

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN / RESEARCH ARTICLE

## Aplicación del Índice de Sostenibilidad del Recurso Hídrico en la Agricultura (ISRHA) para definir estrategias tecnológicas sostenibles en la microcuenca Centella

Application of a Sustainability Index of Water Resources in Agriculture (ISRHA), to define sustainable technological strategies in the Centella watershed

Wilmar Loaiza Cerón\*  
Aldemar Reyes Trujillo\*\*  
Yesid Carvajal Escobar\*\*\*  
*Universidad del Valle (Colombia)*

\* Geógrafo de la Universidad del Valle, Cali (Colombia). Estudiante de Maestría en Desarrollo. Sustentable. Asistente de Investigación, Universidad del Valle. *wiloce16@gmail.com*

\*\* M.Sc. en Ingeniería de la Universidad del Valle, Cali (Colombia). Profesor asistente, docente de la Escuela de Recursos Naturales y del Ambiente (EIDENAR), Universidad del Valle. Coordinador del Grupo de Investigación en Ingeniería de Recursos Hídricos y Suelos (IREHISA), *aldemar.reyes@correounivalle.edu.co*

\*\*\* Ph.D en Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia España. Profesor titular, docente de la Escuela de Recursos Naturales y del Ambiente (EIDENAR), Universidad del Valle, Director del Grupo de Investigación en Ingeniería de Recursos Hídricos y Suelos (IREHISA), Cali-Colombia. *yesid.carvajal@correounivalle.edu.co*

**Correspondencia:** Wilmar Loaiza Cerón, Carrera 89 n°. 18-72, Casa 35 Villas de San Joaquín II, Barrio Ingenio; Cali, Departamento del Valle del Cauca-Colombia, Tel. 3212153, Ext. 107. Cel. 3167486067.

**Subvenciones y apoyos recibidos:** los autores agradecen el soporte económico al "Programa de formación de investigadores "Generación del Bicentenario" del Programa de Jóvenes Investigadores e Innovadores "Virginia Gutiérrez de Pineda, 2009", financiado por el Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación - COLCIENCIAS a través del proyecto "Sistema de Monitoreo y Seguimiento del ISRHA - Índice de Sostenibilidad del manejo del Recurso Hídrico en el Sector Agrícola. Caso modelo: microcuenca Centella", No. 05-0122-10.

## Resumen

La evaluación de la gestión del agua para uso agrícola en Colombia es escasa, por esta razón, se desarrolló el ISRHA, que evalúa la sostenibilidad del manejo del recurso hídrico en la agricultura, considerando aspectos sociales, económicos y ambientales que contribuyan a la planificación y ordenamiento del recurso hídrico en la microcuenca Centella (Dagua, Valle del Cauca-Colombia). El ISRHA se desarrolló utilizando el Marco para la Evaluación de Sistemas de Manejo Incorporando Indicadores de Sostenibilidad-MESMIS y el Enfoque de Presión-Estado-Respuesta-PER. El índice se aplicó en dos periodos, en los años 2009 y 2010, en las tres vertientes que conforman la microcuenca Centella (La Virgen, Aguas Calientes y Centella). Al comparar los resultados obtenidos en las dos evaluaciones realizadas del ISRHA, se obtuvieron incrementos promedio del 11 % en la sostenibilidad, lo cual permitió identificar puntos críticos y fortalezas en cada vertiente evaluada, y plantear estrategias tecnológicas de sostenibilidad del recurso hídrico en los sistemas productivos agrícolas de la microcuenca.

**Palabras clave:** índice de sostenibilidad, gestión de cuenca, Gestión integral del recurso hídrico, sistemas agrícolas.

## Abstract

The assessment of water management in Colombia is still low, therefore the ISRHA index which assesses the sustainability of water management in agriculture considering social, economic and environmental factors was developed to contribute to planning and management of water resources in the Centella watershed (Dagua, Valle del Cauca-Colombia). The Framework for the Systems Management-Incorporating evaluation of Sustainability Indicators and Approach MESMIS Pressure-State-Response-PSR was used. The index was applied in two time periods, in 2009 and 2010 in the three areas of the Centella watershed (La Virgen, Aguas Calientes and Centella). The 2010 results showed progress towards sustainability of water resources in the three study areas (La Virgen, Aguas Calientes and Centella) with an average increase of 11 % on sustainability compared with 2009 results. This allowed to identify the ability of critical and strength points and raised technological strategies of sustainability of water resources in agricultural production systems in the Centella watershed.

**Key words:** Index of sustainability, watershed management, integrated management of water resources, agricultural systems.

*Fecha de recepción:* 17 de julio de 2012  
*Fecha de aceptación:* 5 de agosto de 2012

## 1. INTRODUCCIÓN

La Gestión Integral del Recurso Hídrico (GIRH) es “un proceso que promueve el manejo y desarrollo coordinado del agua, el suelo y los recursos relacionados, con el fin de maximizar el bienestar social y económico resultante de manera equitativa, sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas vitales” [1], y que sirve como estrategia para adaptarse a la Variabilidad (VC) y el Cambio climático (CC), [2]. Es común encontrar enfoques reduccionistas para la gestión del agua, pero la propuesta actual es realizar un análisis integral de los recursos hídricos. [3], [4]. Se han realizado diferentes intentos para integrar aspectos ambientales, socio-económicos, culturales y políticos en la gestión del recurso [5]-[7]; esto con el fin de establecer un equilibrio entre los usos del agua y las necesidades de los ecosistemas vitales, promoviendo el desarrollo sostenible, la democracia, la participación, la equidad y el respeto por los derechos de las poblaciones más vulnerables [8], [9]. Cuando se investiga la GIRH, varios autores, entre ellos Pahl-Wostl [10], resaltan la necesidad de cambiar los paradigmas científicos tradicionales hacia una investigación inter y transdisciplinaria, dado que los problemas ambientales (crisis del agua, Cambio climático, demanda de energía, pobreza, etc.), se caracterizan por tener una escala global, ser complejos, variables, multicausales, retroalimentados e inseparables, lo cual obliga a abordarlos con una visión holística, integral e interdisciplinaria, que solo se logra trabajando en equipo con diferentes disciplinas [11].

América Latina es una región con propuestas innovadoras para la gestión del agua [12]; sin embargo, paradójicamente también es la región donde el deterioro ambiental avanza con mayor rapidez. Una consideración importante en el estudio del ciclo hidrológico es la inclusión del ciclo antrópico, pues, en general, se ha tratado independientemente y aún no se entiende completamente la interacción entre los ecosistemas [13], [14] y el papel del hombre en el mismo [15]. El objetivo principal que propone la GIRH es mantener el ciclo del agua inalterado, tanto como sea posible dentro del ciclo antrópico para disminuir la presión sobre los ecosistemas [16]. Otra consideración es que GIRH, como estrategia fundamental, es la integración de todos los sectores [17] para definir estrategias de manejo del recurso, de ahí la necesidad del abordaje holístico e interdisciplinario. El manejo sectorial, sin coordinación, es característico de la región y ha

conducido a una crisis de gobernabilidad del agua; por ello, los arreglos institucionales formales no se corresponden con los de la sociedad [18]-[20]. Así, la organización formal institucional tiene legalidad, pero no legitimidad y casi nunca es posible aplicarlos por ser tomados de otros países o corresponder a presiones de agencias internacionales.

Aunque Colombia posee una abundante riqueza hídrica, esta se encuentra irregularmente distribuida en tiempo y espacio. A lo anterior se suma el continuo deterioro de la calidad del recurso por contaminación, debido a su uso insostenible y a la ocupación no planificada del territorio, entre otros; esta situación aumenta las condiciones de vulnerabilidad de la población frente a cambios ambientales, como la variabilidad y el cambio climático. Actualmente, se identifica que la mitigación (reducción de emisiones de gases de invernadero) por sí sola, no es suficiente para proteger a las sociedades de los efectos de cambio del clima; la adaptación juega un rol fundamental, especialmente en el sector agrícola, que consume el 61% (7640 millones de metros cúbicos) del volumen total de agua en el país [21].

Colombia, por estar localizada en el trópico y tener un relieve abrupto en la región andina, presenta un ciclo hidrológico muy dinámico, que está influenciado entre otros, por el fenómeno El Niño Oscilación del Sur (ENOS). Este es un conjunto de variaciones climáticas interanuales que ocurre en el Océano Pacífico tropical en promedio cada 4 años, con variaciones entre 2 y 7. En Colombia, el efecto de sus fases extremas (El Niño y La Niña) [22], [23], ocasionan eventos hidrometeorológicos, tales como tormentas, sequías e inundaciones, que alteran la disponibilidad del recurso hídrico. Además, el 61% de la población vive en áreas que presentan índices de escasez del recurso hídrico que oscilan entre medio y alto [24], situación que hace más crítica la disponibilidad de agua en el sector rural, si se considera que Colombia vive un escenario de conflicto interno y requiere una política más integrada de manejo del recurso hídrico [25].

Un reciente informe Nacional de Desarrollo Humano [26] destaca que Colombia tiene un 32% de población campesina y no tendrá el desarrollo que pretende, si no invierte en el sector rural. La agricultura en el siglo XXI sigue siendo motor para el desarrollo, pero enfrenta nuevos desafíos, tales

como la degradación de los recursos naturales, la variabilidad y el cambio climático, el libre comercio y el desarrollo de nuevas tecnologías, entre otros. En el caso de Colombia, se destacan grandes conflictos en el uso del suelo, que se traducen en sobre y subutilización de este, lo que evidencia un uso ineficiente y favorece la erosión y el incremento de inundaciones que vienen afectando la agricultura del país [27]. Este sector es uno de los más vulnerables a la variabilidad y el cambio climático y necesita adaptarse a sus rápidas variaciones, y modificaciones, dado que se espera que el impacto sea cada vez más negativo. Se identifica el sector rural como medio para aliviar la pobreza, y en él las mujeres juegan un papel importante. A primera vista, el impacto de la variabilidad y el cambio climático en los recursos hídricos no estaría directamente relacionado con el sector agrícola. Sin embargo, comparado con otros sectores, en el mundo, la agricultura es el sector que consume más agua en términos de volumen (70%), para este sector el agua es un bien por cuyo uso se paga muy poco, se emplea ineficientemente y está subvencionado. Se necesitan implementar estrategias de adaptación y uso sostenible, ante la escasez del agua y el aumento de la demanda para riego en la región y considerar integralmente la evaluación de los impactos del clima, tanto en los recursos hídricos, como en la agricultura, porque ambos son muy vulnerables a las fluctuaciones climáticas. El sector agrícola campesino colombiano (de pequeña y mediana escala) aporta el 64% de los productos alimenticios del país y se caracteriza por tener tecnologías inapropiadas de manejo de suelos y aguas en sus sistemas productivos. Así mismo, existen serias limitaciones para el acceso a servicios básicos y transferencia de tecnología [28].

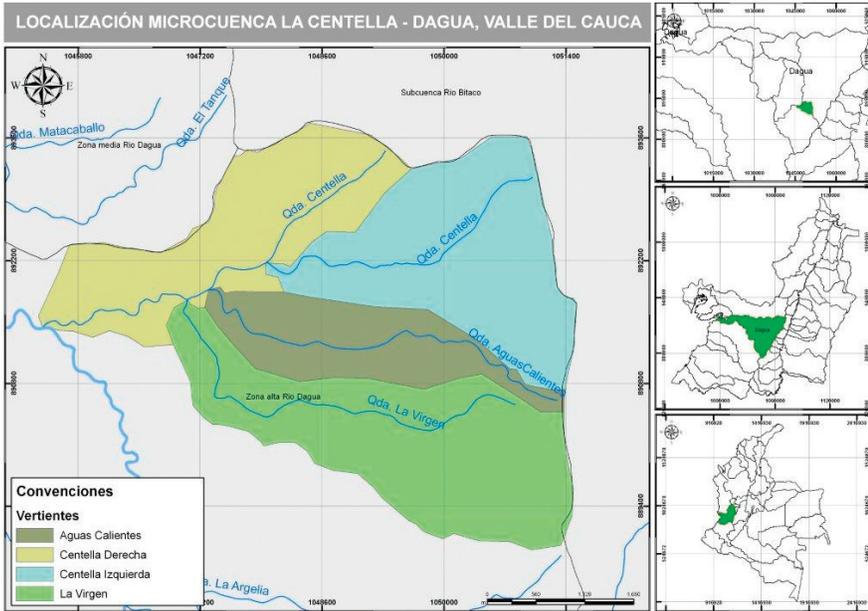
A partir de lo anterior, se planteó el desarrollo de una metodología de evaluación del manejo del recurso hídrico en sector agrícola de pequeña y mediana escala, con el fin de contribuir al uso y manejo sostenible de los recursos naturales involucrados en los sistemas productivos agropecuarios de la microcuenca Centella. Esta herramienta contribuye a la planificación, promoción, manejo y conservación del recurso hídrico, para promover el desarrollo humano sustentable. En este sentido, se desarrollaron indicadores e índices para determinar la sostenibilidad del recurso hídrico en el tiempo y entender mejor los procesos subyacentes, con el fin de disponer de herramientas para formular políticas y estrategias [29]; el desarrollo del ISRHA, combina el Marco para la Evaluación de Sistemas de Manejo

Incorporando Indicadores de Sostenibilidad-MESMIS [25], [30] y el Enfoque de Presión-Estado-Respuesta-PER [31], [32]. Su evaluación en el tiempo permite identificar la sostenibilidad del manejo del recurso hídrico y aporta información valiosa sobre el estado actual de la sostenibilidad, la adaptación, la intensidad y dirección de posibles cambios [24], [33].

## 2. ESCALA ESPACIAL DE ANÁLISIS

La cuenca del río Dagua es de gran importancia para Colombia, porque por ella cruza la principal vía que comunica el interior del país con la cuenca del Pacífico, y por allí se moviliza el 55% del comercio exterior, es decir, tiene una posición estratégica que le otorga un peso decisivo a nivel nacional. No obstante, presenta un deterioro progresivo, como resultado del inadecuado manejo ambiental de las actividades productivas, al punto de ser la cuenca más degradada del Valle del Cauca, con graves problemas de erosión y más de un 50% de su área total deforestada.

Esta situación ocasiona frecuentes problemas con altos costos para la nación, porque el gran aporte de sedimentos que hacen su río principal y tributarios a la bahía de Buenaventura genera altas inversiones en dragado. La cuenca cuenta además con más de 8 zonas de vida de gran importancia ambiental y potencial productivo agrícola, que de no generar procesos para su adaptación y recuperación ante eventos hidrológicos extremos, aumentarán las pérdidas ambientales y económicas [28], [34]. La agricultura es el eje más importante de su economía, sustentada en cultivos de café, plátano, caña panelera, piña, habichuela, frutas, cacao y frijol. Una de las zonas de la cuenca donde ocurren mayores procesos erosivos, como resultado de las actividades productivas agrícolas, es la microcuenca Centella; por esta razón, fue seleccionada como zona prioritaria para la implementación en escala espacial de los indicadores (ver gráfica 1), que fueron evaluados en sus tres vertientes (La Virgen, Aguas Calientes y Centella), que previamente se clasificaron por área según [35].



**Gráfica 1.** Localización general de la microcuenca Centella, Unidades de análisis espacial del ISRHA.

### 3. METODOLOGÍA

Para evaluar la sostenibilidad del manejo del recurso hídrico en sistemas productivos agrícolas es esencial considerar una variedad de criterios; por ello, un índice integrador ofrece la ventaja de interpretación sobre una larga lista de valores numéricos o evaluaciones no cuantitativas [36]. De esta forma, se facilita la comparación entre distintas alternativas, logrando ser más prácticos a la hora de transmitir información a pobladores y tomadores de decisiones [37]-[39]. Considerando lo anterior, se aplicó el ISRHA, que combina el Marco para la Evaluación de Sistemas de Manejo Incorporando Indicadores de Sostenibilidad-MESMIS [25], [30] y el Enfoque de Presión-Estado-Respuesta-PER [31], [32]; estos procedimientos constan de tres fases principales: 1) transformación de los datos obtenidos a indicadores, mediante dicotomización, categorización y evaluación de su alta o baja incidencia en la sostenibilidad del recurso hídrico; 2) síntesis de indicadores, según el factor de análisis al que pertenecen para obtener los indicadores de evaluación del ISRHA; 3) generación del índice y planteamiento de recomendaciones derivadas de los resultados

obtenidos [40]. Posteriormente, utilizando la evaluación del ISRHA del año 2010, se identificaron puntos críticos y fortalezas en la sostenibilidad del recurso en los sistemas productivos agrícolas de la microcuenca, para plantear estrategias de sostenibilidad que permitan reducir el efecto de las actividades antrópicas.

La información primaria para aplicar el ISRHA se obtuvo por medio de una encuesta realizada a los agricultores de la región y una campaña de observaciones en campo que incluyeron: aforos, monitoreo de calidad y prácticas culturales más relevantes para el manejo del agua en los sistemas productivos agrícolas. Se realizó un muestreo aleatorio estratificado con asignación proporcional para seleccionar el tamaño de la muestra, considerando una población total de 313 fincas en la microcuenca con tres subpoblaciones (La Virgen, Aguascalientes y Centella), donde finalmente se obtuvo un tamaño de muestra total de 54 fincas, con una confiabilidad del 90% y un máximo error permisible de 12%. Obtenida esta información, se calculó el ISRHA con 53 indicadores, utilizando una escala de evaluación para facilitar el trabajo de diagnóstico realizado con los agricultores [40]. Mediante el juicio de expertos, se definieron cinco opciones de escogencia múltiple, para establecer las apreciaciones de los agricultores, por tal motivo se definió una escala de valoración de 1 a 5. Dicha escala fue definida a partir de las opciones múltiples trabajadas en la encuesta así: 1) Manejo insostenible del Recurso Hídrico (RH), 2) Manejo del RH con baja sostenibilidad, 3) Sostenibilidad moderada en el manejo del RH, 4) Alta sostenibilidad del manejo del RH, 5) Muy alta sostenibilidad del manejo del RH [40].

### **Síntesis de indicadores**

Una vez obtenidos los valores de los 53 indicadores, estos fueron sintetizados mediante clasificación y agrupación por diferentes áreas de evaluación (Biofísicos, tecnológicos, socioeconómicos y político-institucionales), con el fin de obtener un valor único que permitiera compararlos en diferentes escalas de tiempo; de esta forma, se redujeron a 27. Por ejemplo, el indicador "Calidad del agua para riego" agrupa: pH, conductividad eléctrica, relación de adsorción de sodio, dureza, carbonato sódico residual, sólidos totales disueltos, toxicidad y fuente del agua para riego. La obtención del valor único se realizó aplicando los métodos Modelo

de Ecuaciones Estructurales y Diagrama radial para el ISRHA, cuyos fundamentos se describen a continuación.

- *Modelo de Ecuaciones Estructurales (SEM)*. Surgen de la síntesis de dos técnicas estadísticas: el análisis de factores y el análisis de regresión; estas se plantean cuando surgen conceptos que no se pueden medir con claridad, convirtiéndose en variables latentes que miden a través de variables indicadoras dichos conceptos. Las variables son determinadas previamente por los investigadores, lo que permite establecer relaciones de dependencia entre los factores, denominadas ecuaciones estructurales. Esta es una técnica poderosa para representar situaciones reales, complejas, con múltiples variables y con interdependencia entre sí [41]. Su utilidad para el investigador radica en el aporte integral de los aspectos del fenómeno estudiado. Así mismo, reducen la cantidad de información para analizar, al agrupar relaciones de un gran número de variables en pocos factores esenciales de la situación analizada; más detalles de la metodología pueden consultarse en [42], [43]. Una vez calculada cada variable observable, se determinó su importancia, por medio de una normalización de datos, con el fin de obtener los promedios ponderados del valor final del indicador.
- *Diagrama radial para el ISRHA*. La síntesis de los resultados del ISRHA se realizó mediante un gráfico radial “Rosa de los Vientos”, el cual visualiza el valor de cada variable, correspondiente a la calificación realizada por los agricultores y las observaciones de campo.

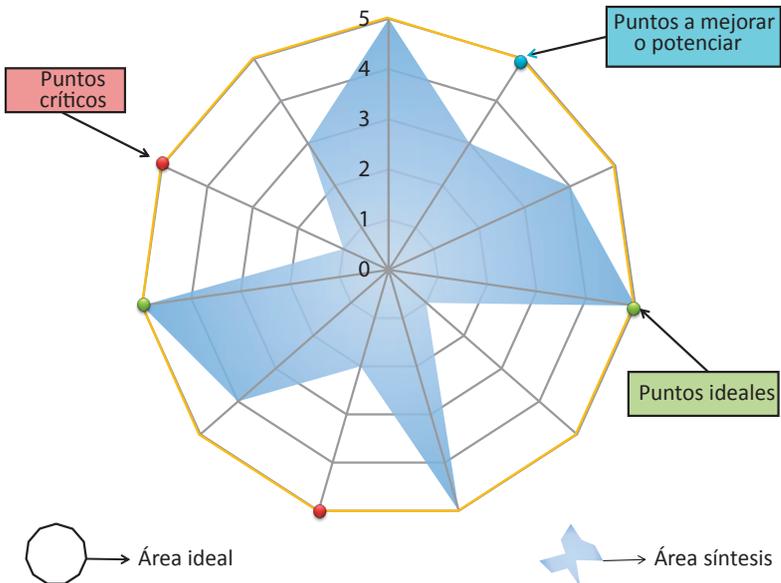
Según Reyes [44], el gráfico radial permite plantear relaciones entre el área síntesis de cada vertiente y el área ideal; cada eje corresponde a un indicador y cada circunferencia representa la escala de evaluación de 1 a 5 utilizada para su valoración. Cabe anotar que cada nivel de respuesta o circunferencia corresponde al 20% del área total, como se indica en la tabla 1. Con esta metodología se obtiene un área síntesis que representa los resultados de los 27 indicadores definidos para el ISRHA; el porcentaje de esta área síntesis respecto al área ideal (cuando todos los indicadores han sido calificados con un valor de cinco), corresponde al nivel de sostenibilidad del recurso hídrico en cada vertiente de estudio (Ver gráfica 2) [40]. Además, permite identificar puntos críticos o débiles de menor valoración, así como fortalezas relacionadas con los factores de mayor

cumplimiento; así mismo, propicia el reconocimiento de componentes que aumentan o reducen la sostenibilidad del recurso hídrico, las condiciones de similitud o divergencia entre las unidades de análisis, debilidades o potencialidades en los ámbitos biofísico, tecnológico, socioeconómico o político-institucional. Con base en esta información, se formularon estrategias para la implementación de acciones tecnológicas para la GIRH.

**Tabla 1**  
 Porcentaje del diagrama radial respecto al valor en el ISRHA

Valor del ISRHA	Porcentaje del Diagrama radial	Evaluación del indicador
1	0% - 20%	Manejo insostenible del recurso hídrico
2	20% - 40%	Manejo del recurso hídrico con baja sostenibilidad
3	40% - 60%	Sostenibilidad moderada en el manejo del recurso hídrico
4	60% - 80%	Alta sostenibilidad del manejo del recurso hídrico
5	80% - 100%	Muy alta sostenibilidad del manejo del recurso hídrico

La relación entre el área síntesis y la ideal para la sostenibilidad del recurso hídrico, se determina con un gráfico radial que da como resultado el ISRHA en la microcuenca Centella.



**Gráfica 2.** Esquema de la Rosa de los Vientos. Elaboración propia con base en [40].

#### 4. RESULTADOS

El diagnóstico en las tres vertientes permitió identificar aspectos que inciden positiva o negativamente en la sostenibilidad del recurso hídrico en el sector agrícola (ver gráfica 3); en la vertiente La Virgen se obtuvo un valor de 69,5% en el ISRHA (año: 2010), con una alta valoración (4); el índice aumentó 8,6%, respecto a la evaluación del año 2009. Aunque en este último año, obtuvo el primer lugar con respecto a las demás unidades de análisis espacial, la poca participación de los agricultores en los procesos y actividades del proyecto el siguiente año hacen que pierda este lugar. En Aguas Calientes, El ISRHA fue de 67,8%, con una alta valoración (4) y un aumento del 9,5%, respecto a 2009, mientras que para Centella, pasó de 58,7% (2009) a 73,3% en 2010, representando el mayor progreso en toda la microcuenca, con un incremento de 14,5% en la sostenibilidad.

La tabla 2 muestra los resultados de la evaluación de los 27 indicadores bajo escala del ISRHA para cada una de las tres vertientes. Así, mediante una interpretación visual se evaluó de forma rápida, cuáles variables presentan fortalezas en la sostenibilidad del recurso hídrico y cuáles no, lo que guía al usuario en la toma de decisiones para mejorar la sostenibilidad y competitividad de los sistemas productivos agrícolas de la zona.

**Tabla 2**

Resultados de la evaluación de los indicadores para la síntesis del ISRHA

#	Índices	La Virgen	Aguas Calientes	Centella
1	Calidad del agua para riego	4	4	4
2	Oferta hídrica superficial para el riego	3	3	2
3	Amenaza en el recurso hídrico ante eventos hidrolimáticos	4	4	4
4	Eficiencia del manejo del agua para riego y control de escorrentía	2	3	2
5	Evaluación de la calidad del agua para riego	3	3	3
6	Participación del agricultor en actividades de recuperación y conservación del recurso hídrico	3	5	5
7	Adaptación ante amenazas climáticas	4	3	4

*Continúa...*

#	Índices	La Virgen	Aguas Calientes	Centella
8	Prácticas de control de erosión hídrica	3	4	3
9	Cambio tecnológico para el manejo del agua para riego	3	2	2
10	Sistema de cobro del agua	3	3	5
11	Conflictos por uso del agua	5	5	5
12	Implementación de actividades de conservación y protección del recurso hídrico y del medio ambiente	4	5	4
13	Disposición final de los residuos sólidos	5	5	5
14	Ingresos laborales del agricultor	2	2	1
15	Nivel educativo del agricultor	3	3	2
16	Saneamiento básico	5	5	5
17	Costo del agua para riego	1	1	5
18	Resolución de conflictos por uso del agua	5	5	5
19	Consolidación de la Junta de Aguas	5	5	5
20	Vertimientos contaminantes a las principales fuentes de agua	5	5	5
21	Número de entidades que desarrollan actividades para la conservación	5	3	5
22	Concesión de aguas	5	5	5
23	Organización comunitaria para la gestión del agua	3	3	3
24	Percepción del agricultor sobre la importancia del medio ambiente en la agricultura	5	5	5
25	Número de campañas de educación ambiental	2	1	2
26	Número de capacitaciones en GIRH y manejo del suelo para la agricultura	3	3	3
27	Número de capacitaciones en Buenas Prácticas Agrícolas (BPA) y manejo de biofábrica	3	2	4

Los principales inconvenientes identificados en las vertientes se asocian con los siguientes aspectos: insuficientes cambios tecnológicos en el manejo del agua para riego, no se realiza tratamiento previo al agua utilizada, las eficiencias del manejo del agua para riego y escorrentía siguen siendo bajas, debido al uso de sistemas de riego artesanales y a la falta de técnicas

para cuantificar requerimientos hídricos, situación que no contribuye a su uso eficiente (ver gráfica 3). En cuanto a control de escorrentía, el uso en drenaje libre, en el sentido de la pendiente, es una práctica que aumenta la erosión hídrica del suelo, especialmente en las vertientes la Virgen y Aguas Calientes.

Los indicadores socioeconómicos presentan inconvenientes relacionados con la educación del agricultor y sus ingresos laborales; el nivel educativo de primaria, en los tres sectores evaluados, dificulta el acceso de los agricultores a mejores oportunidades de desarrollo; Centella presenta el promedio más bajo de ingresos (\$257.700), equivalentes a menos de un Salario Mínimo Mensual Vigente (SMMV), situación que se relaciona directamente con la baja adopción tecnológica, puesto que las prioridades están en satisfacer sus necesidades básicas diarias y se resta importancia al manejo sostenible de los recursos naturales.

Los costos del agua para riego no consideran los excedentes derivados del consumo de agua, ni restricciones de uso, lo que incentiva el uso ineficiente (La Virgen), mientras que en Aguas Calientes los agricultores pagan una cuota fija anual, sin que se considere el agua consumida, lo que incentiva mayores consumos a los demandados para las actividades agropecuarias y domésticas. Caso contrario ocurre en Centella, donde hay activa participación del agricultor en acciones para conservar el recurso hídrico, y un sistema de cobro que se diferencia de las otras unidades, porque se paga por el consumo adicional, lo que incentiva el ahorro del recurso y su uso adecuado.

La insuficiente promoción institucional en campañas de educación ambiental y poca participación de los agricultores en capacitaciones sobre Buenas Prácticas Agrícolas (BPA), incide negativamente en la sostenibilidad del recurso hídrico, lo cual se evidencia en la valoración de estas variables (La Virgen y Aguas Calientes). Es primordial ejecutar nuevos proyectos que promuevan la participación de agricultores mediante la metodología de “aprender haciendo”, tal y como se realizó en el proyecto Centella [40], en el que la activa participación del agricultor en acciones para conservar el recurso hídrico tuvo un valor de 5 en la escala del índice. La Junta de Aguas es el principal organismo para la administración y resolución de los posibles conflictos por el uso del agua. Los agricultores han tomado

conciencia de la utilización de los residuos sólidos en procesos de compostaje y lombricompostaje, además cuentan con la concesión de aguas otorgada por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - CVC.

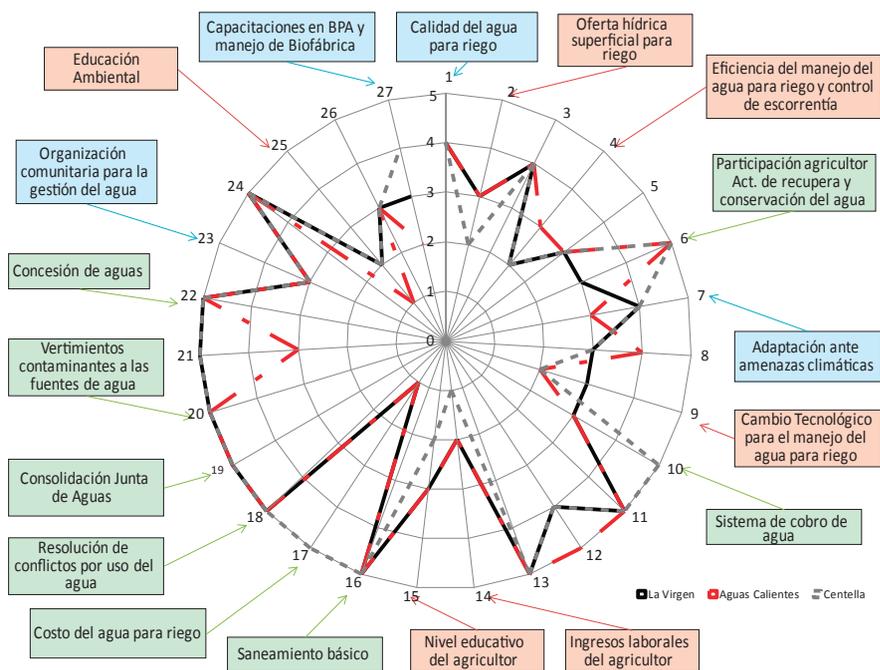
Algunos de los aspectos positivos en relación con los indicadores de respuesta son: existen pocos conflictos por el uso del agua, hay cambios en la disposición final de residuos sólidos en las áreas evaluadas, los cuales eran quemados, enterrados o arrojados a las fuentes, pero actualmente son utilizados en procesos de reciclaje y compostaje en la biofábrica, como parte de la estrategia desarrollada en [28]. No obstante, hay factores que deben potenciarse o mejorarse, como la participación del agricultor en actividades de recuperación y/o conservación del agua, por lo cual es necesario promover y aumentar las capacitaciones en GIRH y manejo del suelo.

En las tres vertientes se han presentado pocos fenómenos de sequías y deslizamientos, lo que indica menores posibilidades de daños o efectos negativos sobre los agricultores, los cultivos y sus recursos; no obstante, en periodos de sequías los agricultores buscan fuentes de suministro alternas al acueducto, tales como ríos y pozos, y mantienen el suelo cubierto durante todo el cultivo con arvenses y residuos de la cosecha anterior, para conservar la humedad del suelo y retener el agua. Para la mitigación de deslizamientos, se realiza el manejo de aguas lluvia mediante canales, zanjas o muros de desviación, que permiten encausar el flujo alrededor de las construcciones y los cultivos, evitando un mayor impacto por la erosión del suelo. Sin embargo, es importante mencionar que los deslizamientos que se han presentado no han afectado a los agricultores ni a sus cultivos.

Cabe destacar que en la vertiente Aguas Calientes, los vertimientos de contaminantes a las principales fuentes hídricas se han reducido principalmente por un cambio de conciencia ambiental, generado por los proyectos ejecutados en la zona, al promover la reutilización y reciclaje de los residuos mediante el compostaje. Así mismo, existen aspectos a mejorar para generar mayor sostenibilidad en la vertiente, que están relacionados con la organización comunitaria para la gestión del agua, ya que los agricultores, aunque son socios de la Junta de Aguas no participan en las actividades programadas por ella.

Un aspecto que se debe potenciar y mejorar está relacionado con las prácticas para el control de la erosión hídrica, porque los agricultores han empezado a realizar siembras en curvas a nivel, incorporando residuos vegetales de la cosecha en los suelos para evitar erosión, lo cual mejora el ISRHA; esto podría fortalecerse más si se implementa la siembra de barreras vivas o cultivos de cobertura.

Una estrategia importante sería capacitar al campesino en los procesos de conservación de los recursos hídricos y manejo sostenible del sistema productivo agrícola; esta sería una opción para incrementar los beneficios económicos de la población, contribuir al desarrollo humano y, por consiguiente, ayudar a la construcción de tejido social, con el objeto de mejorar las condiciones de vida o fortalecer la unidad familiar, lo que evitaría su fragmentación y/o reducir el alto grado de movilidad del campesino. Por otra parte, con el aprovechamiento tanto de los productos como de los subproductos generados en los sistemas productivos, se da una respuesta amigable al medio ambiente, lo cual favorece el manejo ambiental de las actividades productivas.



Resultados La Virgen				
Área/ Unidades	m <sup>2</sup>	%	Valor en el ISRHA 2010	Valor en el ISRHA 2009
Área Total	31415,9	100		
Área Síntesis	21822,8	69,5	69,5 (4)	60,9 (4)

Resultados Agua Calientes				
Área/ Unidades	m <sup>2</sup>	%	Valor en el ISRHA 2010	Valor en el ISRHA 2009
Área Total	31415,9	100		
Área Síntesis	21290,1	67,8	67,8 (4)	58,3 (3)

Resultados Centella				
Área/ Unidades	m <sup>2</sup>	%	Valor en el ISRHA 2010	Valor en el ISRHA 2009
Área Total	31415,9	100		
Área Síntesis	23035,5	73,3	73,3 (4)	58,7 (3)

**Gráfica 3.** Resultados de las Rosas de los vientos del ISRHA en las tres vertientes de análisis

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los indicadores del ISRHA permitieron identificar puntos críticos y fortalezas en los sistemas productivos de La Virgen, Aguas Calientes y Centella en diferentes factores, lo cual facilitó la identificación de los efectos de actividades antrópicas en los recursos de la zona.

Con la aplicación del ISRHA en la microcuenca, se plantearon estrategias de sostenibilidad del RH en los sistemas productivos agrícolas para reducir desequilibrios en la oferta ambiental, manejo inadecuado de los sistemas agrícolas, degradación de suelos, pérdida de calidad de agua, problemas sociales, así como la concentración de recursos, que plantean la necesidad de orientar la toma de decisiones y acciones hacia el desarrollo sostenible.

El Índice de Sostenibilidad del Recurso Hídrico Agrícola (ISRHA) permite una fácil interpretación visual para evaluar fortalezas y debilidades en la sostenibilidad, guiando al usuario en la toma de decisiones y en la formulación de estrategias que mejoren la competitividad de los sistemas productivos agrícolas de la zona.

A través del diagnóstico y aplicación del ISRHA en la vertiente La Virgen se lograron identificar aspectos que inciden negativamente en la sostenibilidad del recurso hídrico, debido principalmente al incorrecto manejo del agua para riego y control de la escorrentía, las deficiencias en el uso de técnicas para determinar la humedad del suelo y el almacenamiento del agua de fertirrigación; así mismo, la falta de tratamiento, de registros de consumo del agua y su alto costo inciden en la sostenibilidad del recurso.

En el aspecto socioeconómico están los bajos ingresos laborales y los excedentes derivados de las actividades netamente agrícolas, que podrían mejorarse mediante políticas públicas municipales, enfocadas a satisfacer las necesidades básicas y a mejorar el nivel de vida de la población de la microcuenca. El ISRHA pasó del 60,3% (2009) al 69,5% (2010), aumentando en un 6,2%, con la intervención efectuada. Esta situación puede mejorar aún más con una mayor participación de los agricultores.

Los principales problemas de la vertiente Aguas Calientes se asocian a los pocos cambios tecnológicos en el manejo del agua para riego, que son inadecuados para los cultivos, además sin un tratamiento previo del agua. Los escasos ingresos de los agricultores se deben al bajo nivel de escolaridad y a que los excedentes de sus actividades agrícolas no les

permiten obtener mejores ingresos. Aunque el ISRHA pasó de 58,8% a 67,8%, lo que indica una mejor sostenibilidad del recurso hídrico, la escasa participación de los agricultores y la insuficiente promoción de las instituciones en campañas de educación ambiental y capacitaciones sobre Buenas Prácticas Agrícolas, requieren la implementación de nuevas y mejores estrategias para mejorar la situación.

En Centella es primordial ejecutar proyectos que promuevan la participación de los agricultores con la metodología de “aprender haciendo” utilizada en [28], donde la vinculación de los campesinos en actividades para la protección y conservación incidió positivamente en la sostenibilidad del recurso hídrico, y además facilitó la resolución de conflictos por el uso del agua, gracias a que existe una organización de Junta de Aguas, que atiende estos asuntos. La deficiente gestión ambiental institucional en la zona debilita la sostenibilidad y aplicación de estrategias para conservar el agua, lo cual se refleja en la medición de las variables de campañas de educación ambiental, capacitación en BPA, Biofábrica y capacitaciones en GIRH y manejo del suelo.

En la región han ocurrido pocos fenómenos de sequía y deslizamientos; no obstante, se han implementado estrategias para mitigar estas amenazas. En el sector La Virgen se almacena agua en tanques y reservorios para utilizarla en estiaje; adicionalmente, se incorpora materia orgánica al suelo para conservar la humedad; no obstante, se recomiendan medidas adicionales para mejorar el manejo del mismo en estiaje, tales como rotación de cultivos con abono verde, mantenimiento de suelos, desyerbas y/o podas, etc. Entre las prácticas preventivas frente a deslizamientos están: el manejo de aguas lluvias mediante canales, zanjas o muros de desviación para encauzar el flujo alrededor de las construcciones y los cultivos.

Los resultados muestran un progreso hacia la sostenibilidad del RH en las tres vertientes de la microcuenca en el año 2010, con mejoras en factores biofísicos, tecnológicos, socioeconómicos y político-institucionales que alcanzaron incrementos promedios del 11% en la sostenibilidad, comparadas con el año 2009. Se identificaron situaciones críticas a revertir de manera conjunta e inmediata, como la baja eficiencia del manejo del agua para riego y control de escorrentía, que presenta progresos en algunas fincas, pero de forma aislada, sin cambios sustanciales en toda la microcuenca.

Además, las diferentes organizaciones que quieran aportar desarrollos importantes en la zona deberán promover la participación y la ejecución de campañas de educación ambiental, GIRH, manejo del suelo y de Buenas Prácticas Agrícolas (BPA), que permitan al agricultor una mayor apropiación del conocimiento e implementar dichas capacitaciones en sus sistemas productivos, promoviendo el progreso socioeconómico de la población y el desarrollo sustentable de los recursos.

## 6. AGRADECIMIENTOS

Al proyecto "Estrategias de competitividad y sostenibilidad de sistemas productivos agrícolas en la microcuenca Centella (Dagua)", realizado en el marco de la Estrategia Bioregión Valle del Cauca en alianza interinstitucional con el Grupo IREHISA, Corporación BIOTEC y la Facultad de Ingeniería Agroindustrial de la Universidad San Buenaventura, con el apoyo de la Gobernación del Valle del Cauca. Al Programa "Generación del Bicentenario" del Programa Jóvenes Investigadores e Innovadores "Virginia Gutiérrez de Pineda, 2009 de COLCIENCIAS.

## 7. REFERENCIAS

- [1] Global Water Partnership-GWP, Gestión Integrada de Recursos Hídricos: TAC. *Background Papers* vol. 4. Chile: GWP, 2000.
- [2] M. García, Y. Carvajal y H. Jiménez, "La gestión integrada de los recursos hídricos como estrategia de adaptación al Cambio Climático," *Ingeniería y Competitividad*, vol.9, no.1, pp. 19-29, Ene. 2007.
- [3] E. Guerrero, O. De Keizer y R. Córdoba, *La aplicación del enfoque ecosistémico en la gestión de los recursos hídricos, un análisis de estudios de caso en América Latina*, Quito: Unión Mundial para la Naturaleza-UICN, 2006, 78p.
- [4] Y. Carvajal, "Environmental flow regime in the framework of Integrated water resources management strategy International," *J. of Ecohyd. & Hydrobiol.*, vol. 8, no. 2-4, pp. 307-315, 2008.
- [5] D.P. Loucks, "Modelling and managing the interactions between hydrology, ecology and economics," *Journal of Hydrology*, vol.328, pp. 408-416, Feb. 2006.
- [6] V. Krysanova, F. Hatterman, and F. Wechsung, "Implications of complexity and uncertainty for integrated modelling and impact assessment in river Basins," *Environmental modelling and software*, vol.22, pp. 701-709, Apr. 2006.
- [7] B.D. Fath and W.E. Grant, "Ecosystems as evolutionary complex systems: network analysis of fitness models," *Envir. Modelling and Software*, vol.22, pp. 693-700, Apr. 2006.
- [8] B. Gumbo, L. Forster, and J. Arntzen, "Capacity buiding in water demand management as a key component for attaining millennium development goals," *Physics and Chemistry of the Earth*, vol. 30, pp. 984-992, 2005.

- [9] Y. Chen, D. Zhang, Y. Sun, X. Liu, N. Wang, and H. Savenije, "Water demand management: a case study of the Heihe river basin in China," *Physics and Chemistry of the Earth*, vol.30, pp. 408-419, 2005.
- [10] C. Pahl-Wostl, "The implications of complexity for integrated resources management," *Environmental Modelling and Software*, vol. 22, pp. 561-569, Mar. 2006.
- [11] Y. Carvajal, "Interdisciplinarietà: desafío para la educación superior y la investigación," *Revista Luna Azul*, no. 31, pp. 156-169, Jul.-Dic. 2010.
- [12] A. Dourojeanni, "Políticas públicas para el desarrollo sustentable: la gestión integrada de cuencas," Comisión Económica para América Latina y el Caribe, CEPAL TR-1-228, 1994. [Online]. Disponible: <http://www.eclac.org/publicaciones/xml/9/19759/lcr1399s.pdf>. [Accessed: Ago. 15, 2010].
- [13] M. Falkenmark, "Water management and ecosystems: living with change," *Tac Background Papers*, no. 9, pp. 1-52, 2003.
- [14] H. Hassan and H. E. Dregne, "Natural habitats and ecosystems management in drylands: an overview", *Natural Habitats and ecosystems Management Series*, no. 51, pp. 1-54, May. 1997.
- [15] M. Acreman, "Water and ecology. Linking the earth's ecosystems to its hydrological cycle," *Revista CIDOB d'Afers Internacionals*, no.45-46, pp. 129-144, 1999.
- [16] G. W. Miller, "Integrated concepts in water reuse: managing global water needs," *Desalination*, no. 187, pp. 65-75, Abr. 2006. [Online]. <http://www.desline.com/articoli/6958.pdf>. [Accessed: Mar. 10, 2010].
- [17] P. J. Poor, K. L. Pessagno, and R. W. Paul, "Exploring the hedonic value of ambient water quality: a local watershed-based study," *Ecological Economics*, vol.60, pp. 797-806, Feb. 2006.
- [18] C. B. Barrett, D. R. Lee, and J. G. Mcpeak, "Institutional arrangements for rural poverty reduction and resource conservation," *World Development*, vol.33, no.2, pp.193-197. 2005.
- [19] P. Rogers and A. W. Hall, "Effective water governance," *Tec Background Papers*, no.7, pp. 1-46, Feb. 2003.
- [20] Comisión Económica para América Latina y el Caribe-CEPAL y Global Water Partnership-GWP South America, "Gobernabilidad efectiva del agua en las Américas, un tema crítico," pp. 1-71, 2003. [Online]. Disponible: [http://www.foroagua.org.py/docs/201008091654130.GOBERNABILIDAD%20EFECTIVA%20DEL%20AGUA%20EN%20LAS%20AMERICAS.pdf?docs\\_id=93](http://www.foroagua.org.py/docs/201008091654130.GOBERNABILIDAD%20EFECTIVA%20DEL%20AGUA%20EN%20LAS%20AMERICAS.pdf?docs_id=93). [Accessed: May. 02, 2010].
- [21] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM y Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, "Informe Anual sobre el Estado del Medio Ambiente y los Recursos Naturales Renovables en Colombia: Estudio Nacional del Agua, Relaciones de demanda de agua y

- oferta hídrica," pp. 45-64, 2008. [Online]. Disponible: <https://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/Bvirtual/020962/020962.htm>. [Accessed: Sep. 07, 2012].
- [22] O. Mesa. "¿A dónde va a caer este Globo?, Acerca del futuro de la Tierra," *Avances en Recursos Hidráulicos*, no.14, pp. 97-100, Oct. 2006.
- [23] G. Poveda and L. Salazar. "Annual and interannual (ENSO) variability of spatial scaling properties of vegetation index (NDVI) in Amazonia," *Remote Sensing of Environment*, vol.93, pp 391-401, Nov. 2004.
- [24] Y. Carvajal y M. Quintero, "Tendencias en el uso de indicadores e índices para evaluar la adaptación a la variabilidad y cambio climático," en *Hacia la evaluación de prácticas de adaptación ante la variabilidad y el cambio climático*, P. Aldunce, C. Neri and C. Szlafstein, Ed. Belém, BR: NUMA/UFGA, 2008, pp. 61-71.
- [25] O. Masera, M. Astier y S. López-Ridaura. *Sustentabilidad y manejo de recursos naturales: el marco de evaluación MESMIS*, México: Mundi-Prensa, 2000, pp. 1-110.
- [26] Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo - PNUD, "Colombia rural. Razones para la Esperanza", *Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo - PNUD*, no.63, Dic-Ene 2012. [Online]. Disponible: [http://www.hechosdelcallejon.pnudcolombia.org/63/pdf/razones\\_para\\_la\\_esperanza.pdf](http://www.hechosdelcallejon.pnudcolombia.org/63/pdf/razones_para_la_esperanza.pdf). [Accessed: May. 02, 2012].
- [27] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM, "Monitoreo y seguimiento al fenómeno de la deforestación en Colombia," Programa de Monitoreo de deforestación del IDEAM, 2011. [Online]. Disponible: <http://institucional.ideam.gov.co/jsp/loader.jsf?lServicio=Publicaciones&lTipo=publicaciones&lFuncion=loadContenidoPublicacion&id=1901>. [Accessed: May. 02, 2012].
- [28] Grupo de Investigación en Ingeniería de Recursos Hídricos y Suelos-IREHISA, Corporación BIOTEC y Universidad San Buenaventura-USB, *Diseño y desarrollo de un sistema productivo sostenible en el marco del Plan Bioregión 2019: Caso modelo Microcuenca La Centella en el municipio de Dagua*. Colombia, CL: Grupo IREHISA, Corporación BIOTEC & USB, 2008.
- [29] W. N. Adger and K. Vincent, "Uncertainty in adaptive capacity," *C.R. Geoscience*, no. 337, pp. 399-410, 2005.
- [30] M. Astier y O. Masera. *Documento de trabajo 17. Metodología para la Evaluación de Sistemas de Manejo incorporando Indicadores de Sostenibilidad (MESMIS)*. México: Grupo interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiada, 1997.
- [31] M. Castro, "Indicadores de Desarrollo Sostenible Urbano. Una aplicación para Andalucía" Ph.D. tesis, Universidad de Málaga-Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales, Málaga, España, 2002.

- [32] Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos - OCDE/OECD, "OECD Core Set of Indicators for Environmental Performance Reviews," *Environment Monographs*, no.83, pp. 1-39, 1993.
- [33] L. Segnestam, M. Winograd y A. Farrow, (2000). *Desarrollo de indicadores, lecciones aprendidas de América Central*, Banco Mundial, PNUMA y CIAT, 2000. [Online]. Disponible:<http://www.estrucplan.com.ar/Producciones/entrega.asp?IdEntrega=1895>. [Accessed: Ene. 05, 2011].
- [34] W. Loaiza y Y. Carvajal, "Estrategias para el desarrollo sostenible y la competitividad del Valle del Cauca: el caso Biorregión 2019 y el modelo agroecológico en la microcuenca Centella (municipio de Dagua)", en imprenta.
- [35] A. Reyes, F. Barroso y Y. Carvajal, *Guía básica para la caracterización morfométrica de cuencas hidrográficas*, Cali, Col.: Ed. Univ. del Valle, 2010, pp. 1-90.
- [36] P. Aldunce y P. Debels, "Diseño y descripción del Índice de Utilidad de Prácticas de Adaptación-IUPA," en *Hacia la evaluación de prácticas de adaptación ante la variabilidad y el cambio climático*, P. Aldunce, C. Neri and C. Szlafstein, Ed. Brasil: NUMA/UFPA, 2008, pp. 73-85.
- [37] N. Brooks, W. N. Adger, and P. M. Kelly, "The determinants of vulnerability and adaptative capacity at the national level and the implications for adaptation," *Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions*, vol. 15, no.2, pp. 151-163, 2005.
- [38] M. L. Carreño and O. D. Cardona, "A disaster risk management performance index," *Natural Hazard*, vol.41, no.1, pp. 1-20, 2007.
- [39] R. F. Connor and K. Hiroki, "Development of a method for assessing flood vulnerability," *Water Science and Technology*, vol.51, no.2, pp. 61-67, 2005.
- [40] Grupo de Investigación en Ingeniería de Recursos Hídricos y Suelos-IREHISA, *Informe técnico final: Proyecto Estrategias de competitividad y sostenibilidad de sistemas productivos agrícolas en la microcuenca Centella (Dagua-Valle del Cauca)*. Colombia: 2009, 318p.
- [41] G. Coenders, *Temas avanzados en modelos de ecuaciones estructurales*, España: La Muralla, 2005, pp. 1-200.
- [42] M. Casas, *Los modelos de ecuaciones estructurales y su aplicación en el Índice Europeo de Satisfacción del Cliente*, España: Universidad San Pablo CEU, 2002.
- [43] J. Martínez, J. Majó y M. Casadesús, "Los modelos de ecuaciones estructurales en los estudios de los sistemas de información," presentado en el VIII Congreso de Turismo y Tecnologías de la Información y las Comunicaciones-Turitec, 2010, Girona: Turitec, 2010, pp. 1-16.
- [44] A. Reyes, "Metodología para la integración social del conocimiento en el marco de las Buenas Prácticas Agrícolas del sector hortifrutícola en cinco municipios del Valle del Cauca" M.S. tesis, Universidad del Valle-Facultad de Ingeniería, Cali, Colombia, 2008.