuntas multivariadas truncadas.

En la mayoría de los modelos se observa cómo al utilizar la separación en dos muestras se incrementa el índice de eficiencia de Nash respecto a la aplicación del MCP sin separación de muestras. Lo anterior no es tan claro en todas las estaciones cuando se combinan varios modelos de previsión aunque si se observa una ganancia en la cuenca Baron Fork.

En la Figura 5 (panel izquierdo) se presentan las simulaciones obtenidas con los cuatro modelos en la cuenca Baron Fork; en el panel derecho se presentan el valor esperado y la banda de IP para un nivel de significancia del 90% (panel derecho), producto de la combinación de los cuatro modelos.

Figura 4: Resultados de algunos Índices Estadísticos al aplicar el MCP en la cuenca Baron Fork, período de validación. (Izq.) Índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe. (Der.) Desviación Estándar de los errores.

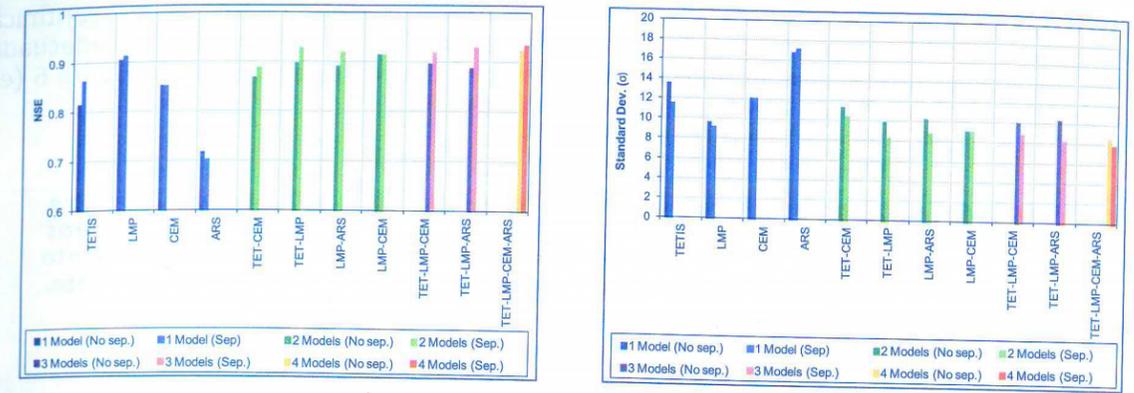
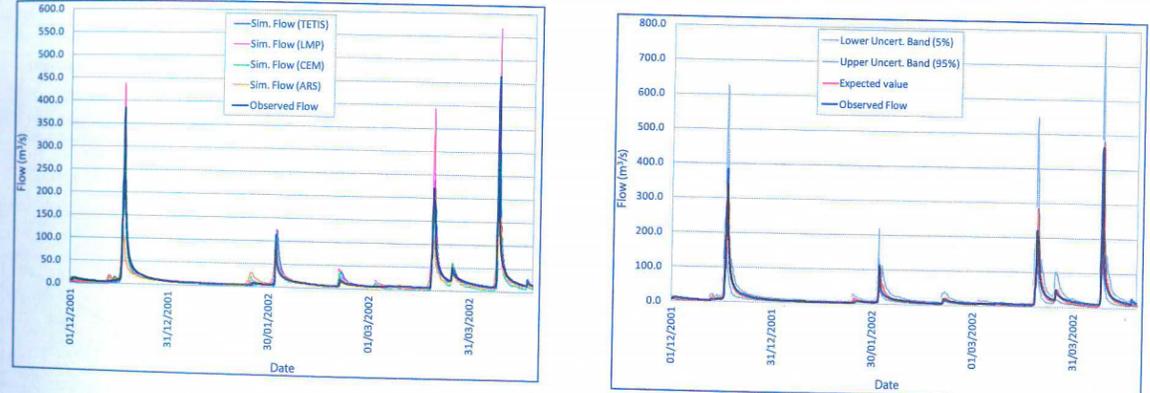


Figura 5: Aplicación del MCP en la cuenca Baron Fork. (Izq.) Simulaciones realizadas con los cuatro modelos. (Der.) Valor esperado de la combinación de modelos y Banda de IP (cuantiles del 5 y 95 %).



APLICACIÓN DEL MCP EN CUENCAS NO AFORADAS

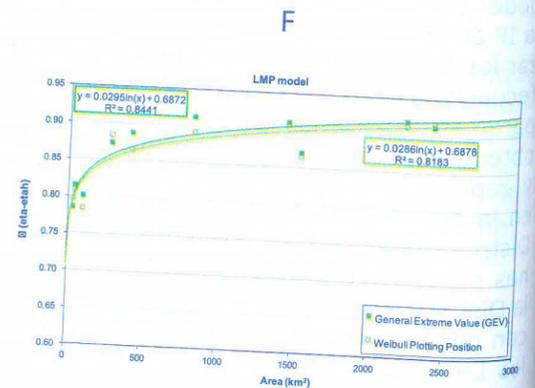
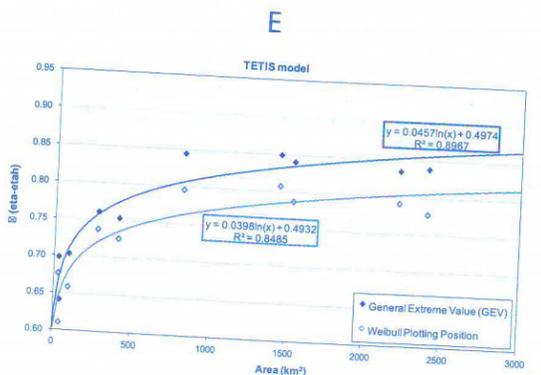
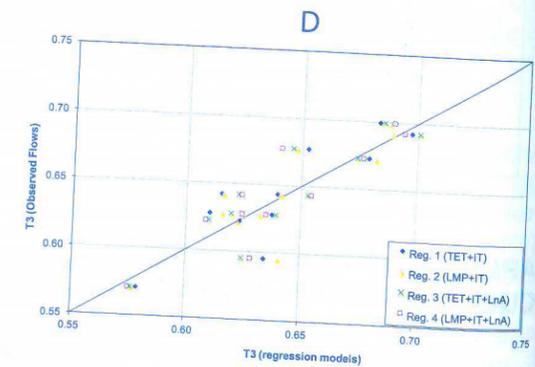
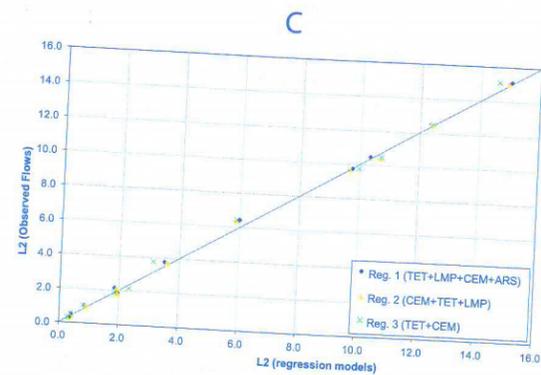
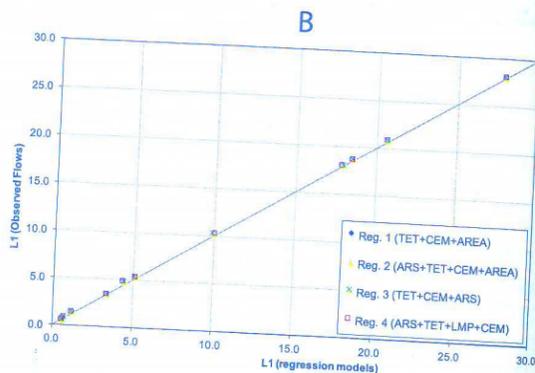
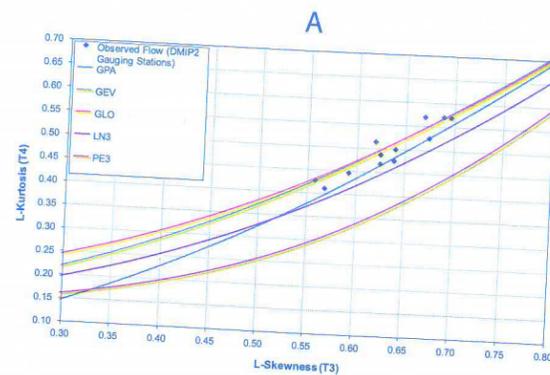
Dado que en este caso de estudio se busca poder extrapolar la metodología para estimar la IP en puntos no aforados, en lugar de utilizar las fdp empírica Weibull Plotting Position (ecuación [1]), se probaron algunas fdp paramétricas (de 3 parámetros), buscando obtener un buen ajuste a las series históricas y representar adecuadamente la asimetría en la distribución de los caudales. Entre las Distribuciones que se probaron, y tras algunas pruebas de ajuste realizadas, se adoptó la Distribución General Extreme Value (GEV), con parámetros estimados por el método de los L-momentos (Hosking, 1990; Hosking y Wallis, 1995; Hosking y Wallis, 1997).

Entre las pruebas realizadas se elaboró el Diagrama de relación de L-momentos (Hosking y Wallis, 1997) (Figura 6 (a)), en el que cada punto corresponde a una estación de aforo. Adicionalmente, se formularon algunos modelos de regresión para estimar los L-momentos de las series observadas a partir de los L-momentos de las series simuladas con los diferentes modelos hidrológicos y algunos descriptores de las cuencas como el Área (A) y el Índice Topográfico (IT).



En la Figura 6 (b), (c) y (d) se presentan los Diagramas de dispersión de diferentes modelos de regresión ajustados. Los ajustes son muy buenos para los dos primeros L-momentos y aunque se observa una mayor dispersión en el tercer L-momento, el ajuste también se considera razonable. En este último, se incluyeron los descriptores de las cuencas mencionados.

Figura 6: (a) Diagrama de relación de L-momentos. (b, c, d) Comparación entre los tres primeros L-momentos (L1, L2, T3) de los caudales observados y valores estimados con diferentes modelos de regresión. (e, f) Ajuste entre el coeficiente de correlación $\rho_{\eta\eta}$ y el área de drenaje, modelos TETIS y LMP, respectivamente.

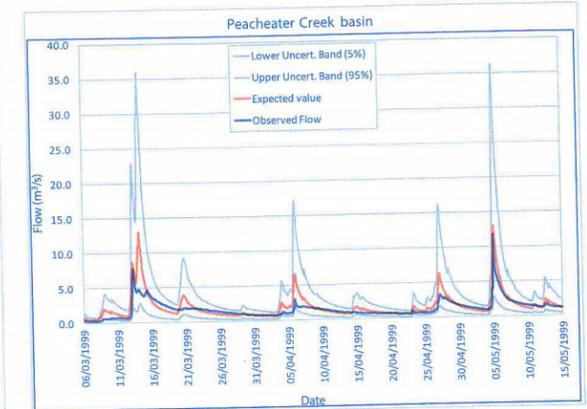
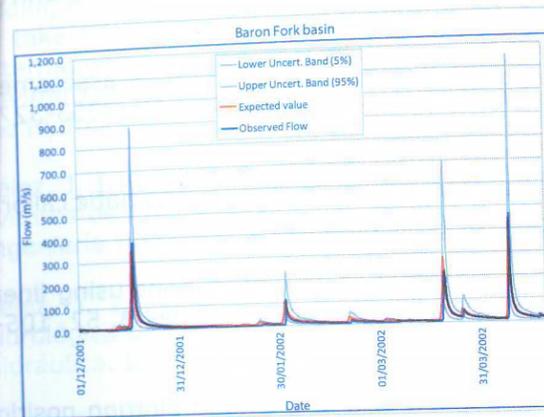


Finalmente, se buscó una relación funcional para estimar los coeficientes de correlación calculados en el campo Gaussiano ($\rho_{\eta\eta}$) para las estaciones de aforo con respecto a los mismos descriptores de las cuencas; se encontró que una función logarítmica respecto al Área de drenaje es adecuada para estimar estos coeficientes (Figura 6 (e) y (f)).

partir de las relaciones regionales obtenidas para los L-momentos y los coeficientes de correlación en el campo Gaussiano, es posible estimar el valor esperado y la banda de incertidumbre resultante de la combinación de modelos con el MCP.

En la Figura 7 se presentan los resultados de la metodología aplicada a las cuencas Baron Fork y Peacheater Creek en algunos períodos de la serie histórica en que se presentaron avenidas importantes.

Figura 7: Resultados de aplicación del MCP en cuencas no aforadas (Izq) Valor esperado de la combinación de modelos y Banda de IP (90 %), cuenca Baron Fork. (Der.) Valor esperado de la combinación de modelos y Banda de IP (90 %), cuenca Peacheater Creek.



CONCLUSIONES

La aplicación de la metodología del pos-procesador bayesiano de incertidumbre MCP al caso de estudio demuestra que éste es una herramienta robusta para estimar la incertidumbre predictiva asociada a las predicciones o simulaciones realizada con uno o varios modelos hidrológicos, especialmente en casos de avenidas.

modelo estadístico a los caudales picos de los eventos, y por tanto, una mejor estimación de la banda de IP asociada a los mismos, en especial cuando se utiliza un único modelo de predicción.

El MCP fue concebido como un pos-procesador de incertidumbre que permite utilizar cualquier tipología de modelos hidrológicos, hidráulicos o de otra índole, como herramienta de predicción o simulación, siempre y cuando sean adecuados al problema en cuestión, beneficiándose de las diferentes potencialidades y características individuales de cada modelo. En este trabajo se presenta una aproximación basada en la combinación de varios modelos hidrológicos distribuidos, utilizando fdp paramétricas para modelar la distribución de los caudales observados y simulados; la estimación de parámetros de la fdp seleccionada (GEV) se realizó por el método de los L-momentos. El uso de dos fdp conjuntas multivariadas truncadas en el campo transformado (metagaussiano) permite una mejor adaptación del

Para la evaluación de la IP en cuencas no aforadas se propone una regionalización de los L-momentos de la serie de caudales observados respecto a los L-momentos de las series simuladas y de algunos descriptores de las cuencas (A, IT). Así mismo, en la regionalización de los coeficientes de correlación entre la variable observada y las variables simuladas transformadas al campo Gaussiano (únicos parámetros del procesador de incertidumbre MCP), se obtuvo una relación funcional de tipo logarítmico con respecto al Área de drenaje para todos los modelos analizados en las cuencas estudiadas.

Finalmente, se comprobó que la combinación de modelos hidrológicos reduce considerablemente la banda de IP, tanto en cuencas aforadas como no aforadas, si se compara con la estimación realizada a partir de un único modelo.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Carpenter, T.M., Georgakakos, K.P. (2004). Impacts of parametric and radar rainfall uncertainty on the ensemble streamflow simulations of a distributed hydrologic model. *Journal of Hydrology*, 298 (1-4), 27-60.
- Coccia G., and Todini E. (2010). Application of a Bayesian Processor for Predictive Uncertainty Estimation in Real Time Flood Forecasting. BHS Third International Symposium: Role of Hydrology in Managing Consequences of a Changing Global Environment. Newcastle University, 19-23 July 2010.
- Coccia, G. and Todini, E. (2011). Recent developments in predictive uncertainty assessment based on the model conditional processor approach, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15, 3253-3260. doi:10.5194/hess-15-3253-2011.
- Francés F., Vélez J. I., Vélez J. J. (2007). Split-parameter structure for the automatic calibration of distributed hydrological models. *Journal of Hydrology*, 332, pp226- 240.
- Hosking, J. R. M. (1990). L-moments: analysis and estimation of distributions using linear combinations of order statistics. *Journal of the Royal Statistical Society, Series B*, 52, 105-124.
- Hosking, J. R. M., and Wallis, J. R. (1995). A comparison of unbiased and plotting position estimators of L-moments. *Water Resources Research*, 31, 2019-2025.
- Hosking, J. R. M., and Wallis, J. R. (1997). *Regional frequency analysis: an approach based on L-moments*. Cambridge, England: Cambridge University Press.
- Kelly, K. S., and R. Krzysztofowicz. (1997). A bivariate meta-Gaussian density for use in hydrology. *Stochastic Hydrol. Hydraul.*, 11, 17- 31.
- Krzysztofowicz, R. (1999). Bayesian theory of probabilistic forecasting via deterministic hydrologic model. *Water Resour. Res.*, 35: 2739-2750.
- Montanari, A., and A. Brath. (2004). A stochastic approach for assessing the uncertainty in rainfall-runoff simulations. *Water Resour. Res.*, 40, W01106, doi:10.1029/2003WR002544.
- Múnera J.C., Coccia G., Francés F., Todini E. (2010). Aplicación de un procesador bayesiano para la evaluación de la incertidumbre predictiva mediante combinación de modelos hidrológicos en la predicción de crecidas en tiempo real. XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Punta del Este, Uruguay.
- Raftery, A. E. (1993). Bayesian model selection in structural equation models, *Testing Structural Equation Models*, Bollen, K.A., and Long, J. S. (Eds.), Newbury Park, CA, 163-180.
- Raftery, A. E., Balabdaoui, F., Gneiting, T., and Polakowski, M. (1995). Using Bayesian model averaging to calibrate forecast ensembles, *Monthly Weather Review*, 133, 1155-1174.
- Smith, M.B., Seo, D.-J., Koren, V.I., et al. (2004). The distributed model intercomparison project (DMIP): an overview. *Journal of Hydrology*, 298(1-4), 4-26.
- Todini, E. (2008). A model conditional processor to assess predictive uncertainty in flood forecasting. *Intl. J. River Basin Management*. Vol. 6 (2), 123-137.
- Todini, E. (2009). Predictive uncertainty assessment in real time flood forecasting. Ph. D. Thesis. C. Veve, M. Laba and J. Mysiak (eds.) *Uncertainties in Environmental Modelling and Consequences for Policy Making*. NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security. Springer Netherlands, Amsterdam. DOI: 10.1007/978-90-481-2636-1_9, ISBN 978-90-481-2635-4, pp. 205-228.
- Todini, E. And Coccia, G. (2010). From deterministic to probabilistic thresholds: a better way to take advantage of predictive uncertainty in flood emergency management. BHS Third International Symposium: Role of Hydrology in Managing Consequences of a Changing Global Environment. Newcastle University, 19-23 July 2010. (To be published in an special issue of the *Hydrology Research Journal*).
- Vélez, J. I. (2001). Desarrollo de un modelo distribuido de predicción en tiempo real para eventos de crecidas. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. 266P.
- Vélez, J. I.; Vélez J. J. and Francés, F. (2002). Modelo distribuido para la simulación hidrológica de crecidas en grandes cuencas. En congreso: XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica. La Habana, Cuba. Published in CD. ISBN 959-7160-17-X.
- Wardlaw, J. A. and Robinson, B. A. (2007). Treatment of uncertainty using ensemble methods: a comparison of sequential data assimilation and Bayesian model averaging, *Water Resour. Res.*, 43, W01411, doi:10.1029/2005WR004838.

MÉTODOS PARA LA RECONSTRUCCION DE REGISTROS DE PALEO-INUNDACIONES

Autores: - Gerardo Félix Benito F. Doctor en Ciencias Geológicas
Consejo Superior de Investigaciones Científicas, CSIC.
- Blanca Adriana B. Doctora en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente
Universidad de Medellín
- Maria José Machado. Investigadora Programa Juan de la Cierva
Consejo Superior de Investigaciones Científicas, CSIC.

Correo electrónico: benito@mncn.csic.es ; machado@mncn.csic.es

RESUMEN

Las crecientes son el tipo más frecuente de desastre natural en el Mundo, y sus costes económicos han crecido de forma notable en las últimas décadas. Además del uso de datos hidrológicos convencionales, el registro pre-instrumental de crecidas se puede completar mediante información de paleo-crecientes (obtenidas del registro sedimentario) y con información histórica. La hidrología de paleo-inundaciones tiene como objetivo la reconstrucción de la magnitud y frecuencia de las inundaciones recientes y pasadas usando evidencias geológicas, principalmente sedimentos o marcas de erosión dejados por las crecientes. El registro sedimentario marca la elevación del agua alcanzada durante el pico de la crecienta lo que permite el cálculo de caudales de avenida que ocurrieron hace centenares o miles de años. Los desarrollos recientes en el estudio de las paleo-inundaciones a nivel mundial proporcionan (1) una mejora en la estimación de los riesgos de inundación; (2) la determinación del límite máximo de la magnitud de las crecientes, así como los niveles (alturas) no excedidos durante los últimos miles de años, como forma de comprobar la validez de los resultados proporcionados por otros métodos determinísticos como la Máxima Avenida Probable (PMF); (3) un mejor conocimiento de cómo el clima puede afectar a las inundaciones; y (4) valorar la sostenibilidad de los recursos hídricos en ambientes áridos donde las crecientes son una fuente importante de agua para la recarga de los acuíferos aluviales.

PALABRAS CLAVES

crecientes, paleo - inundaciones, sedimentos, riesgos de inundación

ABSTRACT

Floods are the most common type of natural disaster in the world, and its economic costs have grown significantly in recent decades. Conventional gauged hydrological data can be extended back in time by the use of paleo-floods (information obtained from the sedimentary record) and historical information. Paleoflood hydrology aims the reconstruction of the magnitude and frequency of recent and past floods using geological evidence, mainly sediment and erosion marks left by the floods. The sedimentary record allows the identification of the minimum water surface elevation reached during the peak of the flood allowing the calculation of flood discharges occurring over hundreds or thousands of years. Recent developments in the study of paleofloods worldwide provide (1) an improvement in the estimation of flood risk, (2) determining the maximum flood magnitude and levels (heights) not exceeded during the last thousand years, as a way to check the validity of the results provided by other methods such as deterministic Probable Maximum Flood (PMF), (3) a better understanding of how climate may affect flooding, and (4) assess the sustainability of water resources in arid environments where floods are an important source of water for recharge of alluvial aquifers.

KEYWORDS

floods, paleofloods, flood sediments, flood risk

INTRODUCCIÓN

El estudio de la peligrosidad de las inundaciones es una de las principales tareas de la hidrología aplicada. Estos estudios son básicos para cualquier desarrollo urbano o la construcción de infraestructuras y constituye uno de los principales retos en Ingeniería Civil. En la estimación de la peligrosidad de crecientes (flood hazards), uno de los principales problemas del ingeniero es la falta de información sobre caudales pico que sean representativos de las grandes crecientes de la cuenca de estudio. Incluso cuando existen estos registros, la mayor parte presentan una duración de pocas decenas de años, y por tanto, los datos de las crecientes máximas se encuentran infrarepresentados. La reducción del riesgo asociado a estas crecientes requiere la extensión de estos registros hacia el pasado, mediante información no convencional, que nos permitan estimar la magnitud de estos eventos extremos. Esta información de las crecientes del pasado se puede completar mediante datos históricos (basados en documentos o en observaciones directas), o a partir de información de paleocrecientes o paleocrecidas obtenidas de registros sedimentarios depositados por las inundaciones (Baker et al., 2002; Benito y O'Connor, 2013). En la mayor parte de los casos, los datos históricos registran aquellas crecidas que han producido daños en la propiedad, con indicación explícita de los daños y las dotaciones económicas empleadas por la administración local o nacional para hacer frente a los desperfectos producidos en cada caso. Los archivos sedimentarios presentes a lo largo de los ríos almacenan evidencias de crecidas catastróficas registradas geológicamente durante milenios. Desde hace dos décadas se han incrementado los estudios de paleocrecientes con el objetivo fundamental de descifrar la información contenida en estos archivos sedimentarios y documentales (Baker and Kochel, 1988, Benito et al., 2003a; Benito and Thorndycraft, 2004; Thorndycraft et al., 2005; Sheffer et al., 2008; Benito et al., 2011a; Grodek et al., 2013).

A partir de estos estudios detallados se ha podido reconstruir la magnitud y la frecuencia de inundaciones catastróficas producidas en épocas históricas y prehistóricas. En la mayor parte de los casos, estas "paleocrecientes" superan con creces la magnitud de las inundaciones que se ha producido en las últimas décadas, y constituyen una información única para su utilización en los estudios de riesgos naturales y su relación con la variabilidad climática.

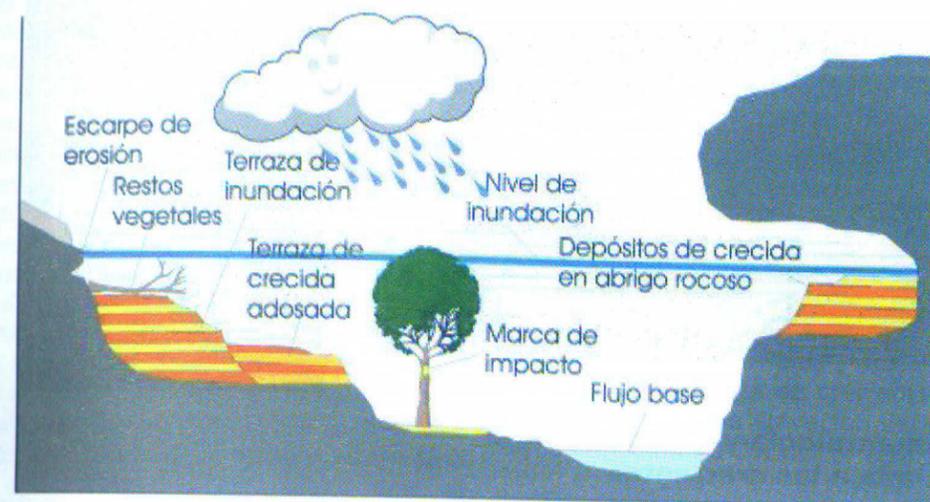
Los objetivos de este trabajo son: (1) presentar una descripción de la metodología seguida en el estudio de paleocrecientes y la discusión de sus limitaciones y errores asociados, y (2) describir las aplicaciones de los estudios de las paleocrecientes en la mejora de la estimación de riesgos, la estimación de caudales de diseño para infraestructuras de alto riesgo como las presas, y en la estimación de recursos hídricos en regiones semiáridas.

ANÁLISIS DE PALEOCRECIENTES

Los registros de paleocrecientes se obtienen a partir de una aproximación multidisciplinar que combina información geomorfológica, estratigráfica e hidrológica-hidráulica. Estos estudios se basan en el hecho de que durante una avenida el flujo deja una serie de indicadores físicos (sedimentos, flotantes, etc.) a partir de los cuales puede inferirse el nivel de agua o 'paleo-calado' (Fig. 1). Por un lado, estos indicadores pueden reflejar la elevación de la inundación, mediante líneas o depósitos de restos vegetales, líneas de arcillas y limos, y marcas de erosión.

Por otro lado, pueden indicar la altura mínima que alcanzó el agua durante el caudal punta, a través de la acumulación de depósitos acumulados en zonas de remanso, erosión de las márgenes, así como en marcas de impacto en los troncos de árboles localizados en las riberas.

Figura 1: Esquema de una sección transversal de un río excavado en roca, con indicación de los principales paleoindicadores de nivel de paleocrecientes. Destacan la posición de los depósitos acumulados por las aguas de inundación en zonas marginales del valle, formando bancos o terrazas de inundación, o en el interior de cavidades y abrigos en roca. Los diferentes colores de los depósitos representan niveles o capas de sedimentos cada uno de ellos correspondientes a diferentes inundaciones.



El estudio de la magnitud y frecuencia de crecidas en periodos temporales largos (varios cientos de años) requiere la construcción de un catálogo completo de caudales que han excedido algún nivel de censura arbitrario (umbral de caudal) durante el tiempo de registro en cuestión. La metodología empleada en esta reconstrucción de eventos del pasado incluye: (1) inventario preliminar de los tramos y lugares potenciales de deposición, usando fotografía aérea; (2) visita de campo y toma de medidas para la identificación y selección de indicadores de crecidas (depósitos de crecidas y marcas); (3) descripción estratigráfica con énfasis en la identificación de unidades o "capas" en los sedimentos que permitan diferenciar múltiples crecientes; (4) recogida de muestras para la datación de la edad de las capas o niveles acumulados; (5) levantamiento topográfico de los tramos fluviales con depósitos; (6) modelización hidráulica y estimación de caudales; (7) comparación con los datos históricos disponibles, y (8) análisis de frecuencias.

Los depósitos de inundación de remanso, denominados en inglés como slackwater flood deposits son los indicadores que nos permiten la obtención del registro más completo sobre las inundaciones pasadas (Baker and Kochel, 1988).

Estos depósitos se sedimentan en zonas de remanso o con formación de torbellinos donde el flujo de agua presenta una velocidad de flujo muy bajas o nulas durante el caudal punta.

Estas zonas con velocidad baja se localizan principalmente en la desembocadura de barrancos afluentes, zonas de expansión de canal, curvas de meandros y cavidades en rocas. Los depósitos de crecida presentan texturas de arena y limo con espesores para cada nivel de crecida que oscilan entre unos pocos centímetros a 1.5 m (Fig. 2). Desde el punto de vista sedimentológico, se observa una textura granodecreciente con estructuras de tipo masivo, laminación horizontal y laminación cruzada. Por tanto, cada vez que se produce una crecida estas zonas de acumulación reciben una nueva "capa" o nivel de sedimentos que se apila sobre los depósitos anteriores. El reconocimiento de diferentes inundaciones requiere un estudio estratigráfico detallado. Los contactos entre los diferentes niveles de crecida suelen indicar signos de haber presentado una exposición subaérea (grietas de desecación, paleosuelos, acumulación de hojas y ramas, etc.), antes de la acumulación de nuevos depósitos de crecida.

Figura 2: Arriba, dos bancos con depósitos de paleocrecidas en el río Tajo (Centro de España). Derecha, detalle de la estratigrafía y sedimentología de los depósitos de remanso con indicación de diferentes unidades.



- Sedimentología y geomorfología asociada a las crecientes

Los ríos excavados en roca o que forman gargantas fluviales son los tramos más indicados para el estudio de paleocrecientes, debido a que son tramos estables en su geometría y por favorecer el desarrollo de zonas de remansos (baja energía) en los que se produce la sedimentación. En estas zonas de remanso (remolinos, áreas de estancamiento hidráulico) donde la velocidad del flujo disminuye (<1 m s⁻¹) se produce la sedimentación del material que la creciente transporta en suspensión (partícula menores de 2 mm), principalmente arena, limo y arcilla. La reconstrucción de las paleocrecientes durante periodos de tiempo largo requiere de secuencias estratigráficas continuas de estos depósitos de remanso. Los ambientes deposicionales más comunes incluyen: (1) áreas de expansión de los valles; (2) desembocadura de afluentes, (3) en cavidades y cuevas desarrolladas en las paredes de los cañones rocosos; (4) en curvas de meandros; (5) en la parte superior de terrazas o superficies planas en roca (Baker & Kochel, 1988; Benito et al., 2004; Thorndycraft et al., 2005; Benito y Thorndycraft, 2004). En estos ambientes, las formas deposicionales predominantes son los bancos y las barras de remanso.

Los bancos de depósitos se forman por la acreción vertical de los depósitos de remanso formando capas o niveles estratigráficos depositados por crecidas sucesivas. A medida que se produce la sedimentación se incrementa la altura a la que se sitúa el techo del banco respecto al lecho del río, y por tanto se requieren de crecidas cuyo nivel de agua puedan superar la altura de los bancos construidos por las paleocrecientes. En el caso de bancos adosados a otros de mayor altura, estos se generan por crecidas de menor magnitud y que no superan la altura de los bancos con alturas mayores. La principal tarea en la discriminación entre niveles de creciente requiere de una estratigrafía detallada con énfasis en la identificación e interpretación de los contactos entre unidades y que son indicativas de diferentes eventos de creciente. Algunos de los criterios básicos para la identificación de los contactos entre unidades de paleocrecientes son la existencia de láminas de arcilla y/o bioturbación a techo de las unidades, niveles coluviales intercalados, cambios en el color o el tamaño de las partículas depositadas, endurecimiento en el sedimento o presencia de grietas de retracción, entre otros (Baker & Kochel, 1988; Enzel et al., 1994; Benito et al., 2003a; Thorndycraft et al., 2005).

- Cronología de las paleo-crecientes

La edad absoluta de las paleocrecientes se obtiene a partir de la datación geocronológica (absoluta) de las diferentes unidades, y su edad relativa a partir de la posición estratigráfica. La edad absoluta se determina mediante técnicas radiométricas o arqueológicas. La técnica más utilizada en la datación absoluta o numérica es el radiocarbono (Carbono-14), tanto mediante contadores de gas como mediante el espectrómetro de acelerador de masas (AMS). El AMS es capaz de datar muestras orgánicas de tamaño muy pequeño (1-2 miligramos), como semillas, polen, hojas o restos diminutos de carbón vegetal (Baker et al., 1985). Otra técnica utilizada para datar este tipo de sedimentos es la luminiscencia estimulada óptimamente (OSL; Benito y O'Connor, 2013). Este método determina los años transcurridos desde que el sedimento se expuso por última vez a la luz solar, y por tanto el tiempo de enterramiento. La datación por luminiscencia se basa en la capacidad de los minerales a almacenar cargas (electrones y huecos) en la red cristalina que han sido liberadas por la exposición a la radiación ionizante en el entorno del grano mineral, i.e. en el entorno del sedimento. La cantidad de carga atrapada en estos defectos está únicamente determinada por el tiempo (años) desde que el cristal está recibiendo esta radiación, una vez enterrado en el sedimento (Wintle & Huntley, 1982). La datación por OSL se centra principalmente en las mediciones sobre granos de cuarzo y feldespato. La OSL pueden contener desviaciones de la edad verdadera con una precisión que proporciona errores típicos de <5%.

- Estimación de caudales de paleocrecientes

La altura a la que se localizan los depósitos respecto al cauce permite inferir el nivel mínimo alcanzado por el agua durante la crecida, ya que es un indicador directo de que la superficie del agua de avenida estuvo situada por encima de los depósitos (Benito y Thorndycraft, 2004).

Se ha observado de forma empírica que la altura máxima a la que se sitúan los depósitos se aproxima a la altura del agua durante el momento de caudal pico de la avenida, aunque en ocasiones se han observado desfases de 1 o 2 m. Conocida la altura mínima del agua durante el caudal punta, podemos realizar una estimación del caudal asociado a cada uno de los depósitos de crecida. Se trata de un problema inverso donde el caudal de avenida se obtiene mediante un proceso de prueba-error usando las propiedades hidráulicas del modelo por comparación entre los niveles de agua observados y los simulados (Figura 3).

Existen diversas fórmulas y modelos para estimar los caudales de crecientes pasadas a partir de una elevación del nivel de agua conocida (O'Connor & Webb, 1988; Lang et al., 2004). En la mayor parte de los casos se asume un flujo unidimensional con un lecho fijo, y los principales parámetros de entrada en el modelo son la pendiente, la rugosidad (normalmente n de Manning), y la geometría de las secciones transversales. En el caso del método de paso estándar, se deben incluir las condiciones de contorno aguas abajo y/o aguas arriba dependiendo del tipo de flujo subcrítico y/o supercrítico, respectivamente.

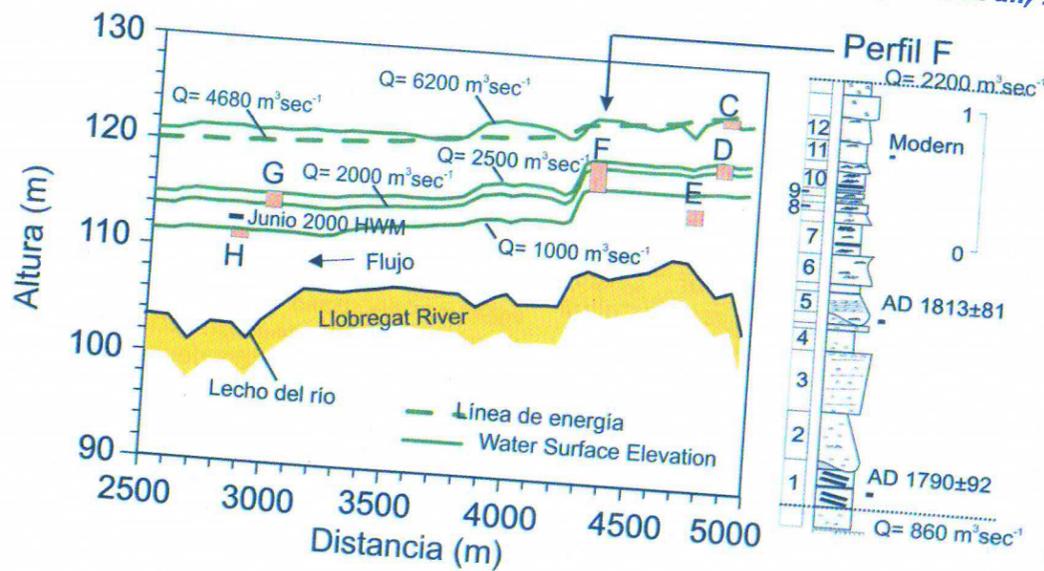
La mayor parte de los estudios de paleocrecientes se desarrollan en cañones rocosos, donde la geometría y las características hidráulicas pasadas se pueden considerar similares a las presentes, dado que los cambios en el lecho del río son mínimos. Igualmente, en la mayor parte de los cañones rocosos se verifica la premisa del flujo unidimensional, y por tanto, la aplicación de modelos unidimensionales resulta apropiada para la estimación de caudales.

Los métodos de cálculo consiguen una mayor exactitud de caudal y velocidad, si tienen en cuenta las variaciones y pérdidas de energía del flujo de agua (Fig. 3)

El procedimiento es de carácter iterativo de tipo prueba-error y se basa en la resolución de la ecuación de la energía en una dimensión, derivada de la fórmula de Bernoulli para flujo estacionario gradualmente variado. Existen diversos modelos hidráulicos que incorporan estas ecuaciones para flujo unidimensional (e.g. Modelo HEC-RAS, software libre del ejército Americano) o bidimensional,

éstas últimas normalmente resuelven las ecuaciones de Navier-Stokes mediante el método de volúmenes finitos. Mediante la aplicación de estos modelos se obtiene una estimación precisa de los caudales pico de cada una de las paleocrecidas, y que podemos incorporar como fuente de datos en los estudios de riesgos y en planificación territorial (Fig. 3).

Figura 3: Perfil longitudinal de un tramo fluvial del río Llobregat (NE de España) donde se muestra la posición de los perfiles estratigráficos, utilizados en la discriminación de paleocrecidas. Se muestran los niveles de superficie de agua estimados por el modelo HEC-RAS para varios caudales (líneas verdes), de donde se deriva que los caudales que depositaron estos sedimentos estaban comprendidos entre 1000 m³s⁻¹ y 6200 m³s⁻¹. Se muestra a la derecha el perfil estratigráfico F con algunas dataciones de los niveles realizadas con carbono-14. Edades en años AD de nuestra era y los errores correspondientes en torno a la fecha central de la datación (Thorndyraft et al., 2005).



- Análisis estadístico usando datos de paleocrecientes

Los métodos tradicionales de análisis de frecuencia asumen que la distribución de las magnitudes "no conocidas" de grandes eventos están bien representadas en el registro de aforos o que se pueden obtener mediante la extrapolación estadística a partir de las crecientes registradas (normalmente crecientes modestas). El valor añadido de los datos de caudal de las paleocrecientes reside en su potencial para incluir evidencias positivas de grandes crecidas, o de su límite de magnitud, en periodos seculares de tiempo.

El uso de información histórica y de paleocrecidas presenta dos posibles problemas: (1) se trata de datos no sistemáticos (solamente las crecidas mayores se conocen), y (2) son datos no-homogéneos en los que se puede violar la presunción de estacionalidad de la serie de datos debido a la posible variabilidad climática natural a escala secular. Estos problemas se han discutido y abordado por Redmond et al., (2002); Benito et al. (2004) y Francés (2004).

La hipótesis básica en la modelación estadística de la información de paleocrecientes es que existe un valor mínimo de nivel de agua para un periodo de tiempo dado (desde un año a varios cientos de años), conocido como umbral mínimo de caudal o nivel de censura, que actúa como discriminante de la información de tal forma que cada vez que este nivel se ha excedido aparece registrados en las evidencias geológicas de paleocrecientes dejadas en los depósitos (Stedinger & Baker, 1987; Fig. 4). En hidrología, las observaciones de crecientes que han excedido determinado umbral (como es este caso) se consideran como datos censurados (Leese, 1973; Stedinger & Cohn, 1986; Stedinger & Baker, 1987). La información histórica y de paleocrecientes se consideran como muestras censuradas de Tipo 1, y se asume que el número de k observaciones excediendo un umbral arbitrario de caudal (XT) en M años se conoce (datos censurados por encima de umbral; Stedinger y Cohn, 1986; Stedinger & Baker, 1987; y Francés et al., 1994). El valor del pico de las crecidas por encima del umbral XT puede conocerse o no. El valor exacto de las crecidas por debajo del umbral (M-k) también se desconoce, pero al menos se sabe que estuvieron por debajo del umbral XT. En los estudios de hidrología de paleocrecientes estos umbrales de nivel están relacionados con la elevación de los bancos de depósitos, cuevas y cavidades rellenas de sedimentos, o áreas de llanura de inundación (Benito et al., 2004).

Los datos de paleocrecientes se organizan de acuerdo a diferentes umbrales o niveles excedidos por las aguas de avenida durante determinados periodos de tiempo (umbrales deposicionales; Fig. 4). Los caudales de crecientes obtenidos a partir de los indicadores de paleocalado mínimo y máximo se pueden introducir como caudales mínimos y máximos. La organización de los datos en niveles excedidos durante ciertos periodos de tiempo reduce el potencial de infraestimación de los caudales.

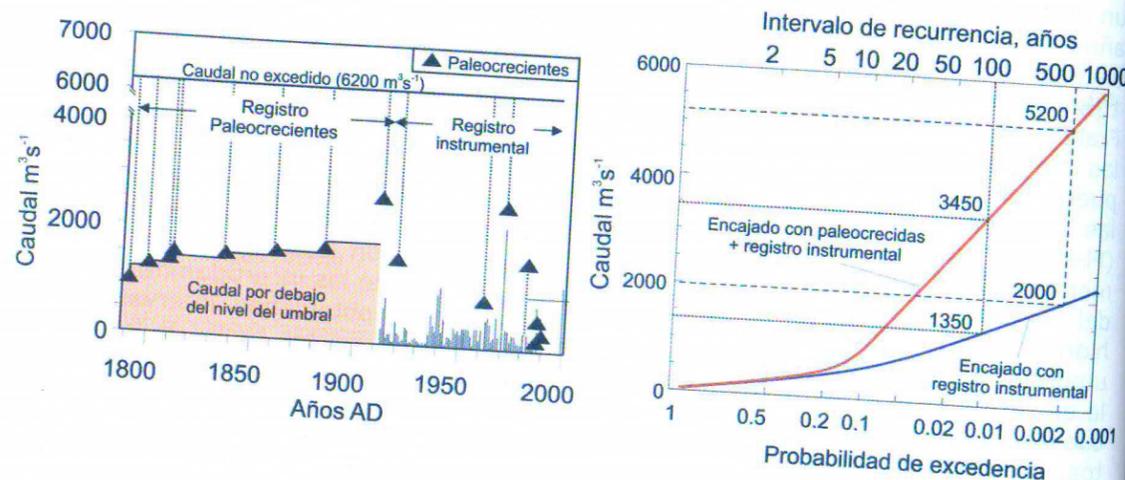
Resulta vital incorporar explícitamente el rango y tipo de los errores de medida para producir una estimación adecuada de las incertidumbres de la frecuencia de las crecientes. Los métodos tradicionales de estimación de los momentos estadísticos de una distribución se modifican para combinar datos de caudal conocidos y datos censurados. Los estimadores de Máxima Verosimilitud (Leese, 1973; Stedinger & Cohn, 1986; Cohn & Stedinger 1987), y el algoritmo de los momentos esperados (Cohn et al., 1997) se usan como alternativa a los métodos de los momentos (U.S. Water Resources Council, 1976). Diversos trabajos han mostrado su eficiencia en la estimación de los parámetros estadísticos de funciones de distribución tradicionalmente usadas en el estudio de la peligrosidad de crecientes (e.g. Gumbel, LP3, Generalised Extreme Value), proporcionando un marco práctico para la incorporación de datos imprecisos y categóricos (Botero 2006; Botero y Francés, 2010). Otros autores han propuesto el uso de métodos Bayesianos con datos históricos y errores de medida (O'Connell et al., 2002; O'Connell, 2005; Reis & Stedinger, 2005). En relación con los métodos basados en verosimilitud, el análisis Bayesiano proporciona un descripción más exacta del riesgo y de las incertidumbres de sus parámetros, obteniendo intervalos más realísticos y creíbles tanto de los cuantiles de inundación como de los ajustes a los datos extremos (Reis & Stedinger, 2005). Una revisión de estos métodos usando datos históricos se pueden encontrar en Ouarda et al. (1998) y en Francés (2004), y diferentes casos de estudio con aplicaciones en Europa se describen en Francés et al., (1994), Naulet et al. (2005), Botero (2006) y Benito et al. (2004), entre otros.

Antes de realizar el análisis estadístico, se deben considerar las características generales y la estacionaridad de las series.

Los cambios temporales en la trayectoria y los estadísticos de una variable pueden corresponder a variaciones naturales de baja frecuencia del clima, o a dinámica no estacionaria relacionado con cambios antropogénicos en parámetros críticos tales como el uso del suelo y la composición atmosférica (Redmond et al., 2002). El registro de la estacionaridad de las crecidas para muestras censuradas (sistemáticas y/o no sistemáticas) se puede comprobar mediante el test de Lang (Lang et al., 1999).

Este test asume que las series de crecida pueden describirse como un proceso de Poisson homogéneo, calculado el valor del intervalo de tolerancia del 95% para un número acumulado de crecientes por encima de un umbral, o nivel de censura. La serie se considera estacionaria en caso de permanecer dentro del 95% de tolerancia (Naulet et al., 2005). Recientemente se han desarrollado diversos métodos para resolver los problemas de estacionalidad en el análisis de frecuencias de crecidas (López de la Cruz, 2013).

Figura 4. Organización de los datos de caudal de las paleocrecidas (triángulos) y área con caudal por debajo del umbral de registro. El ajuste del análisis de frecuencia corresponde a una distribución de tipo TCEV encajada sólo para datos de aforos del registro instrumental (azul), y para datos de paleocrecidas + datos instrumentales (rojo). Se observa como los cuantiles obtenidos para la curva que incluye datos de paleocrecidas son superiores a los obtenidos con el ajuste de datos sólo instrumentales. Modificado de Botero, 2006; Benito y O'Connor, 2013.



CONCLUSIONES

Este trabajo muestra como a partir del registro sedimentario de paleocrecidas se pueden obtener estimaciones de caudales precisas. En muchas cuencas, por ejemplo en los ríos Gardón y Llobregat, la evidencia a partir de paleocrecidas indica que en el pasado han ocurrido crecidas de mayor magnitud que las registradas durante el periodo instrumental. En otras cuencas, como por ejemplo en el río Narmada en India,

los estudios de paleocrecidas muestran que las crecidas registradas en las series instrumentales fueron, de hecho, las mayores en muchos cientos o miles de años. En términos de los efectos hidrológicos del Cambio Climático, las predicciones pueden mejorarse con la incorporación de registros de crecidas a largo plazo (varios milenios) en la modelización climática y el análisis estadístico.

Los estudios regionales de las relaciones clima-inundaciones incluyen la calibración de las relaciones, las tendencias de detección (cuando existen) y las estimaciones de revisión de periodos de retorno. Los datos de paleocrecidas también pueden proporcionar evidencia física de los límites superiores de las inundaciones en una cuenca sin depender de extrapolaciones estadísticas de los registros instrumentales cortos,

mejorando así las estimaciones de caudal de diseño para infraestructuras hidrológicas sensibles, tales como presas. Las aplicaciones recientes de los datos de paleocrecidas para ayudar a cuantificar las tasas de recarga de los acuíferos aluviales a largo plazo permiten mejorar las estimaciones de los recursos hídricos disponibles en ambientes áridos y semi-áridos, y mejorar por tanto su sostenibilidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Baker, V.R., Kochel, R.C., 1988. Flood sedimentation in bedrock fluvial systems. In: V.R Baker, R.C. Kochel., P.C. Patton (Eds.), Flood Geomorphology, J. Wiley, 123-137.

Baker, V.R., Pickup, G., Polach H.A., 1985. Radiocarbon Dating of Flood Events, Katherine Gorge, Northern Territory, Australia. *Geology*, 13, 344-347.

Baker, V.R., Webb, R.H., House, P.K., 2002. The scientific and societal value of paleoflood hydrology. In: House, P.K., Webb, R.H., Baker V.R., Levish D.R., (Eds.), Ancient Floods, Modern Hazards: Principles and Applications of Paleoflood Hydrology, American Geophysical Union Water Science and Application, vol. 5, p. 1-19 Washington, D.C..

Benito G. y O'Connor, J.E., 2013. Quantitative Paleoflood Hydrology. In: Shroder, J.E. (Editor-in-chief), Wohl, E. (Volume Editor). *Treatise on Geomorphology*, Vol. 9, Fluvial Geomorphology, San Diego: Academic Press, 459-474.

Benito G. y Thorndycraft, V.R., 2004 (Eds.). Systematic, palaeoflood and historical data for the improvement of flood risk estimation. CSIC, Madrid, 115 pp.

Benito, G., Lang, M., Barriendos, M., Llasat, M.C., Frances, F., Ouarda, T., Thorndycraft, V., Enzel, Y., Bardossy, A., Cœur, D., Bobée, B., 2004a. Use of Systematic Paleoflood and Historical Data for the Improvement of Flood Risk Estimation. *Review of Scientific Methods*. *Natural Hazards*, 31, 623-643.

Benito, G., Sopena, A., Sánchez, Y., Machado, M.J., Pérez González, A., 2003a. Palaeoflood Record of the Tagus River (Central Spain) during the Late Pleistocene and Holocene. *Quaternary Science Reviews*, 22, 1737-1756.

Botero, B., Francés, F., 2010. Estimation of high return period flood quantiles using additional non-systematic information with upper bounded statistical models. *Hydrology And Earth System Sciences*, 14, 2617 - 2628.

Botero, B.A., 2006. Estimación de crecidas de alto periodo de retorno mediante funciones de distribución con límite superior e información no sistemática. PhD Thesis, Polytechnic University of Valencia, (inédito).

Cohn, T. A. & Stedinger, J. R., 1987. Use of historical information in a maximum-likelihood framework. *J. Hydrol.* 96, 215-223.

Enzel, Y., Ely, L.L., Martinez, J., Vivian, R.G., 1994. Paleofloods comparable in magnitude to the catastrophic 1989 dam failure flood on the Virgin River, Utah and Arizona. *Journal of Hydrology*, 153, 291-317.

- Francés, F., 2004. Flood frequency análisis using systematic and non-systematic information. In: G. Benito, V. R. Thorndyraft (Eds.), Systematic, palaeoflood and historical data for the improvement of flood risk estimation. CSIC, Madrid, pp. 55-70.
- Francés, F., Salas, J.D., and Boes, D.C., 1994. Flood frequency analysis with systematic and historical or palaeoflood data based on the two-parameter general extreme value modes. *Water Resources Research* 30 (6), 1653-1664.
- Grodek, T., Benito, G., Botero, B.A., Jacoby, Y., Porat, N., Haviv, I., Cloete, G., and Enzel, Y. 2013. The last millennium largest floods in the hyperarid Kuiseb River basin, Namibia Desert. *Journal of Quaternary Science*, 28(3): 258-270.
- Lang M., Fernandez Bono J.F., Recking A., Naulet R., Grau Gimeno P., 2004. Methodological guide for paleoflood and historical peak discharge estimation. Systematic, Palaeoflood and Historical Data for the Improvement of Flood Risk Estimation: Methodological Guidelines. Ed. by G. Benito and V. Thorndyraft, CSIC Madrid, Spain, 43-53
- Lang, M., Ouarda, T. B. M. J., Bobée, B., 1999. Towards operational guidelines for over-threshold modeling. *Journal of Hydrology*, 225, 103-117.
- Leese, M. N., 1973. Use of censored data in the estimation of Gumbel distribution parameters for annual maximum flood series, *Water Resources Research*, 9, 1534-1542.
- López de la Cruz, J., 2013. Análisis estadístico y modelación del régimen de las crecidas en ríos de la España Peninsular en un contexto no estacionario. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, 264pp. (inédito).
- Naulet, R., Lang, M., Ouarda, T. B. M. J., Coeur, D., Bobee, B., Recking, A. & Moussay, D., 2005. Flood frequency analysis on the Ardeche River using French documentary sources from the last two centuries. *Journal of Hydrology*, 313, 58-78.
- O'Connell, D. R. H., 2005. Nonparametric Bayesian flood frequency estimation. *J. Hydrol.* 313, 79-96.
- O'Connell, D. R. H., Ostenaar, D. A., Levish, D. R. & Klinger, R. E., 2002. Bayesian flood frequency analysis with paleohydrologic bound data. *Water Resour. Res.* 38(5), 16.1-16.14.
- O'Connor, J.E., Webb, R.H., 1988. Hydraulic Modeling for Palaeoflood Analysis. In: Baker, V.R., Kochel, R.C., Patton, P.C. (Eds.), *Flood Geomorphology*, J. Wiley, New York, pp. 393-403.
- Ouarda, T. B. M. J., Rasmussen, P. F., Bobée, B., Bernier, J., 1998. Use of historical information in hydrologic frequency analysis. *Revue des Sciences de l'Eau*, 11, 41-49.
- Redmond, K.T., Enzel, Y., House, P.K. Biondi, F., 2002. Climate variability and flood frequency at decadal to millennial time scales. In: P.K. House, R.H. Webb, V.R. Baker, D.R. Levish (Eds.). *Ancient floods, modern hazards: Principles and applications of Paleoflood Hydrology*. *Water Science and Application* 5, American Geophysical Union, Washington DC, pp. 21-45.
- Reis D. S., Jr., Stedinger J. R., 2005. Bayesian MCMC flood frequency analysis with historical information. *Journal of Hydrology*. 313, 97-116
- Sheffer, N.A., Rico, M., Enzel, Y., Benito, G., Grodek, T., 2008. The palaeoflood record of the Gardon river, France: A comparison with the extreme 2002 flood event. *Geomorphology* 98, 71-83.

EVALUACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA EN LA CUENCA DEL RÍO PORCE

Autores: - Juan Esteban González V. - Magíster en Desarrollo Sustentable. Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia - CTA
- Claudia Patricia Campuzano O. - Magíster en Recursos Hidráulicos. Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia - CTA

Correo electrónico: juangp83@yahoo.com.mx; ccampuzano@cta.org.co

RESUMEN

En el presente artículo se presentan los principales resultados del estudio "Evaluación de la Huella Hídrica en la cuenca del río Porce". En dicho estudio (realizado con información secundaria) se analizaron 5 sectores: doméstico, hidroenergético, minero, agropecuario e industrial. La escala geográfica fue la cuenca hidrográfica del río Porce, se realizó un análisis de sostenibilidad ambiental donde se articularon aspectos ambientales, sociales y económicos, la información se recolectó para un periodo comprendido entre los años 2005 - 2011 con resolución temporal mensual y por último se realizó una priorización de proyectos de acuerdo con las problemáticas identificadas en la cuenca.

Como resultados generales en la cuenca del Porce, se identifica que no se tienen problemas por cantidad (la cuenca tiene suficiente cantidad de agua para abastecer los consumos de los sectores analizados). Se presentan problemas de calidad, principalmente en la parte alta de la cuenca donde está ubicado el Valle de Aburrá y donde se dan todos los sectores analizados con excepción de la generación de energía hidroeléctrica. En diferentes partes de la cuenca se identificó una competencia por el agua verde entre las zonas de protección ambiental y las áreas destinadas a actividades agropecuarias. Desde el punto de vista social se identificaron problemas en las coberturas de acueducto y alcantarillado principalmente en las zonas rurales y en los municipios más alejados del núcleo urbano conformado por el Valle de Aburrá. En el análisis económico, se identificó que actividades como la minera tienen un mayor rendimiento económico por m³ de agua consumida, pero los impactos ambientales que generan estas actividades y las condiciones sociales de las poblaciones donde se realiza dicha actividad no la hacen viable en términos de sostenibilidad bajo las condiciones actuales. La Huella Azul se estimó en 90,1 Mm³/año, la Huella Verde es de 697,1 Mm³/año y la Huella Gris se calculó en 15990 Mm³/año, esta última está dada principalmente por el sector doméstico e industrial.

PALABRAS CLAVES

Cuenca del río Porce, Huella Hídrica (azul, verde y gris), sectores económicos (doméstico, industrial, agropecuario, minero e hidroenergético)

ABSTRACT

The following paper aims to present the main results of the study "Evaluation of Water Footprint in Porce River Basin." In this study (conducted with secondary data) were analyzed five sectors: domestic, hydropower, mining, agricultural and industrial. The unit of analysis was the Porce River basin, it is an analysis of environmental sustainability which articulated environmental, social and economic. Information was collected for the period between the years 2005 - 2011 with monthly temporal resolution and finally there was a prioritization of projects according to the problems identified in the basin.

Porce basin is identified for not having problems of water (the basin have enough water to supply the consumption of the sectors analyzed), there are quality problems, mostly in the upper part of basin where is located the Valle de Aburrá and all sectors are analyzed except for hydropower generation. In different parts of the basin was identified competition for green water between those areas of environmental protection and the areas for agricultural activities. From the social perspective identified problems in the coverage of water supply and sewerage mainly in rural areas and municipalities farther from the urban core formed by the Valle de Aburrá. In the economic analysis, it was determined that as the mining activities have a higher economic return per m³ of water consumed, but the environmental consequences of these activities and the social conditions of the populations where such activity is carried out make it not viable in terms of sustainability under current conditions. Blue Footprint was estimated at 90.1 Mm³ per year, the Green Footprint is 697.1 Mm³ per year and Footprint Grey 15990 Mm³ per year was calculated, the latter is mainly given by the domestic and industrial sector.

KEYWORDS

Porce River Basin, Water Footprint (blue, Green and grey), economic sectors (domestic, industrial, agricultural, mining and hydropower)

INTRODUCCIÓN

Colombia siempre ha sido calificado como un país con abundantes recursos hídricos; Según la FAO (2013) ocupa el séptimo lugar en riqueza hídrica, sin embargo las diferentes actividades domésticas, industriales, entre otras, cada vez más han afectado la disponibilidad de este recurso. Como ejemplo de esta situación está la cuenca del río Aburrá, en dicha cuenca se tiene el segundo conglomerado urbano más importante de Colombia, un sector industrial consolidado y una actividad minera asociada a la extracción de materiales de construcción. Todas estas actividades han alterado considerablemente las condiciones de calidad del recurso hídrico, tal como lo demuestran los resultados obtenidos por la red de monitoreo del río Aburrá. De las ocho estaciones de medición en tres de ellas se presenta una calidad Mala y Regular y solamente en el nacimiento (Alto de San Miguel), se cuenta con una calidad Buena (Universidad de Antioquia, Universidad Nacional, Universidad de Medellín y Universidad Pontificia Bolivariana, 2011).

Esta situación ha generado el desarrollo de proyectos que evalúen diferentes indicadores ambientales que pretenden hacer un seguimiento al estado del recurso hídrico y cómo estos varían de acuerdo a las intervenciones que realizan las diferentes dependencias ambientales. Uno de estos indicadores es el de Huella Hídrica, el cual tiene como principal función cuantificar los consumos reales de agua ya sea en los procesos productivos, un producto, una comunidad o para un área geográfica, analizar el impacto ocasionado en las fuentes hídricas por los vertimientos y determinar las principales medidas de intervención para mejorar el estado del recurso hídrico.

El indicador de Huella Hídrica fue propuesto por Arjen Hoekstra y desarrollado en la Universidad de Twente (Holanda) donde se publicó la metodología para la evaluación de la Huella Hídrica (Hoekstra, Chapagain, Aldaya, & Mekonnen, 2011). La huella hídrica se compone a su vez de tres indicadores, cada uno representado por un color: azul, verde y gris.

86

La huella azul hace referencia al consumo de agua que proviene de fuentes superficiales o subterráneas, en el caso de la huella verde tiene como principal fuente la precipitación, una parte de esta se convierte en escorrentía superficial directa y otra parte se queda retenida en el suelo. El agua que queda retenida en el suelo y es aprovechada por las coberturas vegetales, es lo que se denomina huella verde. En el caso de la huella gris, ya no pretende cuantificar consumos de agua sino determinar el volumen teórico de agua necesario para asimilar la carga contaminante para mantener en condiciones aceptables la calidad de la fuente receptora del vertimiento Hoekstra et al (2011). Con estos tres indicadores se pretende dar a las entidades encargadas de los temas ambientales más herramientas para la toma de decisiones en beneficio de la gestión del recurso hídrico. Algunos estudios de huella hídrica son Cazcarro et al (2013), Vanham y Bidoglio (2013), Zeng, et al (2012), WWF (2012), Comisión Chile del Cobre (2010), otros estudios se pueden consultar en el link www.waterfootprint.org.

Desarrollo del tema

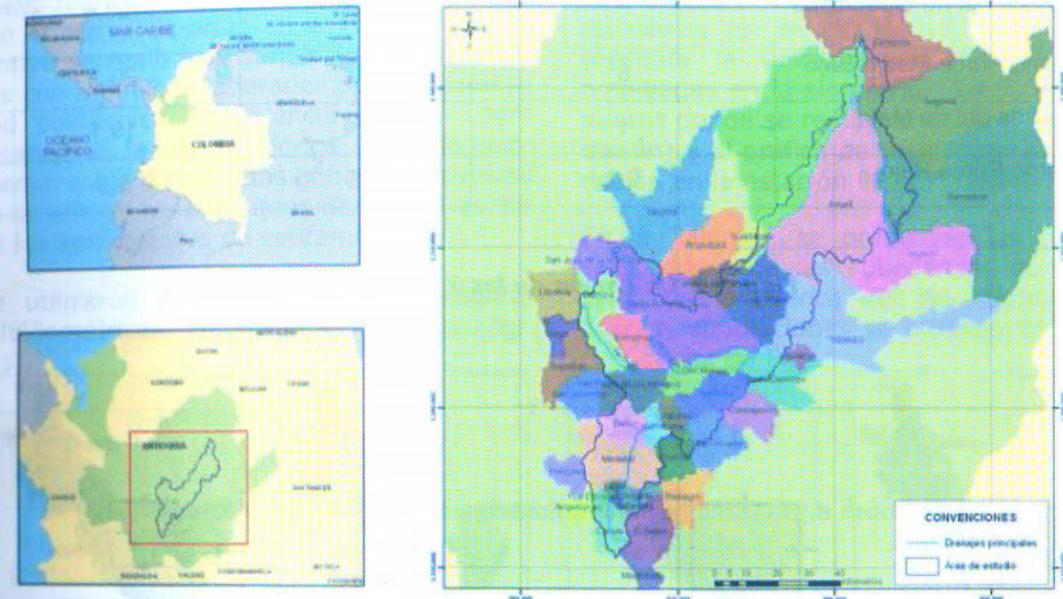
Para este estudio se definió como unidad de análisis la cuenca del río Porce, básicamente por tres razones:

- En el Estudio Nacional del Agua (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, 2010), se identificó que la cuenca del río Porce es la segunda más contaminada, únicamente superada por la cuenca del río Bogotá.
- En el estudio de Huella Hídrica del sector agrícola para Colombia, se estimó que la huella verde y gris son muy altas para esta cuenca (World Wildlife Fund for Nature, 2012).
- Es una cuenca que reúne diferentes sectores como el doméstico (cerca de 4 millones de habitantes), industrial (Medellín, Itagüí y Sabantea presentan el índice industrial más alto en Colombia),

agropecuario (20% de la producción lechera se genera en la cuenca), minería (oro y materiales de construcción) y cerca del 16% de la generación de energía hidroeléctrica se presenta en esta área (Corporación Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia, 2013)².

Todos estos elementos hacen que sea una cuenca de gran importancia no solo en términos ambientales sino también económicos para el desarrollo de Antioquia y Colombia. En la Figura 1, se presenta la ubicación de la cuenca del río Porce.

Figura 1. Ubicación geográfica de la cuenca del río Porce



Es importante mencionar que para el desarrollo de este proyecto, se contó con la participación de 16 entidades las cuales aportaron recursos y conocimiento, se destaca la presencia de las autoridades ambientales con jurisdicción en la cuenca (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, Corantioquia y Cornare), las universidades (Universidad de Medellín, Universidad Pontificia Bolivariana, Escuela de Ingeniería de Antioquia, Tecnológico de Antioquia y la Universidad de Antioquia), Empresas Públicas de Medellín,

Centro Nacional de Producción más Limpia, WWF Colombia, Good Staff International, COSUDE, Cátedra UNESCO, Secretaría de Medio Ambiente del municipio de Medellín y el CTA.

La base conceptual y metodológica para la estimación de la Huella Hídrica fue la propuesta por Hoekstra (2011). En la Tabla 3, se presentan los resultados de cada una de las siete subcuencas en que se dividió la cuenca del río Porce y en la Figura 3 la ubicación de las subcuencas objeto de análisis.

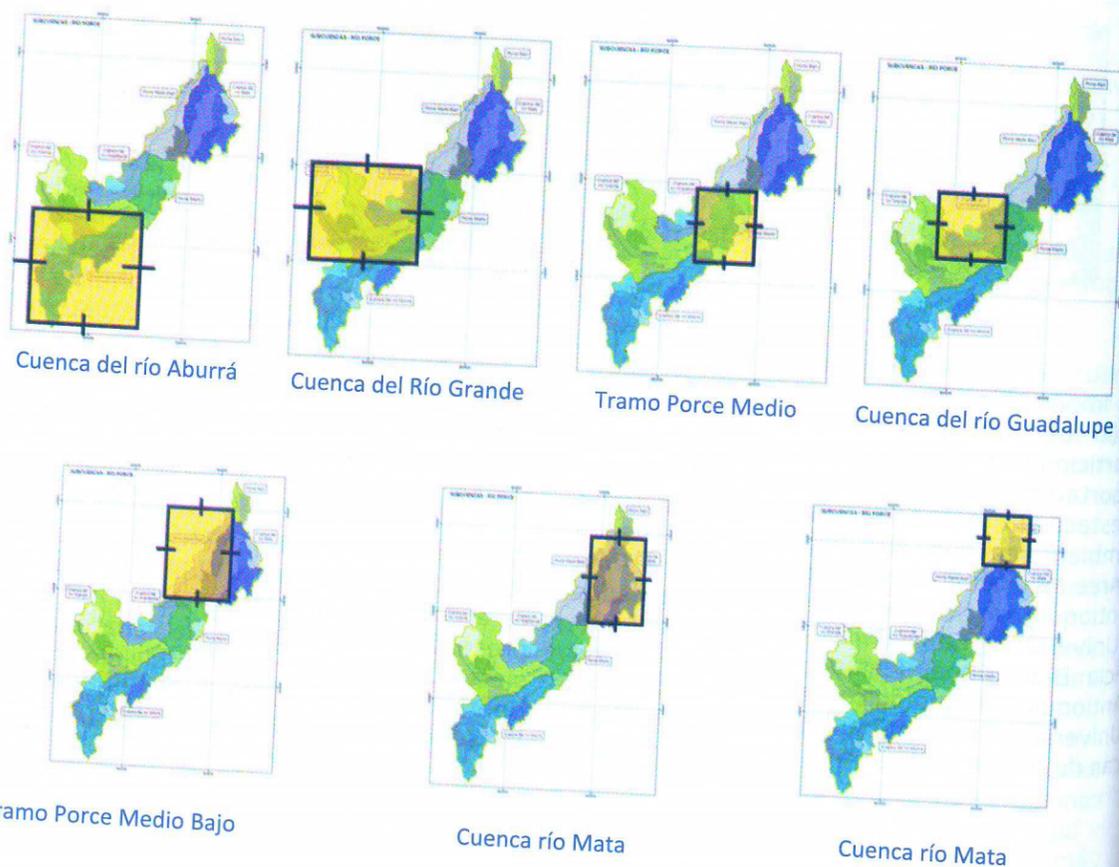
87

² En este link se puede ver un video con la descripción general de la cuenca del río Porce y del concepto de Huella hídrica

Tabla 2. Resultados de cuantificación por subcuenca

Subcuenca	Huella Azul Mm ³ /año	Huella Verde Mm ³ /año	Huella Gris Mm ³ /año
Cuenca del río Aburrá	47,5	282,6	15404
Cuenca del Río grande	19	169	467,1
Tramo Porce Medio	12	71	29,3
Cuenca del río Guadalupe	5	54	103,5
Tramo Porce Medio Bajo	6	43	20,3
Cuenca del río Mata	1	74	19,1
Tramo Porce Bajo	0,1	5	5,5

Figura 2. Ubicación de las 7 subcuencas



³ Para las simulaciones hidrológicas se utilizó el modelo TETIS (información sobre este modelo puede ser consultada en el siguiente link <http://www.iiama.upv.es/elementos/software/docs/9.pdf>). La información hidroclimatológica fue suministrada por Empresas Públicas de Medellín

Los resultados de la Tabla 3, indican que la huella hídrica azul y gris presenta los valores más altos en la parte alta de la cuenca, esto se explica por la presencia de los sectores industriales, agropecuario, doméstico y minero. En la parte media y baja de la cuenca la presencia de estos sectores disminuye su intensidad o no se presenta (con excepción del sector hidroenergético), por lo que las huellas no son tan representativas en la cuenca del río Porce.

Como complemento a la estimación de la huella hídrica, se compararon estos valores con la oferta de agua en la cuenca, por tal motivo se realizaron simulaciones hidrológicas con modelos elaborados por la Universidad politécnica de Valencia (2008) para determinar la oferta hídrica en cada subcuenca y analizar si estas tienen la capacidad de abastecer los consumos de agua y asimilar los vertimientos de contaminantes.

Se utilizaron 24 estaciones climatológicas (pluviométricas, limnigráficas y climatológicas),

el periodo de la información fue desde el año 2000 - 2010 con resolución temporal horaria. Se calibró y validó el modelo en dos puntos en la cuenca (estaciones Puente Gabino y PP7 Ermitaño). Además de la información climatológica se construyeron ocho mapas (formato ascii) para hacer las respectivas modelaciones, dichos mapas fueron:

modelo digital de elevación MDE, pendientes, red de drenaje, área acumulada, coberturas vegetales, conductividad hidráulica saturada del suelo, conductividad hidráulica saturada del sustrato del suelo y capacidad de almacenamiento. En la Figura 3 y Figura 4 se presenta la ubicación de las estaciones empleadas en la simulación (se resaltan los puntos donde se realizó la calibración y validación) y el gráfico de resultados de la validación en la estación PP7 Ermitaño.

En la Tabla 3, se presentan los caudales simulados para las subcuencas que hacen parte de la cuenca del río Aburrá. Estas mismas simulaciones se hicieron en toda la cuenca del río Porce.

Figura 3. Ubicación de las estaciones empleadas en la modelación

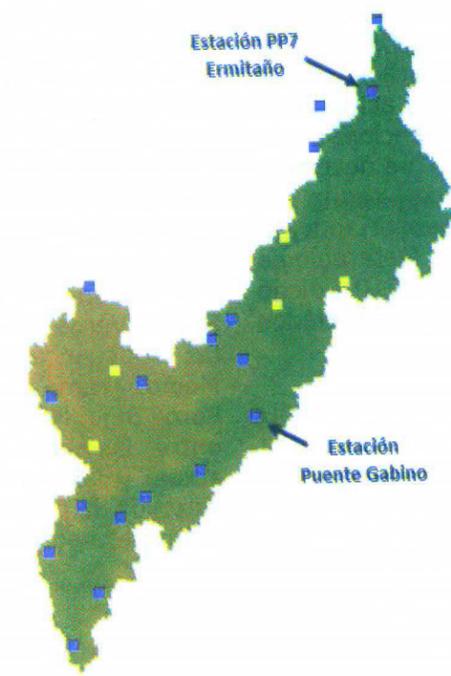


Figura 4. Resultados de validación en la estación PP7 Ermitaño para el periodo 2000 - 2011

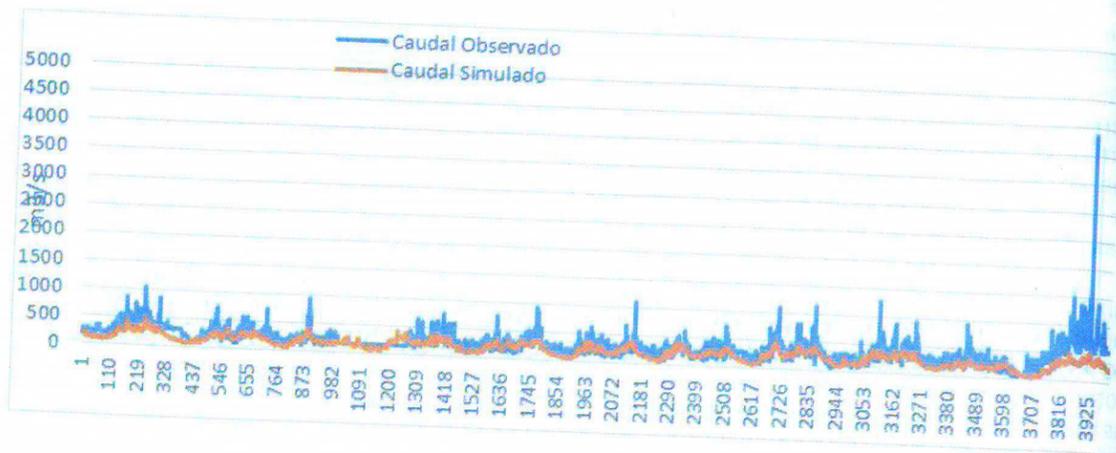


Tabla 3. Caudales mensuales simulados en las subcuencas del río Aburrá

CUENCA RÍO ABURRÁ (m ³ /año)					
Quebrada La García	Quebrada Doña María	Quebrada La Iguaná	Quebrada Piedras Blancas	Quebrada Santa Elena	Quebrada Ovejas
104,728,396	118,403,093	76,768,116	44,958,058	61,059,565	125,237,573

De forma general se identificó que todas las subcuencas que hacen parte de la cuenca del río Porce tienen la suficiente cantidad de agua para satisfacer los consumos. En la Figura 4, se presenta el caso de la cuenca del río Aburrá que es donde se ubica la mayor cantidad de población y diversas actividades económicas. Es importante mencionar que para estimar la oferta de agua fue necesario calcular el caudal ecológico según la metodología del Q95, propuesta por el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, 2010), dicho caudal se le restó a los caudales simulados por el modelo.

En el caso de la huella gris también se analizó si las subcuencas tienen la capacidad para asimilar la carga del contaminante crítico, solamente en la cuenca del río Aburrá y en el tramo Porce Medio antes del embalse de Porce II no tienen la suficiente capacidad para asimilar la carga contaminante

(en este tramo no se genera alta huella gris, esta situación se presenta por el arrastre de contaminantes proveniente de la parte alta de la cuenca), ratificando lo que han reportado estudios anteriores (Universidad de Antioquia, Universidad Nacional, Universidad de Medellín y Universidad Pontificia Bolivariana, 2011) sobre la mala calidad del agua en la cuenca del río Aburrá. En la Figura 5, se presentan los gráficos para estas dos subcuencas.

En relación al análisis de sostenibilidad de la Huella Verde, se identificaron problemas en las subcuencas del Aburrá, Tramo Porce Medio, Tramo Porce Medio Bajo, río Mata y Porce Bajo, lo que indica que hay un conflicto entre las áreas de protección ambiental actual y las que están proyectadas en los estudios de planificación con la expansión de la frontera agropecuaria (ver Figura 6).



Figura 4. Huella hídrica azul vs oferta de agua, subcuenca río Aburrá

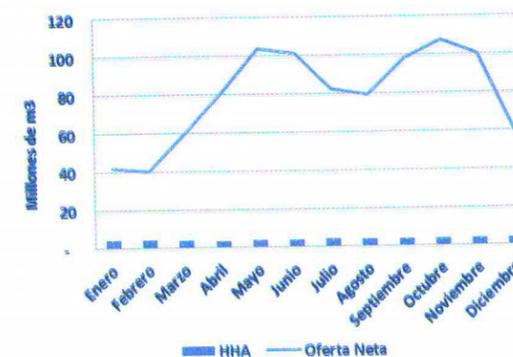
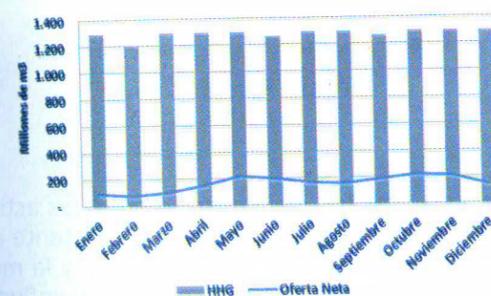
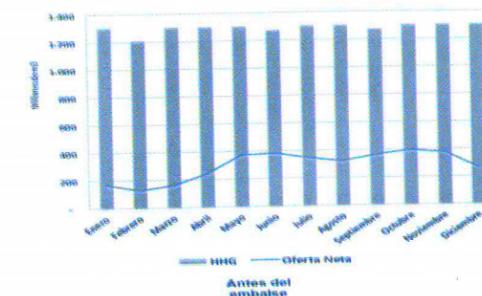


Figura 5. Huella hídrica gris vs Oferta de agua, subcuencas río Aburrá y tramos Porce Medio

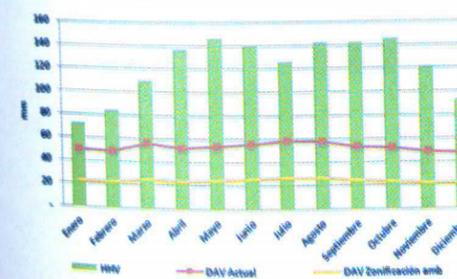


Cuenca del río Aburrá

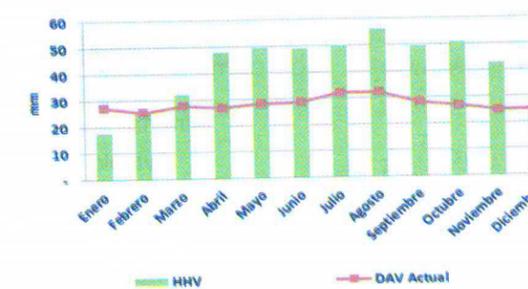


Tramo Porce Medio antes de embalse

Figura 6. Huella hídrica verde vs disponibilidad de agua verde, cuenca río Aburrá y río Mata



Cuenca río Aburrá

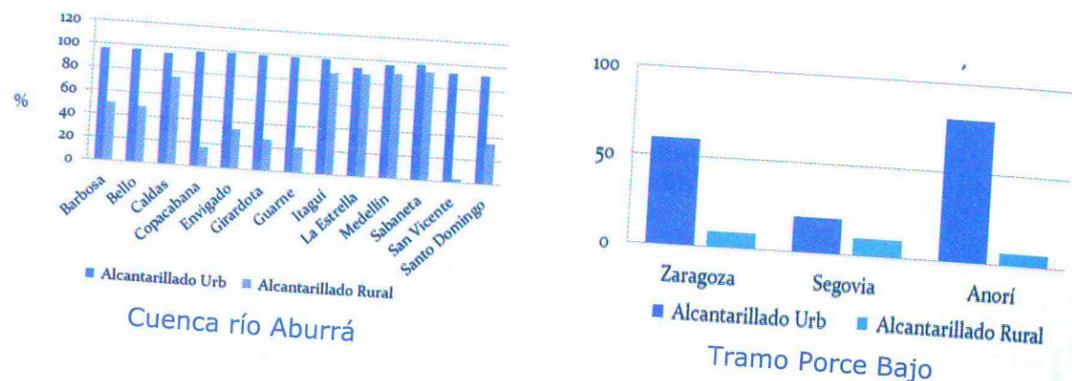


Cuenca río Mata

Para complementar el análisis de sostenibilidad desde una visión más compleja, se incluyeron los componentes social y económico, De la parte social se analizó si las siete subcuencas tenían la suficiente cantidad de agua para abastecer los consumos domésticos. Ninguna cuenca presentó problemas en este aspecto,

sin embargo al analizar las coberturas de acueductos y alcantarillados, se evidencia que en las zonas rurales es donde se presentan las menores coberturas y estas disminuyen en la medida que los municipios se alejan del núcleo del Valle de Aburrá. En la Figura 7, se observan las coberturas en algunos de los municipios que hacen parte de la cuenca.

Figura 7. Cobertura de alcantarillado urbano y rural, cuenca del río Aburrá y tramo Porce Bajo



En el componente económico, se aplicó el indicador de productividad aparente del agua azul y verde, este indicador analiza la rentabilidad de la actividad económica en relación al agua consumida (azul y verde).

Con este análisis se determinó que las actividades con mayor productividad aparente del agua (ver Tabla 4) son la industrial y la minería de oro, este último está muy influenciado por los precios internacionales.

Tabla 4. Resultados del indicador de productividad aparente del agua azul APW

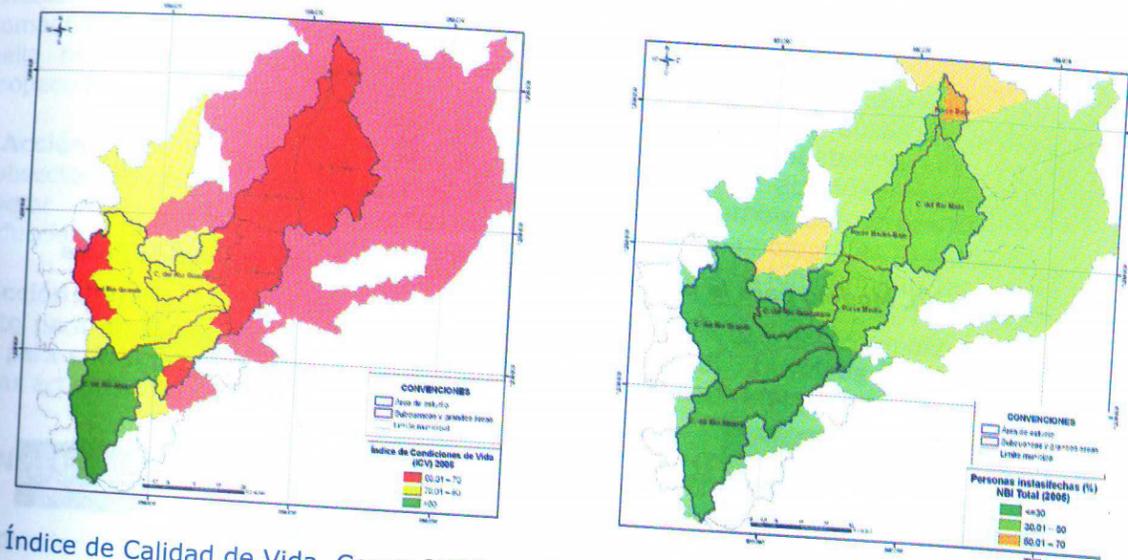
Sector	APW azul (USD\$/m3)
Industrial	1100
Minería de oro	470
Avícola	56
Porcino	44
Bovino	36
Minería arenas	10
Agrícola	4



Estos datos deben ser interpretados adecuadamente, ya que según los resultados se debería promover las actividades industrial y minera, sin embargo en la actividad minera (oro), hay que analizar otros componentes como el impacto ambiental que se generan en el beneficio del oro (uso de mercurio y cianuro) y las condiciones sociales donde se desarrolla dicha actividad, ya que en los municipios donde esta predomina tiene las condiciones sociales más desfavorables.

En la Figura 8, se observa que en los municipios con actividad minera (parte baja de la cuenca), las condiciones de ICV y NBI son las más críticas en la cuenca, lo que significa que actividades muy rentables desde el indicador de la Productividad Aparente del Agua no se reflejan en mejores condiciones sociales para las comunidades.

Figura 8. Condiciones sociales en la cuenca del río Porce



Índice de Calidad de Vida, Censo 2005

Necesidades Básicas Insatisfechas, Censo 2005

Después de tener un consolidado desde los componentes ambiental, social y económico, se identificaron y espacializaron los puntos críticos en la cuenca, dando como resultado el siguiente mapa (ver Figura 9).

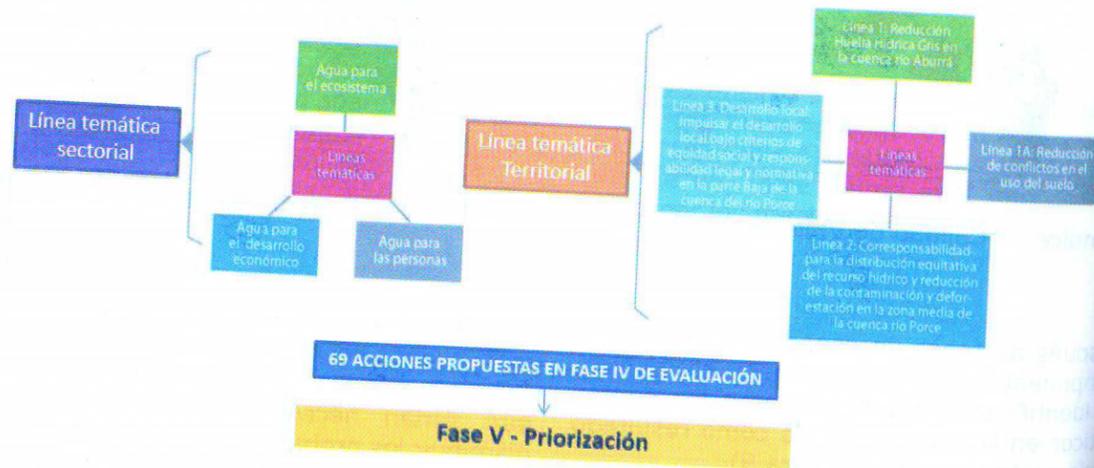
Partiendo de las zonas con mayor criticidad en la cuenca del río Porce se procedió a realizar una priorización de las intervenciones que serían necesarias implementar para disminuir los problemas en la cuenca o evitar que se presenten a futuro. En la Figura 10, se presenta el esquema general para definir los lineamientos de intervención en la cuenca.



Figura 9. Subcuencas con mayores puntos críticos



Figura 10. Modelo para la priorización de acciones en la cuenca del río Porcine



Como resultado del proceso de priorización realizado con todos los actores, se definieron 8 proyectos, los cuales están en proceso de formulación para buscar socios para su financiación. Las acciones priorizadas son:

- **Acción 6:** Programas de sensibilización sectoriales, con temáticas orientadas a la reducción, el control de la contaminación y la gestión de riesgos asociados.

- **Acción 26:** Formulación de un proyecto piloto para implementar sistemas alternativos para el tratamiento de aguas residuales domésticas en zonas rurales en los municipios con Alta huella gris per cápita.

- **Acción 18:** Proyecto piloto de reconversión tecnológica y procesos de producción más limpia dirigidos a empresas de explotación de materiales de construcción.

- **Acción 33:** Implementación de proyecto piloto en mejores prácticas ambientales para el proceso de extracción y beneficio del oro en Amalfi.

- **Acción 11:** Formular y diseñar un proyecto piloto de pago por servicios ambientales hídricos en una de las subcuencas priorizadas en la cuenca del río Porcine.

- **Acción 12:** Formular proyectos piloto de buenas prácticas ambientales y productivas agropecuarias en subcuencas priorizadas en la cuenca del río Porcine.

- **Acción 21:** Programa de capacitación y acompañamiento en la evaluación de la huella hídrica a los sectores económicos agropecuarios en el Valle de Aburrá.

- **Acción 13:** Proyecto piloto sectorial (Subsector priorizado de la industria) para superar meta de reducción establecida (reducción de carga contaminante vertida).

- **Acción 27:** Formulación de un proyecto piloto para implementar sistemas alternativos para el tratamiento de aguas residuales en las actividades pecuarias.

CONCLUSIONES

El indicador de huella hídrica permite:

- Determinar impactos sobre el recurso hídrico en términos sectoriales: los estudios que anteriormente se realizaban no identifican los sectores que están generando los mayores problemas en las cuencas, en este

caso se logró identificar cuáles sectores impactan y cómo estos a su vez pueden participar en la solución de los problemas.

- Complementar los análisis de oferta y demanda de agua que se realizan en los PIOM y los POMCA: los estudios de oferta y demanda no profundizan en los consumos, simplemente analizan cuánta agua se usa en determinada actividad, pero no tienen identificado cuánto de ese consumo puede retornar a la cuenca y en qué condiciones. Estos aspectos son un complemento muy importante para la toma de decisiones en la administración del recurso hídrico para las Autoridades Ambientales.

- Es una herramienta que permite identificar en qué áreas geográficas se puede estar presentando competencia por el recurso hídrico entre la actividad agropecuaria y la zonificación ambiental, lo que conlleva a las autoridades ambientales a establecer las áreas de protección definidas en los estudios.

- Permite realizar comparaciones entre sectores en términos de pérdida de disponibilidad real de agua (Cantidad y/o Calidad).

- Complementa los análisis de sostenibilidad del recurso al involucrar nuevos indicadores como la productividad aparente del agua (APW).

- Facilita la definición para las autoridades ambientales de las metas objetivo enfocadas a alcanzar condiciones óptimas de calidad de agua.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cazcarro, I., Hoekstra, A., & Sánchez, J. (2013). The water footprint of tourism in Spain. *Tourism Management*, 90 - 101.
- Comisión chilena del cobre. (2010). Consumo de agua en la minería del cobre 2009. Santiago de Chile.
- Corporación Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia. (29 de Octubre de 2013). Youtube. Obtenido de Youtube: <https://www.youtube.com/watch?v=ogesMMOIVfw>
- FAO. (29 de Octubre de 2013). Aguastat. Obtenido de Agustat: <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/main/index.stm>
- Hoekstra, A., Chapagain, A., Aldaya, M., & Mekonnen, M. (2011). The water footprint assessment manual, Setting de global standar. London: Earthscan.
- Instituto de Hidrología, Metereología y Estudios Ambientales IDEAM. (2010). Estudio Nacional del Agua . Bogotá.
- Universidad de Antioquia, Universidad Nacional, Universidad de Medellín y Universidad Pontificia Bolivariana. (2011). Red de monitoreo ambiental en la cuenca hidrográfica del río Aburrá en la jurisdicción del Área Metropolitana, FASE II. Medellín.
- Universidad Politécnica de Valencia. (2008). Descripción del modelo conceptual distribuido de simulación hidrológica TETIS v 7.3. Valencia.
- Universidad Politécnica de Valencia. (2008). Manual del Usuario Programa TETIS v. 7.3. Valencia.
- Vanham, D., & Bidoglio, G. (2013). A review on the indicator water footprint for the UE 28. *Ecological indicators*, 61 - 75.
- World Wildlife Fund for Nature. (2012). Una mirada a la agricultura de Colombia desde su huella hídrica. Bogotá.
- Zeng, Z., Liu, J., Koeneman, P., Zarate, E., & Hoekstra, A. (2012). Assessing water footprint at river basin level: a case study for the Heihe River Basin in northwest China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 71 - 81.

MODELIZACIÓN DISTRIBUIDA DEL CICLO DE SEDIMENTOS: APLICACIÓN AL ANÁLISIS DEL EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL ATERRAMIENTO DEL EMBALSE DE BARASONA(ESPAÑA)

Autores: - Gianbattista Bussi. - Candidato a doctor en Agua e Ingeniería Ambiental
Universidad Politécnica de Valencia
- Félix Francés G. - Doctor en Hidrología y Recursos Hídricos.
Universidad Politécnica de Valencia

Correo electrónico: gbussi@upvnet.upv.es; ffrances.hma.upv.es

RESUMEN

En este trabajo, el modelo distribuido del ciclo hidrológico y de sedimentos TETIS se ha aplicado a la cuenca del río Ésera (España) con el objetivo de analizar el efecto del cambio climático sobre la dinámica de los sedimentos. La cuenca estudiada presenta una elevada predisposición a la erosión del suelo por la presencia de suelos degradados. Las elevadas tasas de erosión y transporte de sedimentos se reflejan en altas tasas de sedimentación del embalse de Barasona, que drena la cuenca. Por esta razón, uno de los objetivos de este estudio es el análisis de las tendencias de las tasas de sedimentación del embalse bajo el efecto del cambio climático. La implementación del sub-modelo de sedimentos ha sido realizada utilizando como referencia los volúmenes de sedimentos depositados en el embalse y medidos a través de batimetrías. Para analizar los efectos del cambio climático, varias simulaciones del modelo previamente implementado han sido ejecutadas, usando como input de estas simulaciones escenarios regionalizados de cambio climático. Como resultado, se han generado series de caudal líquido y caudal sólido en la cuenca y se ha realizado una comparación con las series actuales. Los resultados muestran el efecto del cambio climático sobre la dinámica del transporte de sedimentos en la cuenca del río Ésera y las tasas de sedimentación del embalse de Barasona.

PALABRAS CLAVES

modelación distribuida, cambio climático, TETIS, sedimentación de embalse

ABSTRACT

In this study, the distributed hydrological and sedimentological model TETIS was applied to the Ésera River catchment (Spain). The aim of this study was analysing the effect of the climate change on the sediment cycle. The studied area is a highly erodible catchment due to extended badland zones within the catchment. This causes high sedimentation rates in the Barasona reservoir, located in the catchment outlet. For this reason, one of the aims of this study was analysing the climate change effect on the reservoir sedimentation rate. The TETIS sediment sub-model was implemented using reservoir bottom deposit volumes as a reference of the total sediment transport, measured through bathymetries. In order to analyse the climate change impacts, many model simulations were run, using regionalised scenarios as input. As a result, water and sediment daily discharge series were generated and compared with current series. The results show the effect of climate change on the sediment dynamic of the Ésera River catchment and on the Barasona reservoir sedimentation rate.

KEYWORDS

distributed modelling, climate change, TETIS, reservoir sedimentation

INTRODUCCIÓN

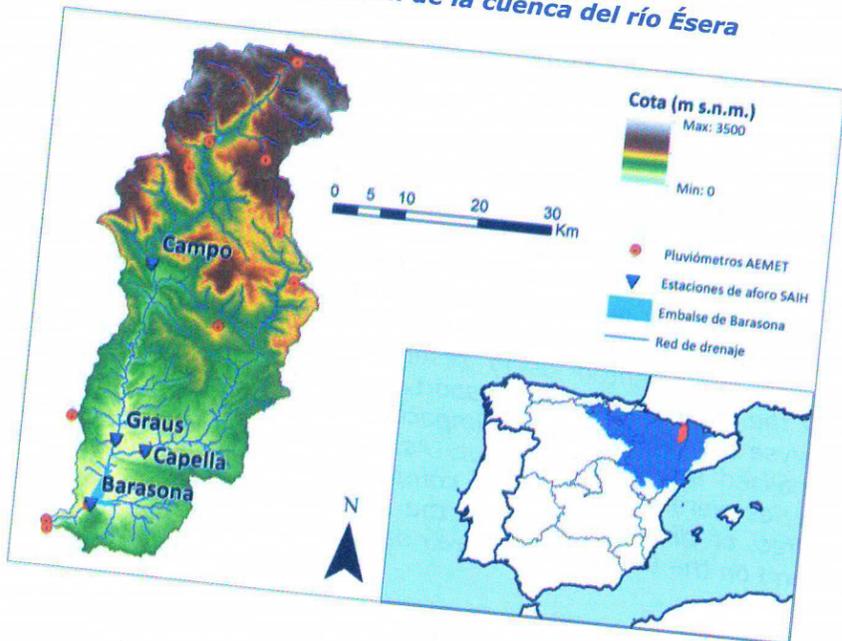
El análisis de los efectos del cambio climático sobre los recursos naturales ha sido, en las últimas décadas, uno de los principales objetivos de la investigación en ámbito medioambiental. En particular, resulta de especial interés conocer el efecto del cambio climático sobre el ciclo de sedimentos y la sedimentación de embalses, ya que la acumulación de material atrapado por las presas puede reducir sensiblemente la vida útil estimada de un embalse. La comunidad científica ha llegado en los últimos años a algunas conclusiones compartidas: por ejemplo, en áreas de la cuenca mediterránea la temperatura media tiende a incrementarse mientras que la precipitación media a disminuir (Giorgi and Lionello, 2008). También se prevé un aumento de las precipitaciones extremas y de los fenómenos torrenciales (Alpert et al., 2002). El impacto del cambio climático sobre los recursos hídricos, la erosión y el transporte de sedimentos también ha sido evaluado en distintos estudios, aunque, en la práctica aún resulta difícil de cuantificar.

Dada la gran complejidad de los fenómenos que dan origen al transporte de sedimentos y la dificultad de obtener datos medidos directamente para analizar el efecto del cambio climático, es indispensable utilizar la modelación distribuida como herramienta para afrontar este tipo de análisis.

En el presente trabajo, se pretende analizar el efecto del cambio climático sobre la erosión y el transporte de sedimentos de una cuenca altamente erosionable como la cuenca del Río Ésera (Pirineo Aragonés), y sus efectos sobre la sedimentación del embalse de Barasona, que drena la cuenca mencionada. Para ello se utilizará el modelo hidrológico y del ciclo de sedimentos TETIS (Francés et al., 2007; Bussi et al., 2013). El modelo será calibrado y validado para reproducir el comportamiento actual de la cuenca, y sucesivamente será utilizado para simular unos escenarios de cambio climático elaborados previamente por un modelo de circulación global regionalizado.

La cuenca de estudio

Figura 1. Localización de la cuenca del río Ésera



La cuenca del río Ésera se encuentra ubicada en el norte de la Península Ibérica, en el Pirineo Aragonés (Figura 1). Es una cuenca altamente erosionable, debido a la presencia de amplias zonas de suelos margosos degradados (badlands). La cuenca, de 1510 km², drena al embalse de Barasona, que, a demostración de las elevadas tasas de erosión de la cuenca, se encuentra parcialmente colmatado y ha sido sujeto a dragados y vaciados en varias ocasiones. La cuenca presenta elevados relieves, hasta 3300 m s.n.m., y fuertes pendientes en su cabecera, donde el paisaje es el típico de alta montaña, con frecuentes pastos y zonas de escasa vegetación, que dejan lugar a bosques de pino o matorrales en las zonas menos elevadas. En la parte intermedia de la cuenca son frecuentes las zonas cultivadas en secano, mientras que la cuenca baja es dominada por cultivos de regadío alternados con pequeñas zonas urbanas. El clima se caracteriza por una fuerte influencia mediterránea, con inviernos relativamente secos y episodios de precipitaciones torrenciales en verano. El régimen pluviométrico presenta máximos en primavera y otoño, mientras que el régimen hidrológico está influenciado por los procesos primaverales de fusión de nieve.

La cuenca está monitorizada por varios organismos, como la Agencia Estatal de Meteorología, el Sistema Automático de Información Hidrológica de la Confederación Hidrográfica del Ebro y el Centro de Estudios Hidrográficos del Centro de Estudios Experimentales (CEH-CEDEX). Además existen varias batimetrías del embalse de Barasona, entre las cuales se citan la de 1998, realizada por el CEDEX, y las de 2006 y 2007, realizadas por la Universidad de Lleida.

Implementación del modelo hidrológico

En el presente trabajo se ha implementado el modelo hidrológico y del ciclo de sedimentos TETIS en la cuenca del Río Ésera. El modelo TETIS es un modelo conceptual y distribuido desarrollado por la Universitat Politècnica de València y ampliamente utilizado en España y en otros países.

Dada la ausencia de registros de caudal sólido, el sub-modelo de sedimentos ha sido calibrado y validado para reproducir la evolución histórica de la capacidad del embalse de Barasona, conocida a través de las batimetrías (Figura 2). Para poder estimar el volumen de sedimentos depositados en el fondo del embalse, ha sido necesario tener en cuenta la densidad del material y su evolución temporal, así como la eficiencia de retención del embalse. La densidad del material se ha determinado utilizando las fórmulas de Miller (1953) y los coeficientes de Lane y Koelzer (1943) para depósitos casi siempre anegados.

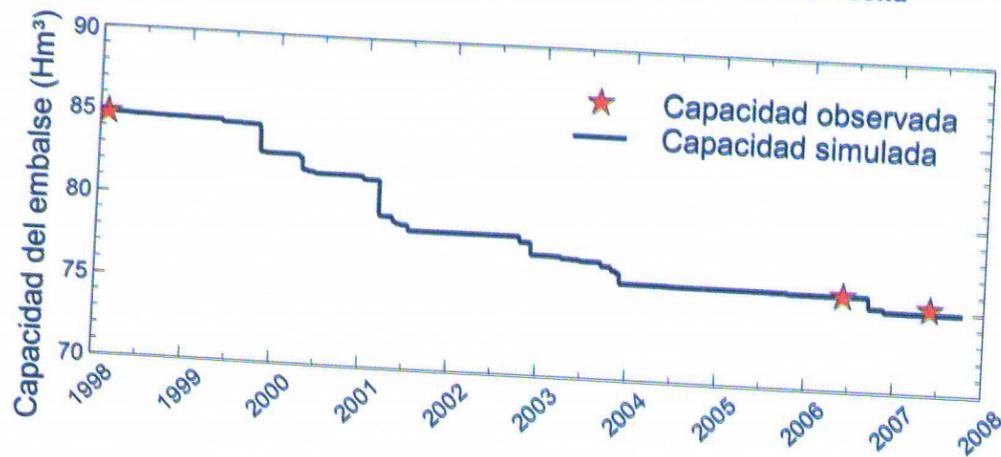
El sub-modelo hidrológico (Francés et al., 2007) está basado en una estructura de tanque, en la que todos los procesos que contribuyen a la formación de escorrente son representados por medio de ecuaciones sencillas y con pocos parámetros. El sub-modelo del ciclo de sedimentos (Bussi et al., 2013) está basado en el balance de disponibilidad de sedimentos y capacidad de transporte del flujo. Ésta se calcula a medio de la ecuación de Kilinc y Richardson modificada en caso de tratarse de capacidad de transporte en laderas, y con la ecuación de Engelund y Hansen en caso de cárcavas y canales.

El modelo TETIS ha sido implementado en la cuenca del Río Ésera. La información espacial para la caracterización de los suelos ha sido tomada de la base de datos europea de suelos (ESDB2, 2004), mientras que la información sobre el uso del suelo se ha obtenido del mapa CORINE Land Cover (Coordination of Information on the Environment). Los datos meteorológicos de input se han obtenido del conjunto de datos Spain02 formado por mapas de precipitación y temperatura diaria que cubren toda la península ibérica con resolución de 20x20 km y que van desde 1950 hasta 2008. El modelo ha sido calibrado en la estación de Capella desde 2005 hasta 2008 y validado en todas las otras estaciones (Graus, Campo y Embalse de Barasona) desde 1997 hasta 2008. Los resultados han sido satisfactorios, con un índice de Nash y Sutcliffe en calibración de 0.72 y en validación espacial-temporal en el embalse de Barasona de 0.71.

El proceso de consolidación de los sedimentos se ha reproducido calculando la densidad de los sedimentos depositados por cada año hidrológico, aumentando el valor de densidad año tras año a través de la misma fórmula de Miller. La eficiencia de retención se ha computado utilizando las curvas de Brune (1953), donde el término dependiente de la capacidad del embalse se ha hecho variar de forma dinámica en función de la cantidad de sedimentos depositados en el fondo del embalse.

Los resultados del sub-modelo de sedimentos también han sido satisfactorios, ya que, a pesar de la elevada incertidumbre en los procesos de sedimentos y en la medición de la capacidad de almacenamiento del embalse, el error en validación en el periodo 2006-2007 ha sido relativamente pequeño (-23%). Por lo tanto se puede considerar que el modelo hidrológico reproduce de forma satisfactoria los procesos de transformación precipitación - escorrentía, y los fenómenos de producción, transporte y deposición de sedimentos en la cuenca.

Figura 2. Evolución de la capacidad del embalse de Barasona



Escenarios de cambio climático

En este trabajo se plantea estimar el efecto del cambio climático sobre el ciclo de los sedimentos a través de la simulación de escenarios de precipitación y temperatura futuras. Numerosos estudios han sido realizados para determinar el efecto del cambio climático sobre precipitación y temperatura. En este trabajo se ha decidido utilizar los escenarios provenientes del proyecto PRUDENCE (Christensen et al., 2007). En este proyecto, distintos grupos de investigación europeos llevaron a cabo simulaciones con modelos de circulación global y modelos climáticos regionales para obtener campos espacialmente distribuidos sobre todo el territorio europeo de distintas variables meteorológicas,

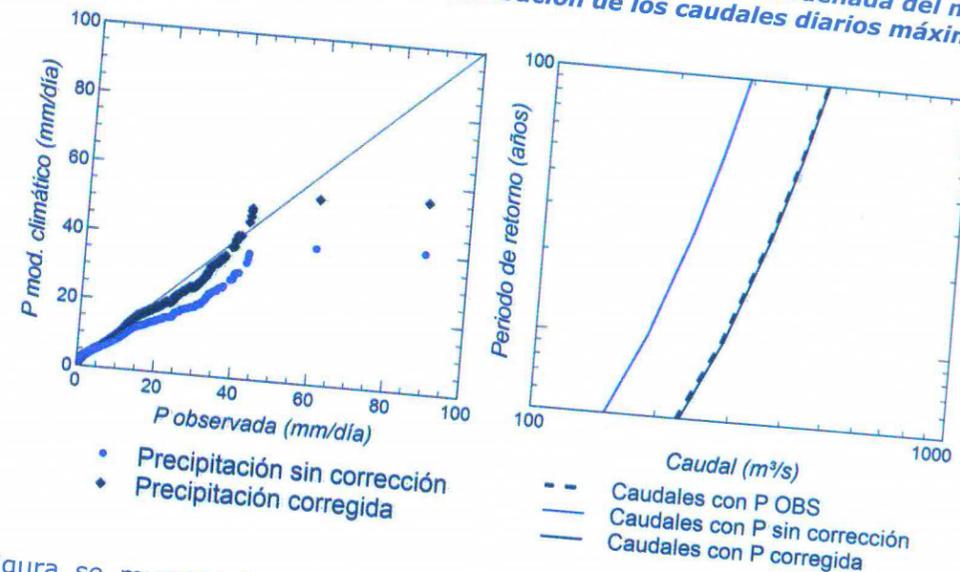
como precipitación y temperaturas, con resolución de 50x50 km. Estas simulaciones se realizaron, en un primer momento, bajo condiciones atmosféricas y de emisión de CO2 iguales a las actuales, para obtener una serie de referencia (también llamada "periodo de control", que va de 1961 a 1990), y también bajo condiciones de emisión creciente de CO2, específicamente bajo los escenarios de emisión A2 y B2 como definido por el SRES (Special Report on Emissions Scenarios), que indican dos posibles evoluciones socioeconómicas del planeta (de 2071 a 2100, siendo A2 la previsión más pesimista y B2 la menos pesimista).



Entre los posibles resultados de modelos climáticos, y tras un análisis de las prestaciones de varios modelos en la cuenca de estudio, se decidió emplear los resultados elaborados por el Centro Nacional de Meteorología francés (CNRM), obtenidos con el modelo global HadAM3 y el modelo regional ARPEGE. Este modelo, como todos los modelos climáticos, proporciona campos de precipitación diaria que pueden contener una distorsión importante con respecto a la precipitación observada,

debido a errores en los modelos y a la escala de trabajo bastante gruesa. Por lo tanto es necesario corregir esta desviación, como indicado en distintos estudios (por ejemplo, Déqué, 2007). En el caso de la cuenca del Río Ésera, se observa que la precipitación elaborada por el modelo climático ARPEGE infravalora la precipitación observada, especialmente los valores más elevados, como se muestra en la Figura 3, izquierda (serie "precipitación sin corrección").

Figura 3. Corrección del error en la precipitación del modelo climático ARPEGE. Izquierda: precipitación ordenada observada vs precipitación ordenada del modelo climático. Derecha: funciones de distribución de los caudales diarios máximos.



En esta figura se muestra la precipitación ordenada observada en el eje x y la precipitación ordenada del modelo climático, en el eje y, donde por precipitación ordenada se entiende la serie de todos los valores de precipitación diaria ordenados en sentido decrecientes. Este gráfico se utiliza para evaluar el comportamiento global de la población de precipitación diaria modelada frente a la observada. Se ha aplicado por lo tanto una corrección de tipo lineal sobre la precipitación del modelo climático, con el objetivo de obtener una función de precipitación observada ordenada vs precipitación climática ordenada con la menor desviación posible con respecto a la recta 1:1, obteniendo la serie que se muestra en la Figura 3, izquierda (serie "precipitación corregida").

La corrección de la precipitación ha sido también validada en términos de su efecto sobre los caudales: se ha utilizado la precipitación corregida como input del modelo TETIS y se ha determinado la serie de caudales resultantes, comparando la función de distribución de los máximos diarios resultante de este proceso de modelación con la resultante del modelo TETIS alimentado con precipitación observada. Los resultados se muestran en la Figura 3, derecha. Se observa que la función de distribución de los caudales calculados con la precipitación corregida coincide con la función de distribución determinada a partir de los caudales modelados con la precipitación observada.



Resultados y discusión

La corrección de la precipitación ha sido aplicada a todos los escenarios de precipitación obtenidos por el modelo climático: el periodo de control (1961-1990), el escenario A2 (2071-2100, escenario más pesimista) y el escenario B2 (2071-2100, escenario menos pesimista). Después, el modelo TETIS ha sido utilizado para obtener series de precipitación y temperatura promedio en la cuenca,

caudal líquido y sólido vertiente al embalse de Barasona, humedad del suelo promedio en la cuenca y altura equivalente del manto de nieve promedio en la cuenca para cada uno de los escenarios mencionados anteriormente. Estos resultados se presentan a continuación.

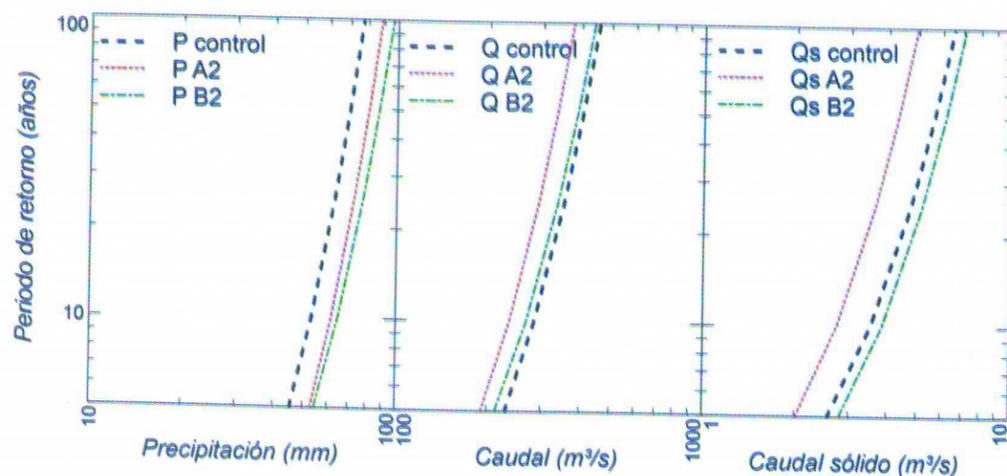
Tabla 1. Resultados de la modelación de los escenarios de cambio climático (valores promedios)

Variable	Periodo de control	Escenario A2	Escenario B2	Variación A2	Variación B2
Precipitación (mm/año)	655	571	581	-13%	-11%
Temperatura media (°C)	6.9	10.7	9.7	-	-
Saturación del suelo (%)	66%	50%	52%	-25%	-21%
Manto de nieve (mm eq.)	0.573	0.288	0.334	-50%	-42%
Aportación líquida (Hm ³ /año)	594	372	395	-37%	-33%
Aportación sólida (ton/ha/año)	5.23	3.09	6.38	-41%	+22%

En la Tabla 1 se muestran los valores promedios resultantes del análisis del efecto del cambio climático. Como se puede observar, la precipitación tiende a disminuir y la temperatura a aumentar, provocando una disminución de la humedad del suelo y del manto de nieve. Esto se refleja en una disminución de las aportaciones líquidas.

Sin embargo, el efecto en las aportaciones sólidas no es proporcional al efecto sobre los caudales líquidos, ya que se observa que en el caso del escenario A2 la aportación específica de sedimentos disminuye, mientras que en el caso del escenario B2 aumenta.

Figura 4. Funciones de distribución (Gumbel) de los máximos anuales de precipitación diaria, caudal diario y caudal sólido diario. Comparación entre periodo de control y escenarios de cambio climático



Dada la relevancia de los fenómenos de precipitación extrema para la movilización de los sedimentos, también se ha realizado un análisis de los valores extremos (máximos anuales) de precipitación, caudal líquido y caudal sólido, ajustando una función de distribución tipo Gumbel por cada una de estas variables (Figura 4).

Los resultados muestran comportamientos distintos en cuanto a lo observado en los resultados expuestos en la Figura 4. Los valores extremos de la precipitación tienden a aumentar, especialmente para el escenario B2, que a pesar de ser un escenario intermedio, presenta los valores extremos de precipitación más altos. Por el contrario, los valores extremos del caudal tienden a disminuir, probablemente porque el aumento de la torrencialidad de la precipitación no compensa la disminución de la humedad del suelo. Sin embargo, el transporte de sedimentos presenta un comportamiento aparentemente contradictorio, dado que los valores extremos del escenario A2 disminuyen y los del escenario B2 aumentan en comparación al periodo de control, confirmando el comportamiento observado en la Tabla 1. Esto indica, como es de esperar, que los valores extremos de transporte de sedimentos (es decir el transporte de material debido a los eventos de magnitud muy elevada) influyen fuertemente la aportación específica total, dado que son responsables de un gran porcentaje de la misma. Para poder cuantificar este fenómeno, y analizar posibles cambios, se ha determinado la contribución al total del transporte de sedimentos de los n-eventos más grandes de la serie. Específicamente, se ha determinado que los cinco eventos más grandes son responsables del 38.8% del transporte total para el periodo de control, del 38.9% para el escenario A2 y del 53.2% para el escenario B2, mientras que los 10 eventos más grandes son responsables respectivamente de 51.5%, 52.6% y 65.7% del total de material transportado al desagüe de la cuenca. Se confirma que, para el escenario B2, los resultados del modelo proponen un aumento de la relevancia de los eventos extremos en el total de transporte de sedimentos. Por el contrario, para el escenario A2 no se observa un cambio relevante en la contribución de los eventos extremos al total del transporte.

Estas consideraciones, unidas al comportamiento de las funciones de distribución, sugieren que, en el caso del escenario B2, la disminución de la aportación líquida y del caudal pico de los eventos de inundación no es suficiente para compensar el aumento de torrencialidad, que conlleva un aumento del número de grandes eventos de movilización de sedimentos y, en consecuencia, el transporte total. En el caso del escenario A2, el aumento de las precipitaciones extremas es inferior y la disminución del valor total superior, y por lo tanto el régimen hidrológico resultante tiende a mostrar caudales pico de agua y sedimentos inferiores a los del periodo de control.

En este estudio también se ha analizado la variación espacial de la erosión de suelo. En la Figura 5 se muestran los resultados del modelo en términos de erosión del suelo bajo distintos escenarios (diferencia entre control y A2/B2). Se observa que las zonas más afectadas se encuentran sobre todo en la franja central de la cuenca, en un área que presenta elevada degradación de suelo en la actualidad; se prevé un aumento de la extensión de esta zona en el escenario B2 y una disminución en el escenario A2.

Como se ha especificado anteriormente, el objetivo principal de este estudio es analizar el efecto del cambio climático sobre el aterramiento del embalse de Barasona. La capacidad de almacenamiento del Embalse ha sido calculada utilizando como caudal líquido y sólido entrante el caudal suministrado por el modelo TETIS, mientras que la densidad de los sedimentos y la eficiencia de retención han sido estimadas como expuesto previamente, en la sección de implementación del modelo.

Para poder computar la vida útil prevista del embalse, es necesario simular más de los 30 años de series alteradas por el cambio climático a disposición en este estudio. Por lo tanto, se han encadenado varias simulaciones del mismo input meteorológico repetido, hasta alcanzar una capacidad de embalse igual al 10% de la capacidad original, por lo que se considera que el embalse ha perdido su funcionalidad. Los resultados se muestran en la Figura 6.



Figura 5. Variación de la diferencia con el periodo de control de erosión de suelos en el espacio

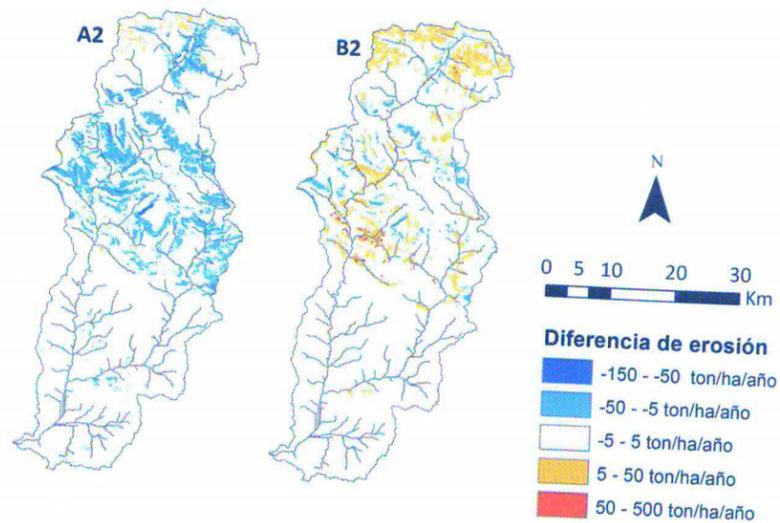
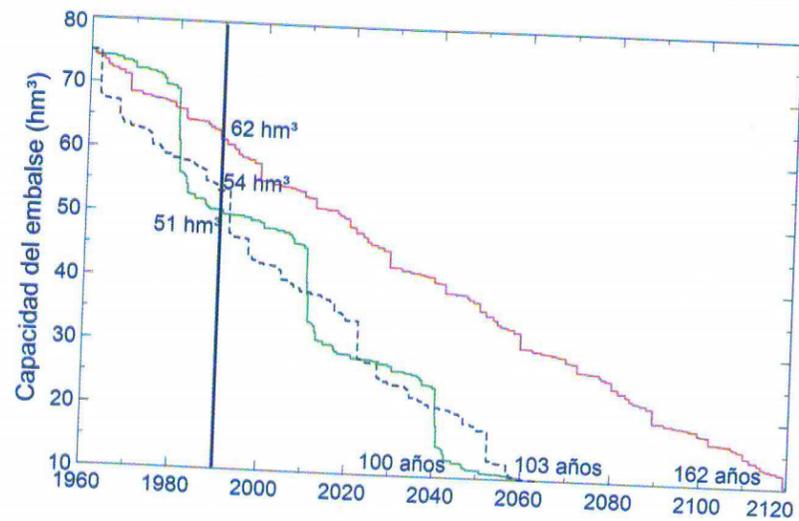


Figura 6. Evolución de la capacidad de almacenamiento del embalse de Barasona bajo distintos escenarios de cambio climático



La evolución de la capacidad de embalse sugiere que el embalse de Barasona debería perder 21 hm³ en 30 años en condiciones climáticas actuales (escenario de control), 13 hm³ bajo el escenario A2 y 24 hm³ bajo el escenario B2. Esto se traduce en tasas de sedimentación promedio de 0.71, 0.45 y 0.81 hm³ respectivamente. Como se puede observar en la Figura 6, el escenario A2 proporciona una tasa de sedimentación inferior a la del periodo de control, mientras que la tasa del escenario B2 es similar a la del periodo de control. Este efecto se observa también en la vida útil del embalse,

ya que en el escenario de control y en el escenario B2 se estima una vida útil de aproximadamente 100 años, mientras que en el escenario A2 la vida útil estimada se extiende hasta 162. Sin embargo, también se observa un cambio de régimen, ya que la evolución de la capacidad de embalse en el escenario B2 muestra que las pérdidas de capacidad se concentran en pocos grandes eventos. En concreto, los 10 mayores eventos suministran el 56%, 57% y 66% del total de sedimentos depositados (escenario de control, A2, y B2 respectivamente), mientras que los 20 mayores eventos aportan el 64%, 71% y 78%.

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado una aplicación del modelo hidrológico y de sedimentos TETIS para determinar el efecto del cambio climático sobre el ciclo de agua y sedimentos en la cuenca del río Ésera (Pirineo Aragonés). Tras elegir los escenarios de precipitación y temperatura (escenarios de emisión A2 y B2 - un escenario más pesimista y uno menos pesimista respectivamente - obtenidos a través del acople de los modelos climáticos HadAM3 y ARPEGE) y corregir el error en los mapas de precipitación proporcionados por el modelo climático, se han analizado las evoluciones y tendencias futuras de distintas variables relacionadas con el transporte de sedimentos. Se puede concluir que la precipitación media de la cuenca del Río Ésera tiende a disminuir, aunque las tendencias indican un aumento de su torrencialidad, de forma similar a lo que se prevé para toda la zona mediterránea (Alpert et al., 2002), siendo el escenario B2 más torrencial que el A2. La aportación líquida total también disminuye, debido a la disminución de la precipitación media y,

al añadirse una mayor evapotranspiración potencial, de la humedad media del suelo. Sin embargo, a pesar de la tendencia de la precipitación a eventos extremos de magnitud superior, los resultados del modelo indican que los valores extremos de caudal también tienden a disminuir, de forma más pronunciada para el escenario A2 que para el escenario B2, probablemente debido a la gran disminución en la humedad del suelo ya mencionada. Por el contrario, el transporte de sedimentos tiende a disminuir para el escenario A2 y a aumentar para el escenario B2 (respectivamente 3.09 t/ha/año y 6.38 t/ha/año frente a 5.23 t/ha/año en el periodo de control). Esto se refleja en las tasas de sedimentación del embalse de Barasona en que, para el escenario B2, no se prevén modificaciones relevantes con respecto al escenario de control (vida útil esperada aproximadamente 100 años), mientras que para el escenario A2 se espera una vida útil significativamente más larga (aproximadamente 160 años).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alpert, P. et al. (2002), The paradoxical increase of Mediterranean extreme daily rainfall in spite of decrease in total values, *Geophys. Res. Lett.*, 29(11), 1536, doi:10.1029/2001GL013554.
- Brune, G. M. (1953), Trap efficiency of reservoirs, *Trans. AGU*, 34(3), 407-418.
- Bussi, G., X. Rodríguez-Lloveras, F. Francés, G. Benito, Y. Sánchez-Moya, and A. Sopeña (2013), Sediment yield model implementation based on check dam infill stratigraphy in a semiarid Mediterranean catchment, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17(8), 3339-3354, doi:10.5194/hess-17-3339-2013.
- Christensen, J. H., T. R. Carter, M. Rummukainen, and G. Amanatidis (2007), Evaluating the performance and utility of regional climate models: the PRUDENCE project, *Clim. Change*, 81(S1), 1-6, doi:10.1007/s10584-006-9211-6.
- Déqué, M. (2007), Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: Model results and statistical correction according to observed values, *Glob. Planet. Change*, 57(1-2), 16-26, doi:10.1016/j.gloplacha.2006.11.030.

ESDB2 (2004), The European Soil Database distribution version 2.0, European Commission and the European Soil Bureau Network, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.

Francés, F., J. I. Vélez, and J. J. Vélez (2007), Split-parameter structure for the automatic calibration of distributed hydrological models, *J. Hydrol.*, 332(1-2), 226-240, doi:10.1016/j.jhydrol.2006.06.032.

Giorgi, F., and P. Lionello (2008), Climate change projections for the Mediterranean region, *Glob. Planet. Change*, 63(2-3), 90-104, doi:10.1016/j.gloplacha.2007.09.005.

Herrera, S., J. M. Gutiérrez, R. Ancell, M. R. Pons, M. D. Frías, and J. Fernández (2010), Development and analysis of a 50-year high-resolution daily gridded precipitation dataset over Spain (Spain02), *Int. J. Climatol.*, 32, 74-85, doi:10.1002/joc.2256.

Lane, E. W., and V. A. Koelzer (1943), Density of sediments deposited in reservoirs, Rep. No. 9 a Study Methods Used Meas. Anal. Sediment Loads Streams.

Miller, C. R. (1953), Determination of the unit weight of sediment for use in sediment volume computations. Memorandum., Denver, CO.

ESTUDIOS DE RIESGOS HIDROLÓGICOS BAJO CAMBIO CLIMÁTICO EN EL MARCO DE LA INICIATIVA CES. EL CASO DE TRUJILLO, PERÚ

Autores: Eduardo García Alonso, Cristina Prieto, César Álvarez, Fernando Méndez, Óscar Aguilar, Íñigo Losada
Instituto de Hidráulica Ambiental "IH Cantabria", Universidad de Cantabria

Correo electrónico: edelwar@gmail.com

RESUMEN

Dentro de la iniciativa de "Ciudades Emergentes y Sostenibles" promovida por el Banco Inter-Americano de Desarrollo (BID) [1], se están evaluando los riesgos por fenómenos naturales en varias ciudades de Latinoamérica y Caribe, incluyendo el efecto del cambio climático. Entre ellas, Trujillo al norte de Perú fue una de las primeras seleccionadas [2]. El estudio realizado por IH Cantabria incluyó el análisis combinado de los fenómenos de erosión e inundación costera, inundación por tsunami e inundación por desbordamiento de ríos y quebradas. Este artículo se centrará en el apartado de riesgos hidrológicos, concretamente en cómo integrar la parte de vulnerabilidad con la de peligrosidad para evaluar los riesgos asociados a las inundaciones de forma global.

PALABRAS CLAVES

riesgos naturales, vulnerabilidad, peligrosidad, cambio climático, erosión, inundación

ABSTRACT

Within the Emerging and Sustainable Cities Initiative (ESCI), which is promoted by the Inter-American Development Bank (IDB), natural hazards are being evaluated in several cities in Latin America and the Caribbean, including the effect of climate change. Among them, Trujillo in northern Peru was one of the first to be selected. The risk assessment in this case was done by IH Cantabria from Spain, including the combined analysis of coastal erosion and flooding phenomena, tsunami effects and flooding due to rivers and creeks. This article will focus on the section of hydrological risks, specifically on how to integrate the vulnerability with the hazard to assess the risks associated with flooding in a comprehensive way.

KEYWORDS

natural hazards, vulnerability, hazard, climate change, erosion, flood

INTRODUCCIÓN

En el marco de la iniciativa de "Ciudades Emergentes y Sostenibles" impulsada por el Banco Inter-Americano de Desarrollo (BID), actualmente se están analizando los riesgos por fenómenos naturales en varias ciudades de Latinoamérica y el Caribe, incluyendo el efecto potencial del cambio climático. Uno de los primeros lugares seleccionados para esta plataforma ha sido la ciudad de Trujillo en el norte de Perú, con una población cercana al millón de habitantes e importante crecimiento en las últimas décadas. Este artículo se centra en describir el apartado de riesgos hidrológicos, que posee las siguientes particularidades:

- Régimen de precipitación muy seco, gobernado por el fenómeno de El Niño y con baja disponibilidad de registros históricos.
- Escasez de datos para caracterizar la magnitud de eventos históricos extremos, con la incertidumbre que conlleva extrapolar a zonas áridas métodos hidrológicos convencionales
- Combinación de inundación de zonas rurales y semipobladas con inundaciones urbanas en zonas de alta densidad de edificación.
- Necesidad de modelar hidráulicamente un conjunto de quebradas de cauce difuso y cambiante, difíciles de identificar por criterios geomorfológicos.

Teniendo en cuenta estos factores, se obtuvo la peligrosidad de la zona de estudio empleando técnicas de "downscaling" estadístico para las proyecciones de cambio climático y modelos bidimensionales de flujo para el cálculo de los calados y velocidades. Para la determinación de los caudales de diseño para las numerosas quebradas, todas ellas de cuenca inferior a 100 km² y no instrumentadas, se ha propuesto, basándose en la literatura y en criterio de experto, un método racional modificado que incluye las pérdidas en cauce como un factor que minorra el coeficiente de escorrentía del método racional estándar. Para el modelado del flujo de las quebradas en zonas de baja densidad urbana se ha empleado el modelo bidimensional SRH-2D del Bureau of Reclamation de EEUU, mientras que para la zona central de Trujillo se aplicó el modelo, también en dos dimensiones, RFSM-EDA elaborado conjuntamente por HR Wallingford e IH Cantabria.

De forma simultánea con los estudios climáticos y de peligrosidad, se llevaron a cabo estudios para caracterizar de manera exhaustiva los rasgos socioeconómicos y demográficos del territorio, obteniéndose la vulnerabilidad de la ciudad frente a inundaciones a través de una combinación de indicadores. En concreto, se hizo un esfuerzo especial en clasificar los tipos de viviendas, manzana a manzana, según sus propiedades estructurales; asimismo, se determinó la densidad de población por zonas, así como otras variables como el nivel de escolarización, la integración de la mujer en la sociedad y los niveles de renta por manzanas.

Una vez determinada la peligrosidad para diferentes eventos con diversas probabilidades de ocurrencia, tanto en situación actual como bajo escenarios de cambio climático, y caracterizada la vulnerabilidad de la zona de estudio, se procedió a combinar los dos tipos de información para confeccionar mapas de riesgo e indicadores agregados. Para estos últimos se obtuvieron los siguientes valores:

- Personas afectadas por inundaciones: Entre 10000 y 18000 personas por eventos de 25 y 100 años de periodo de retorno (escenario climático actual), respectivamente.

- Fallecidos o heridos graves por inundaciones: 0.4 personas por año y por millón de habitantes.

- Daños económicos directos: entre 11 y 21 millones de \$ (de 2012) en eventos de 25 a 100 años de periodo de recurrencia.

- Pérdida de bienestar asociada a inundaciones: las personas más desfavorecidas reciben un 60% del impacto total en términos de pérdida de poder adquisitivo, aunque sólo aportan el 40% de pérdidas materiales.

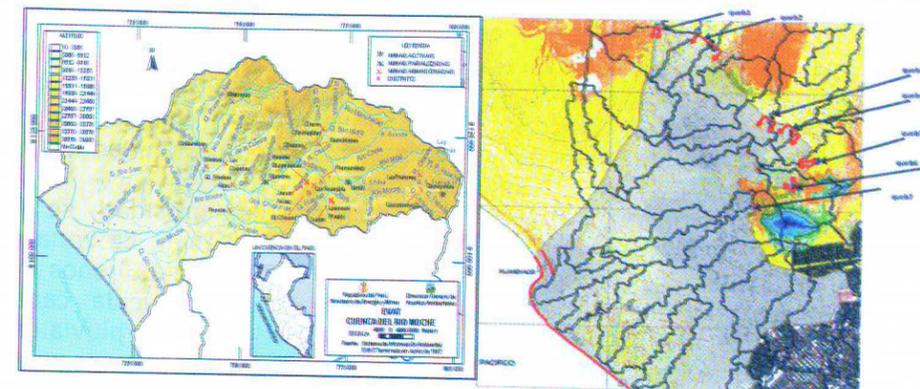
En última instancia se propone una batería de medidas estructurales y de gestión para reducir los problemas detectados y promover un crecimiento más sostenible de la ciudad en el futuro.

DESCRIPCIÓN HIDROLÓGICA Y CÁLCULO DE PELIGROSIDAD.

La Provincia de Trujillo se encuentra en una llanura costera a una altitud de 34 msnm. Los barrios más al norte (Laredo, El Porvenir y El Milagro), están a una cota superior a 100 msnm y las zonas litorales (Salaverry, Las Delicias, Buenos Aires y Huanchaco), a unos 3 msnm. El resto de los barrios, incluyendo el centro histórico, se sitúan en altitudes intermedias.

El único río importante en la zona de estudio es el Moche (Imagen izquierda de la figura 1), al sur de la ciudad (Sector Sur), que con una pendiente media del 4% drena una cuenca de 1864 km² hasta Quirihuaca, donde se dispone de un punto de aforo. El resto de las zonas reciben quebradas de escasa cuenca, pero que esporádicamente producen caudales elevados. De ellas, se han identificado 8 principales (Imagen derecha de la figura 1): 7 pertenecientes a El Milagro y Huanchaco (Sector Norte) y 1 en la parte alta de la ciudad de Trujillo (Sector Centro). Las primeras son La Cumbre (queb1), El León (queb2, queb3), Río Seco (unión de La Cumbre y El León), La Encantada (queb4, queb5 y queb6) y San Carlos (queb7); y la última la quebrada de San Ildefonso.

Figura 1. Cuenca del río Moche (izquierda) y quebradas identificadas en la zona de estudio (derecha).



La zona de estudio presenta un clima árido con escasas precipitaciones anuales y muy ligadas al fenómeno de El Niño, por lo cual la cantidad de eventos para calibrar modelos hidrológicos es muy escasa; por otra parte, la hidrología de zonas áridas es una de las ramas más jóvenes y complejas de esta ciencia.

Con esto presente, en la Tabla 1 se resume la metodología seguida para obtener los caudales, niveles y velocidades a partir de los datos del clima presente y las proyecciones de cambio climático, en los distintos periodos de retorno (10, 25, 50, y 100 años), para cada uno de los tres sectores indicados.

Tabla 1. Esquema metodológico para el cálculo de variables hidrológicas e hidráulicas.

SECTOR	RIESGO	MODELO HIDROLÓGICO	MODELO FLUJO
Norte	Barrancos (incluyen lluvia local).	Método racional modificado	SRH-2D
Centro	Barrancos, lluvia en zona urbana	Método racional modificado	RFSM,SRH-2D
Sur	Desbordamiento del río Moche	Análisis extremal de serie histórica de aforos	SRH-2D

La peligrosidad en la zona de estudio se obtuvo empleando técnicas de "downscaling" estadístico para las proyecciones de cambio climático y modelos 2D de flujo para el cálculo de calados y velocidades. Para determinar los caudales de diseño de las quebradas, todas de cuenca inferior a 100 km² y no instrumentadas, se propuso un método racional modificado que incluye las pérdidas en cauce como un factor que minorra el coeficiente de escorrentía del método racional estándar. Para el modelado del flujo de las quebradas en zonas de baja densidad urbana, se empleó el modelo SRH-2D [3] y para la zona central de Trujillo el RFSM-EDA-2D (elaborado conjuntamente por HR Wallingford e IH Cantabria).

VULNERABILIDAD Y RIESGOS HIDROLÓGICOS

El cálculo de la peligrosidad junto con las características socioeconómicas y los usos del suelo, permite obtener los daños asociados a sucesos extremos, entendidos como las consecuencias de las inundaciones en vidas humanas y pérdidas económicas. A continuación, para la zona de estudio, se destacan los rasgos de vulnerabilidad relevantes para el cálculo de riesgos hidrológicos y se cuantifican los daños asociados.

- Vulnerabilidad hidrológica en la zona de estudio

Se considera que las variables socio-económicas más importantes para el cálculo de los daños por inundación son 1) densidad de población, 2) clasificación de viviendas por tipología estructural y 3) nivel de percepción de riesgo y eficiencia de los sistemas de alerta temprana. Respecto a la primera, la población de Trujillo se concentra principalmente en los núcleos urbanos (Trujillo, La Esperanza y El Porvenir), todos con más de 170.000 habitantes y; en una segunda categoría, Víctor Larco Herrera, Huanchaco y Florencia de Mora, en torno a 50.000 habitantes. La variable que recoge las tipologías estructurales se ha abordado agrupando los barrios en: A) edificios de hormigón bien cimentados con más de una altura; B) viviendas de adobe o ladrillo con moderada resistencia y una altura; y C) estructuras de madera, plásticos, chapas u otros de baja resistencia. A cada una de estas se le ha aplicado un coeficiente de exposición de usuarios al peligro de una inundación súbita. Se ha considerado que A presenta un factor de exposición de un 10%, 1 de cada 10 personas presentes podría verse expuesto a un riesgo potencial; B un 35%, algunas viviendas pueden sufrir daños y no siempre existe una zona elevada cercana; y C un 70%, debido tanto a la baja resistencia de los materiales como a la menor probabilidad de encontrar un refugio seguro cercano. Finalmente, dado que en Trujillo el nivel de percepción del riesgo es bajo, los sistemas de alerta temprana sólo tendrán una eficiencia moderada y no se considera su reducción asociada. Con estas premisas, la población expuesta será la censada afectada del factor reductor por tipología de edificios. Este modelo asume que las acciones individuales no coordinadas y no planificadas no permiten salvar a una proporción significativa de la población expuesta.

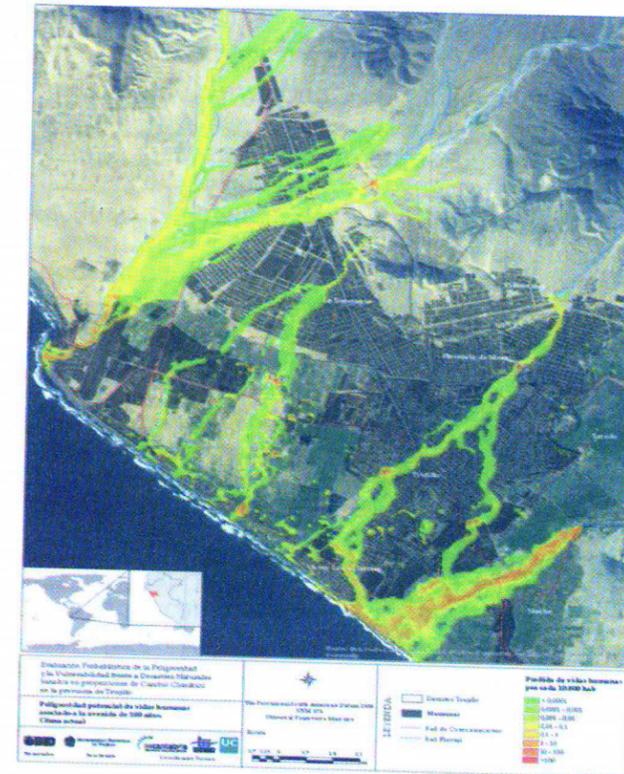
- Riesgos de pérdida de vidas humanas

Juntando los resultados de peligrosidad y exposición se puede obtener el riesgo de pérdida de vidas humanas, en número de víctimas mortales por unidad de superficie.

Del análisis de peligrosidad, se llegó a las siguientes conclusiones. La zona central de Trujillo (del El Porvenir a Buenos Aires) se ve afectada por una reducida capacidad de evacuación de las aguas pluviales, generadas en la ciudad y en la cuenca tributaria de la quebrada de San Ildefonso. Sin embargo, estas inundaciones no son graves respecto a la pérdida de vidas humanas; si bien, en el caso más extremo, en la zona más conflictiva, llegarían a arrastrar vehículos e incluso personas. En el Sector Norte, las quebradas drenan 300 km² de territorios montañosos y provocan como puntos críticos El Milagro y Huanchaco. En el primero, al igual que en el sector del Moche, la carretera Panamericana podrá verse afectada por una crecida de los barrancos. Respecto al segundo, ante una inundación, el aeropuerto podría perder operatividad en momentos específicos.

Combinando los resultados de peligrosidad y exposición para los períodos de retorno de 25 y 100 años (situación actual y escenarios de cambio climático), e introduciendo la población del área de estudio (900.000 habitantes), se obtuvo una probabilidad de fallecimiento por inundación de entre 0.3 y 0.4 personas/año/106habitantes. Teniendo en cuenta que un valor tolerable es 1 fallecido/año/106habitantes (viajar en tren tiene 0.5 y en avión 0.1), los riesgos hidrológicos de muerte de personas en Trujillo son bajos. Siendo El Porvenir, Florencia de Mora y Huanchaco las que tienen más probabilidad en caso de un evento extremo. Como ejemplo, en la figura 2 se presenta el mapa de peligrosidad correspondiente a la avenida de 100 años de periodo de retorno y clima actual.

Figura 2. Pérdida potencial de vidas humanas para la avenida de 100 años y clima actual.



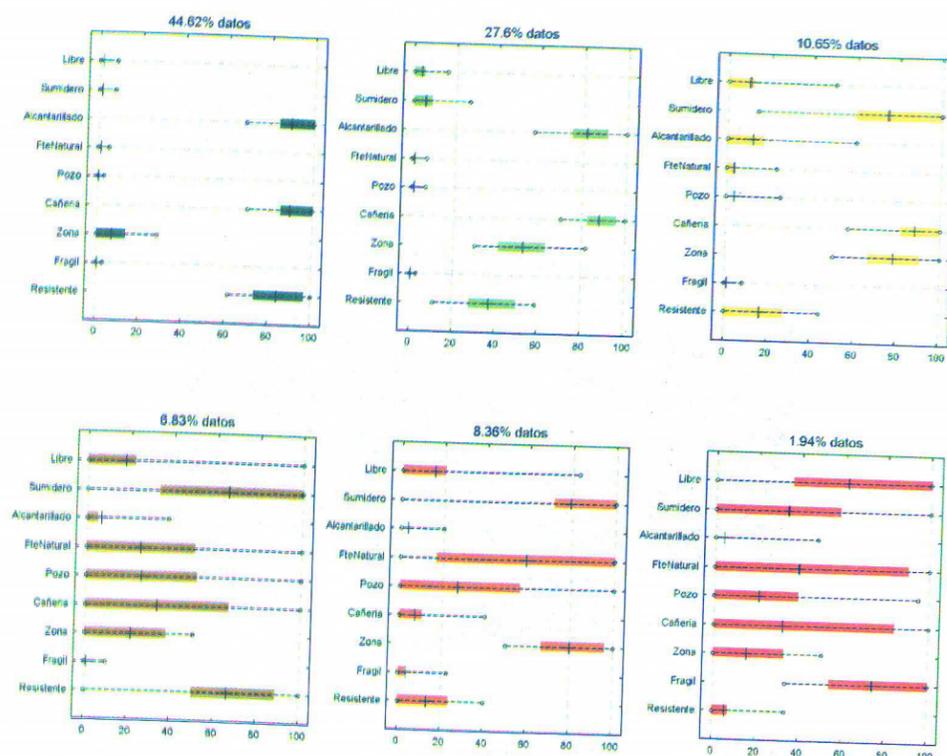
- Cálculo de personas afectadas por inundaciones

Considerando que una persona se ve afectada por un evento extremo si cubre más de 10cm en la zona donde reside, asumiendo una densidad de población homogénea por barrios y cruzando esta información con las manchas de inundación correspondientes a las avenidas tipo seleccionadas (con y sin cambio climático). Se obtuvo que entre el 1 y 2% de la población total, respecto a 106habitantes se vería afectada por las inundaciones. En sentido psicológico o percibido, la extensión de las zonas potencialmente inundables hace que un porcentaje relevante de la población se encuentre bajo el efecto de esta amenaza.

- Cálculo de daños económicos directos.

Para calcular la pérdida de valor económico de los activos expuestos a inundaciones, las viviendas se clasificaron en 6 categorías (Figura 3) atendiendo a los materiales de construcción y a los servicios de abastecimiento y saneamiento. A partir del valor estimado del equipamiento, y aplicando una corrección por densidad de edificación y otra por número de niveles de cada tipo de vivienda, se obtuvo un coste unitario máximo de pérdidas (\$/m²). Además, usando bibliografía, se construyeron curvas de daño empíricas para calcular la proporción de daños con cada nivel de agua, respecto al máximo posible. La ec. 1 permite obtener la proporción de daños intermedios, calados inferiores a 1.5 m, en cada tipo de vivienda. En ella, h_{max} es el calado de daño máximo y K depende del tipo de vivienda, en las 3 primeras columnas de la tabla 2 se muestran los valores para la ec.1.

Figura 3. Clases de viviendas obtenidas a nivel de manzanas



$$\text{Daño } \frac{\text{dolar}}{\text{m}^2} = \text{Precio} \left(\frac{\text{dolar}}{\text{m}^2} \right) \cdot D_{\text{max}} \cdot (1 - e^{-k \cdot h}) \quad [\text{ec.1}]$$

El precio de la vivienda se estableció en 300\$/m² para el parque existente y en 480-590\$/m² para las de nueva construcción (Servicio de estudios BBVA, 2007 y II Estudio "El Mercado de Edificaciones Urbanas en la provincia de Trujillo" de la cámara peruana de la construcción).

Combinando la ec.1, con la distribución de tipos de vivienda y la delimitación de zonas inundadas para cada escenario, se llegó a una estimación de las pérdidas económicas por tipo de vivienda, que resultó en torno al 20%, para todas menos para las tipo 1 en las que fue un 32.4%; siendo las totales, entre 10-21x10⁶\$ de 2012. La situación de cambio climático, no supuso un aumento de más del 10%.

Tabla 2. Parámetros para el cálculo de daños económicos y factores de bienestar

Categoría Vivienda	Precio (\$/m ²)	Dmax (%)	k	Factor bienestar
6-5	143.95	80%	1.609	1.609
4-3	160.23	70%	1.204	1.204
2	204.87	60%	0.916	0.916
1	575.18	30%	0.357	0.357

- Estimación de la pérdida de bienestar por inundaciones

Se han aplicado unos factores de corrección (última columna de la tabla 2) a los daños económicos obtenidos, tal que el valor relativo de un dólar disminuya con el nivel de ingresos. Estos factores igualan la utilidad de una unidad monetaria entre segmentos de población de distinto poder adquisitivo. Las hipótesis adoptadas han sido: 1) Existe correspondencia entre el nivel de renta y las 6 categorías de viviendas; 2) La renta de los individuos se distribuye según una distribución de Pareto; 3) Para cada escalón de renta, se calcula la utilidad marginal del consumo (U) asumiendo una función de la forma $U = \log(C)$ [4] y 4) El índice de desigualdad de Gini en Trujillo se asume el mismo que para todo Perú: 48 sobre 100 [5]. Así, se llegó a un nuevo reparto de los daños, como pérdidas de bienestar, donde los grupos 3 a 6 recibían un 60% del impacto total de una inundación, aunque en daños económicos representaban un 45% de las pérdidas totales.

- Balance global de riesgos hidrológicos en Trujillo

Desde la perspectiva de daños humanos, Trujillo es un municipio relativamente seguro, con riesgos de fallecimiento por inundaciones dentro de lo aceptable. Sin embargo, es mayor el número de personas expuestas a inundaciones con cierta frecuencia, con la reducción de calidad de vida que conlleva y merma de actividades. Por otra parte, los daños materiales debidos a las inundaciones en la ciudad no son cuantiosos, aunque los efectos indirectos pueden ser más importantes. Finalmente, la pérdida de bienestar afecta mayoritariamente a las personas más humildes, mientras que en las zonas de renta alta las pérdidas por inundaciones no suponen un deterioro importante de la calidad de vida.

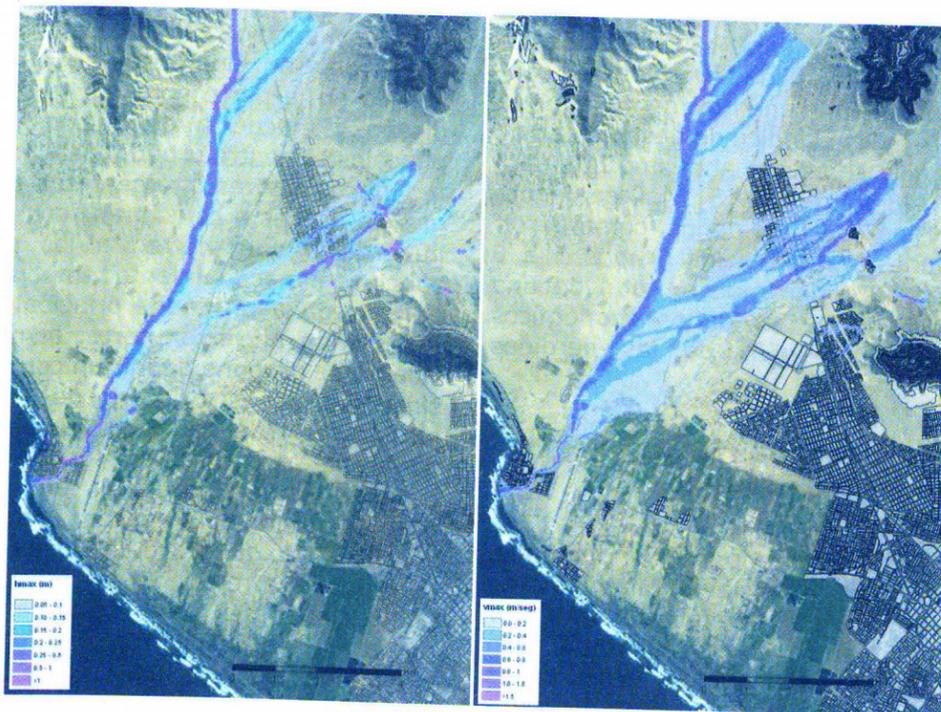
MEDIDAS DE ADAPTACIÓN A LOS RIESGOS HIDROLÓGICOS

Evaluated los riesgos hidrológicos, se propusieron medidas estructurales y no estructurales para eliminarlos o reducirlos. Con respecto a las estructurales, en las riberas del Moche, estas soluciones comprenden tanto la construcción de una protección de los Polígonos industriales I y II y de las áreas residenciales I y III, zona Colón; como el análisis de la estabilidad del puente de la carretera Panamericana. En cuanto a la ciudad de Trujillo, se sugiere el descabezamiento y entrega al río Moche de la Quebrada de San Ildefonso, en su punto de vertido en la parte norte de la ciudad; y el diseño y ejecución de una red de aguas pluviales su centro urbano. Esto conlleva una red de colectores-interceptores principales, una de drenes o colectores secundarios con imbornales que viertan a los principales, zonas de almacenamiento temporal y la obra de entrega a un cauce principal o al mar. Atendiendo al sector norte, al norte de El Milagro se propone definir un corredor fluvial sin edificaciones y aislarlo de la zona construida cerca del cauce de aguas altas de la quebrada La Cumbre. Al sur de este municipio se sugiere construir un sistema de drenaje urbano para evacuar una avenida de 25 años de la quebrada de El León. También, se propone la revisión y adaptación frente a inundaciones del tramo de la Panamericana que atraviesa El Milagro, comprobándose su estabilidad frente a una crecida de las quebradas que lo rodean, es suficiente con verificar la capacidad y estado de conservación de las obras de drenaje transversales. Centrándonos en Huanchaco, la afección al aeropuerto de una inundación extrema es importante. Se recomienda desviar las quebradas que generan el problema hacia el oeste, de forma que encuentren el río Seco antes de llegar a la pista del aeropuerto, esto supone una mota de unos 600-800 m de longitud, cuya viabilidad, tipología y cotas se analizarán en un estudio de detalle.

Asimismo es necesario liberar espacio urbano para dar cabida a El Río Seco, permitiendo que su expansión, se estima que la anchura mínima es del orden de 80-100 m. En la figura 4 se puede ver, a modo de ejemplo, el mapa de calados y velocidades máximas en el sector norte, para la avenida de 100 años y régimen transitorio.

Por último, las medidas no estructurales consistirán en la delimitación de un deslinde del dominio público hidráulico en las zonas latentemente afectadas por cauces y quebradas, la revisión de la legislación de urbanismo con criterios de riesgos de inundación, la información a la población potencialmente afectada, la puesta en marcha de un sistema de previsión de inundaciones y el fomento de los seguros frente a riesgos naturales.

Figura 4. Avenida de 100 años en el sector norte. Régimen transitorio.



CONCLUSIONES

Este artículo tiene por objetivo analizar los riesgos de inundación asociados a ríos, quebradas y lluvias extremas en la Provincia de Trujillo (La Libertad, Perú). Para determinar la profundidad y velocidad máximas del agua, asociadas a distintas probabilidades de ocurrencia de sucesos extremos, se aplicaron modelos numéricos de flujo 2D en tres sectores diferenciados: norte (zona del El Milagro y Huanchaco), centro (ciudad de Trujillo y barrios periféricos) y sur (río Moche y riberas en sentido amplio). También, se realizó un estudio exhaustivo de vulnerabilidad, con el objetivo de conocer la distribución de la población y las tipologías de edificación,

entre otras variables. Combinando los resultados de peligrosidad y de vulnerabilidad, se obtuvieron los riesgos en cuatro aspectos: pérdida de vidas humanas, personas afectadas, daños económicos y pérdida de bienestar, tanto en situación actual como en los escenarios de cambio climático. Finalmente, se propusieron un conjunto de medidas estructurales como son la derivación de algunas quebradas y el drenaje urbano, y otras de gestión, orientadas a modificar estructuras organizativas, el marco legal y los mecanismos económicos para reducir el impacto de las catástrofes.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Guía metodológica Iniciativa Ciudades Emergentes y Sostenibles. 1ª Ed. 2012. BID.
- [2] Plan de Acción Trujillo Sostenible. BID y Alcaldía Provincial de Trujillo, marzo 2011.
- [3] www.usbr.gov/pmts/sediment/model/srh2d/index.html
- [4] Pearce, D. and Ulph, D. 1995. A Social Discount Rate for the United Kingdom. CSERGE Working Paper 95-01. Centre for Social and Economic Research on the Global Environment, University of East Anglia, UK.
- [5] datos.bancomundial.org/indicador/SI.POV.GINI

Gestión integral del recurso hídrico: de la planeación a la acción



Alcaldía de Medellín



CORANTIOQUIA



Ser, Saber y Servir



Universidad Católica de Oriente



UNIVERSIDAD DE ANTOQUIA
1803



UNIVERSIDAD DE MEDELLIN



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN



Universidad Pontificia Bolivariana



Tecnológico de Antioquia
Institución Universitaria



INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA COLEGIO MAYOR DE ANTOQUIA



ISAGEN
ENERGÍA PRODUCTIVA



Patrocina:



Coordina:



Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia