

CUENCA ALTA DEL RÍO CHICAMOCHA

INDICADORES ERA 2016

La Evaluación Regional del Agua – ERA – es un instrumento de planificación basado en **indicadores** definido por el **IDEAM** que permite determinar el estado actual del recurso hídrico de acuerdo a actividades productivas en la cuenca, a la dinámica demográfica y al desarrollo en la cuenca. En términos generales, un **indicador** es la medida cuantitativa o la observación cualitativa que permite identificar cambios en el tiempo y cuyo propósito es determinar que tan bien está funcionando un sistema, dando la voz de alerta sobre la existencia de un problema y permitiendo tomar medidas para solucionarlo, una vez se tenga claridad sobre las causas que lo generaron (IDEAM, 2013, citado de OECD, 2001).

En el **ENA 2010**, se definió un sistema de indicadores hídricos, con seis índices, de orden nacional. Dos de ellos son de régimen natural: Índice de Aridez (**IA**) e Índice de Regulación Hídrica (**IRH**). Los otros cuatro son de intervención antrópica: Índice de Uso del Agua (**IUA**), Índice de Afectación Potencial a la Calidad del Agua (**IACAL**), Índice de Vulnerabilidad Hídrica al desabastecimiento (**IVH**) y el Índice de Calidad del Agua (**ICA**) (IDEAM, 2013, citado de IDEAM, 2010a).

El sistema de **indicadores regionales** está integrado por los seis índices definidos en el ENA 2010 y seis índices que complementan la evaluación en los temas de agua subterránea, condiciones de calidad, amenaza y vulnerabilidad de los sistemas hídricos y del recurso por variabilidad climática y contaminación. Este conjunto de indicadores hídricos da cuenta del estado y dinámica del agua, las presiones, efectos en la disponibilidad de la variabilidad hidrológica y deben aplicarse a cada unidad de análisis definida por la autoridad ambiental. Los indicadores hídricos que conforman el sistema se dividen en **indicadores de sistema hídrico natural e indicadores de intervención antrópica**, tal como se muestra en la *Figura 1*. (IDEAM, 2013).

Para ejecutar la **ERA de la cuenca Alta del Río Chicamocha**, CORPOBOYACÁ escogió un enfoque innovador basado en una modelación hidrológica y en la planificación de recursos hídricos a través de la herramienta **WEAP**, la cual permite simular escenarios de gestión, donde se evidencia la respuesta de la cuenca, como es el caso de la evaluación de escenarios climatológicos como húmedo y seco. El modelo seleccionado se basa en el Sistema de Evaluación y Planificación del Agua - WEAP por sus siglas en inglés, desarrollado por el Instituto del Ambiente de Estocolmo – SEI. En la cuenca alta del río Chicamocha se evaluaron los indicadores de la ERA bajo tres escenarios: seco (año seco construido a partir de precipitaciones mínimas mensuales multianuales), húmedo seco (año húmedo construido a partir de precipitaciones máximas mensuales multianuales) y medio que es la simulación del periodo histórico sobre el cual se construyó el modelo hidrológico.

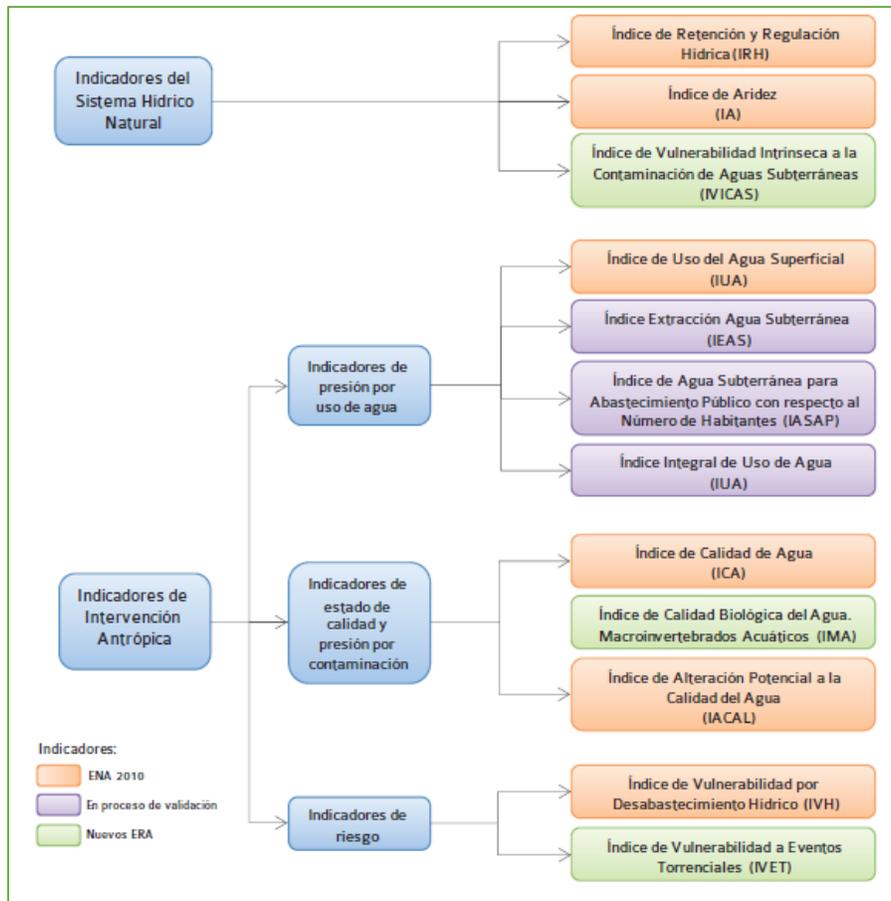


Figura 1. Sistema de Indicadores Hídricos Regionales.

Tomado de: Lineamientos conceptuales y metodológicos para la evaluación regional del agua. IDEAM, 2013.

INDICADORES DEL SISTEMA HÍDRICO NATURAL

1. Índice de Aridez (IA)

“Es una característica cualitativa del clima, que permite medir el grado de suficiencia o insuficiencia de la precipitación para el sostenimiento de los ecosistemas de una región. Identifica áreas deficitarias o de excedentes de agua, calculadas a partir del balance hídrico superficial. Integra el conjunto de indicadores definidos en el ENA 2010” (IDEAM, 2013, citado de IDEAM, 2010a).

$$I_a = \frac{ETP - ETR}{ETP}$$

Donde:

Ia: índice de aridez (adimensional)

ETP: evapotranspiración potencial (mm)

ETR: evapotranspiración real (mm).

A cada rango se le asigna una calificación cuantitativa. Las categorías propuestas se presentan a continuación:

Tabla 1. Categorías para el índice de aridez (IA)

Rango de valores Índice de Aridez	Categoría	CARACTERÍSTICAS
< 0.15		Altos excedentes de agua
0.15 - 0.19		Excedentes de agua
0.20 - 0.29		Entre moderado y excedentes de agua
0.30 - 0.39		Moderado
0.40 - 0.49		Entre moderado y deficitario de agua
0.50 - 0.59		Deficitario de agua
> 0.60		Altamente deficitario de agua

Tomado de: Lineamientos conceptuales y metodológicos para la evaluación regional del agua. IDEAM, 2013.

A continuación, se presentan los resultados del índice de aridez para cada una de las microcuencas que conforman la cuenca alta del río Chicamocha y en cada uno de los escenarios evaluados:

Tabla 2. Índice de Aridez (IA) en la cuenca Alta del Río Chicamocha.

SubCuenca	OFERTA					
	IA húmedo		IA histórico		IA seco	
	Valor	Categoría	Valor	Categoría	Valor	Categoría
R_Jordan	0.11	Altos Excedentes	0.39	Moderado	0.8	Altamente Deficitario
Q_Honda_Sochagota	0.04	Altos Excedentes	0.24	Entre Moderado y excedente	0.81	Altamente Deficitario
R_Chicamocha_tramo2	0.13	Altos Excedentes	0.39	Moderado	0.85	Altamente Deficitario
R_Chicamocha_tramo3	0.19	Excedente de agua	0.44	Entre Moderado y deficitario	0.85	Altamente Deficitario
R_Chiquito	0.11	Altos Excedentes	0.4	Entre Moderado y deficitario	0.84	Altamente Deficitario
R_Chiticuy	0.12	Altos Excedentes	0.32	Moderado	0.7	Altamente Deficitario
R_Chorrera	0.15	Excedente de agua	0.46	Entre Moderado y deficitario	0.86	Altamente Deficitario
R_Cormechoque	0.19	Excedente de agua	0.45	Entre Moderado y deficitario	0.81	Altamente Deficitario
R_Pesca	0.23	Entre Moderado y excedente	0.49	Entre Moderado y deficitario	0.83	Altamente Deficitario
R_de_Piedras	0.2	Entre Moderado y excedente	0.43	Entre Moderado y deficitario	0.77	Altamente Deficitario
R_Sotaquira	0.04	Altos Excedentes	0.19	Excedente de agua	0.76	Altamente Deficitario
R_Surba	0.3	Moderado	0.53	Deficitario	0.82	Altamente Deficitario
R_Tota	0.09	Altos Excedentes	0.39	Moderado	0.83	Altamente Deficitario
R_Tuta	0.05	Altos Excedentes	0.21	Entre Moderado y excedente	0.71	Altamente Deficitario
Q_Toibita	0.05	Altos Excedentes	0.27	Entre Moderado y excedente	0.81	Altamente Deficitario
Q_Aroma	0.06	Altos Excedentes	0.27	Entre Moderado y excedente	0.66	Altamente Deficitario
R_Monquirá	0.3	Moderado	0.54	Deficitario	0.84	Altamente Deficitario

Tomado de: CORPOBOYACÁ ERA, 2016

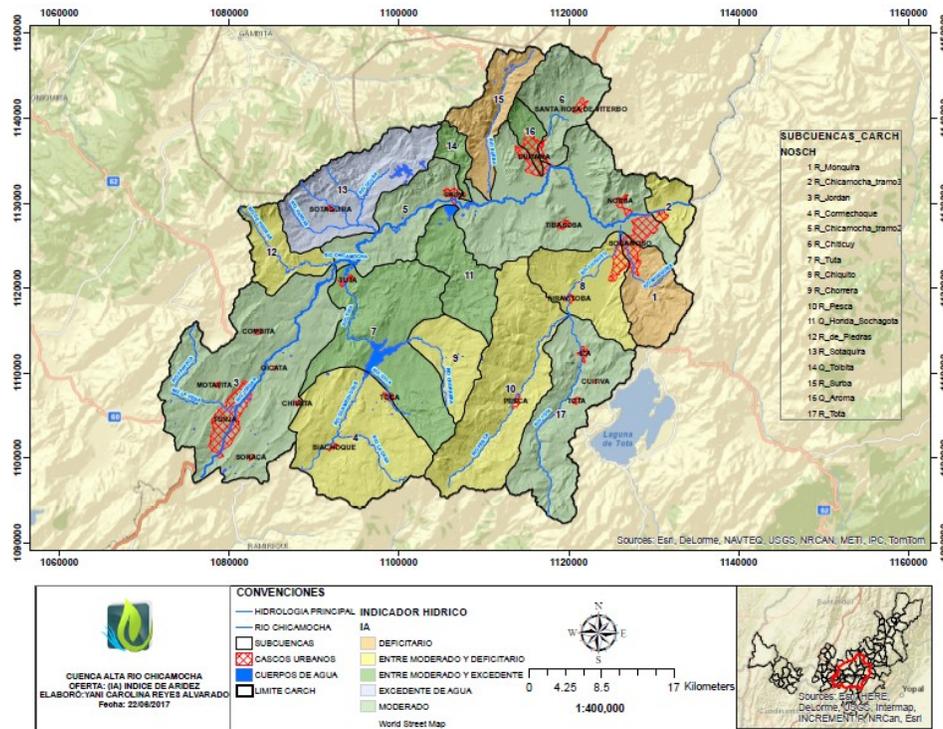


Ilustración 1. IA de la cuenca Alta del Río Chicamocha para el escenario histórico

Tomado de: CORPOBOYACÁ ERA, 2016.

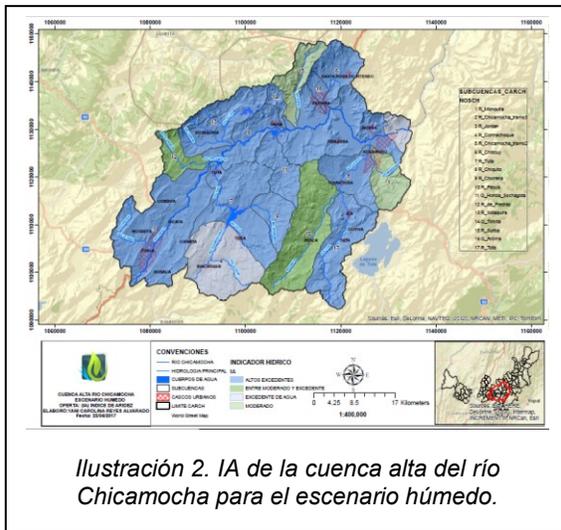


Ilustración 2. IA de la cuenca alta del río Chicamocha para el escenario húmedo.

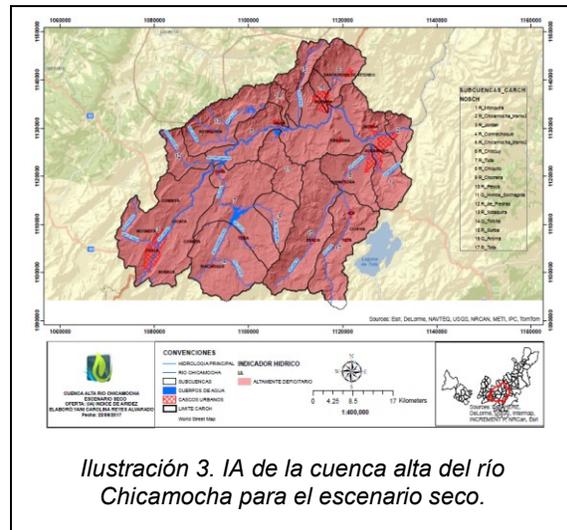


Ilustración 3. IA de la cuenca alta del río Chicamocha para el escenario seco.

De acuerdo a las condiciones climáticas, como la precipitación, la subcuenca que presenta **mayor grado de suficiencia** para el sostenimiento de los ecosistemas y puntualmente de la cobertura vegetal con la que cuenta, es la del **río Sotaquirá**, al establecer una relación de menor presión por la evaporación real producto de contar con vegetación de bosque y páramo (58% de la subcuenca) que favorece la retención de humedad y en algunos casos, menos evapotranspiración.

Por su parte, las subcuencas que tienen un **IA deficitario** son las del **río Surba y Monquirá**, es decir, que para el sostenimiento de alguna de sus coberturas requieren riego. En el escenario en el cual se reduce la precipitación, el IA refleja que los ecosistemas tendrían condiciones altamente deficitarias de agua para toda el área de la cuenca, lo cual demandaría riego y generaría mayor presión sobre el recurso hídrico.

2. Índice de retención y regulación hídrica (IRH)

Este índice mide la capacidad de retención de humedad de las cuencas con base en la distribución de las series de frecuencias acumuladas de los caudales diarios. Este índice se mueve en el rango entre 0 y 1, siendo los valores más bajos los que se interpretan como de menor regulación.

$$IRH = \frac{V_p}{V_t}$$

Donde:

IRH: índice de retención y regulación hídrica

V_p : volumen representado por el área que se encuentra por debajo de la línea de caudal medio en la curva de duración de caudales diarios.

V_t : volumen total representado por el área bajo la curva de duración de caudales diarios.

Los valores obtenidos se agrupan en rangos para facilitar la comparación entre unidades hídricas de análisis. A cada rango se le asigna una calificación cuantitativa. Las cinco categorías propuestas se muestran a continuación:

Tabla 3. Categorías del índice de retención y regulación hídrica (IRH).

Rango de valores IRH	Categoría	CARACTERÍSTICAS
> 0.85	Muy alto	Capacidad de la cuenca para retener y regular muy alta
0.75 - 0.85	Alto	Capacidad de la cuenca para retener y regular alta
0.65 - 0.75	Medio	Capacidad de la cuenca para retener y regular media
0.50 - 0.65	Bajo	Capacidad de la cuenca para retener y regular baja
< 0.50	Muy bajo	Capacidad de la cuenca para retener y regular muy baja

Tomado de: *Lineamientos conceptuales y metodológicos para la evaluación regional del agua. IDEAM, 2013.*

A continuación, se presentan los resultados del índice de retención y regulación hídrica (IRH) para cada una de las microcuencas que conforman la cuenca alta del río Chicamocha y en cada uno de los escenarios evaluados:

Tabla 4. Índice de retención y regulación hídrica en la Cuenca Alta del Río Chicamocha

SubCuenca	OFERTA					
	IRH húmedo		IRH histórico		IRH seco	
	Valor	Categoría	Valor	Categoría	Valor	Categoría
R_Jordan	0.74	MEDIO	0.68	MEDIO	0.92	MUY ALTO
Q_Honda_Sochagota	0.83	ALTO	0.48	MUY BAJO	0.08	MUY BAJO
R_Chicamocha_tramo2	0.79	ALTO	0.63	BAJO	0.34	MUY BAJO
R_Chicamocha_tramo3	0.78	ALTO	0.64	BAJO	0.51	BAJO
R_Chiquito	0.8	ALTO	0.6	BAJO	0.22	MUY BAJO
R_Chiticuy	0.77	ALTO	0.57	BAJO	0.57	BAJO
R_Chorrera	0.83	ALTO	0.35	MUY BAJO	0.95	MUY ALTO
R_Cormechoque	0.84	ALTO	0.62	BAJO	0.31	MUY BAJO
R_Pesca	0.84	ALTO	0.61	BAJO	0.31	MUY BAJO
R_de_Piedras	0.86	MUY ALTO	0.7	MEDIO	0.74	MEDIO
R_Sotaquira	0.74	MEDIO	0.58	BAJO	0.5	MUY BAJO
R_Surba	0.79	ALTO	0.63	BAJO	0.51	BAJO
R_Tota	0.77	ALTO	0.59	BAJO	0.57	BAJO
R_Tuta	0.82	ALTO	0.56	BAJO	0.26	MUY BAJO
Q_Toibita	0.76	ALTO	0.56	BAJO	0.31	MUY BAJO
Q_Aroma	0.5	MUY BAJO	0.77	ALTO	1	MUY ALTO
R_Monquirá	0.81	ALTO	0.64	BAJO	0.61	BAJO

Tomado de: CORPOBOYACÁ ERA, 2016

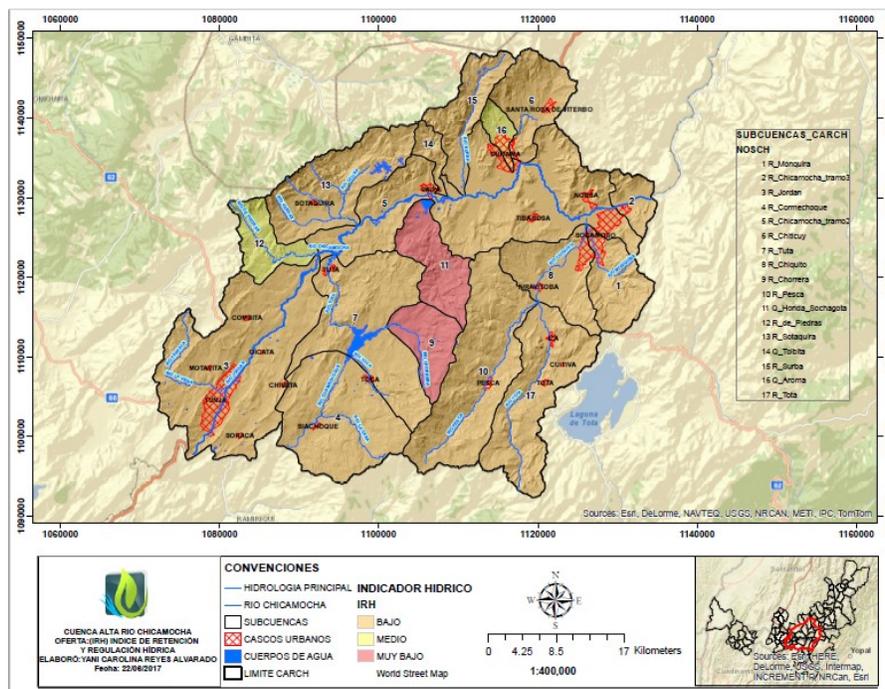


Ilustración 4. IRH de la cuenca Alta del Río Chicamocha para el escenario histórico

Tomado de: CORPOBOYACÁ ERA, 2016.

La mayoría de las subcuencas cuentan con un IRH bajo; las subcuencas de **quebrada Honda y el río La Chorrera presentan un IRH muy bajo**, ambas, con cuerpos de agua como embalse y laguna respectivamente, que atenúan el drenaje rápido de eventos como crecientes súbitas en época seca ofrece almacenamiento y abastecimiento de agua para los usuarios y los usos que la calidad del agua permite. Por otro lado, se destacan las cuencas que tienen condiciones medias y muy altas de regulación hídrica como el caso de las subcuencas del río Jordán, río de Piedras y la quebrada Aroma, lo cual favorece la oferta hídrica en época seca y media.



3. Índice de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación del agua subterránea. (IVICAS)

“Este indicador permite medir la susceptibilidad de un acuífero o sistema acuífero a ser contaminado en función de sus características intrínsecas (Foster y Hirata, 1987; Unesco et ál., 2007), por lo tanto, es un indicador de presión (Unesco et ál., 2007). Este indicador apoya la gestión y la política de protección de las aguas subterráneas. La cantidad, calidad y distribución de los datos básicos determina la calidad y la precisión del indicador”. (IDEAM,2013)

“La vulnerabilidad de aguas subterráneas es una propiedad relativa, no medible, por lo tanto, es adimensional. Generalmente, se emplea la ponderación de parámetros y métodos de calificación para expresar relaciones entre las variables y para reflejar su importancia para la evaluación de vulnerabilidad de las aguas subterráneas. Las principales variables aplicadas en la evaluación de la vulnerabilidad son: recarga, las propiedades de la zona no saturada y suelo, nivel freático y la conductividad hidráulica de la zona saturada” (IDEAM,2013). La vulnerabilidad generalmente se clasifica en tres tipos: baja o insignificante, moderada y alta.

En el marco del convenio ERA CNV 2016 – 019, este indicador no se desarrolló; sin embargo, si fue analizado en el marco del *Plan de Manejo del Sistema Acuífero de Tunja*. El CONSORCIO HIDROBOYACÁ determinó la vulnerabilidad a la contaminación de los

acuíferos utilizando el método GOB. La metodología considera la evaluación de los acuíferos y de la zona no saturada.

El índice de vulnerabilidad GOD, (*Foster, 1987; Foster e Hirata. 1988*) caracteriza la vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos, en función de los siguientes parámetros:

G: Grado de confinamiento hidráulico del acuífero en consideración. Índice por condición de confinamiento del acuífero u ocurrencia del agua subterránea. (Groundwater occurrence)

O: Ocurrencia del sustrato suprayacente (zona no saturada o capas confinantes) en términos de características litológicas y grado de consolidación, que determinan su capacidad de atenuación de contaminantes. (Overall aquifer class)

D: Distancia de agua, determinada como la profundidad al nivel del agua en acuíferos no confinados o la profundidad al techo de los acuíferos confinados. (Depth)

Los resultados de vulnerabilidad para las unidades hidrogeológicas consideradas fueron:

Tabla 5. Vulnerabilidad unidades hidrogeológicas del sistema acuífero de Tunja, definidas en el Plan de Manejo

Acuífero	Índice G	Índice O	Índice D	Índice Vulnerabilidad	Vulnerabilidad
Superficial de la formación Bogotá	0.4	0.6	0.7	0.168	Baja
Superficial de la formación Cacho	1.0	0.75	0.9	0.675	Alta
Superficial de la formación Tiltatá	0.3	0.7	0.7	0.147	Baja
De mayor profundidad Miembro Tierna de la formación Labor y Tierna	1.0	0.75	0.9	0.675	Alta
De mayor profundidad Formación Plaeners	0.9	0.6	0.9	0.486	Media

Tomado de: CONSORCIO HIDROBOYACÁ, 2016

De acuerdo con el mapa de vulnerabilidad resultante, los acuíferos más vulnerables a la contaminación corresponden a los niveles permeables de las formaciones Cacho, Labor y Tierna (Miembro Tierna) y en las zonas topográficamente más bajas, en donde afloran las formaciones Bogotá y Tiltatá, los niveles acuíferos, se encuentran cubiertos por materiales impermeables, y la vulnerabilidad de estos acuíferos, se considera baja.

En términos generales, se encuentra una vulnerabilidad baja en el 47.6% de área evaluada, una vulnerabilidad media de 13.4% y una vulnerabilidad alta en el 39%, predominando el nivel de vulnerabilidad baja.

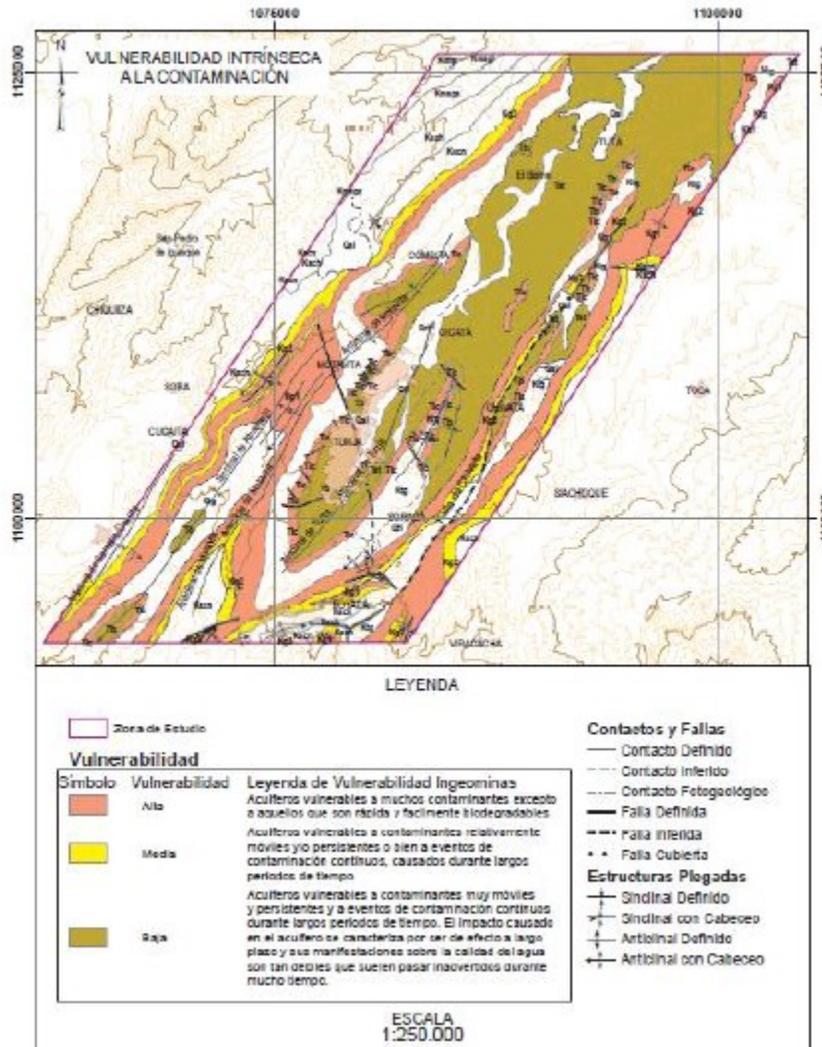


Ilustración 7. Vulnerabilidad intrínseca a la contaminación en el sistema acuífero de Tunja, definida en el Plan de Manejo.

Tomado de: CONSORCIO HIDROBOYACÁ, 2016

INDICADORES DE INTERVENCIÓN ANTRÓPICA

A. Indicadores de presión por uso de agua

4. Índice del uso del agua superficial (IUA)

Cantidad de agua utilizada por los diferentes sectores usuarios, en un periodo determinado (anual, mensual) y unidad espacial de análisis en relación con la oferta hídrica regional disponible (OHRD) neta para las mismas unidades de tiempo y espaciales.

En sentido estricto el indicador debe considerar la oferta hídrica superficial y subterránea en forma unitaria. Sin embargo, mientras se consolida y valida el indicador integral de uso

del agua propuesto en las ERA el IUA representa la presión por el uso sobre la oferta hídrica disponible superficial.

$$IUA = \frac{Dh}{OHRD} * 100$$

Donde:

IUA: índice de uso del agua

Dh: Σ (volumen de agua extraída para usos sectoriales en un periodo determinado).

OHRD: oferta hídrica superficial regional disponible.

Para determinar la OHRD se consideran tres casos:

- Cuando el caudal es estimado por balance hídrico
- Cuando los caudales son deducidos mediante un modelo lluvia-caudal
- Cuando los datos son obtenidos directamente en una estación hidrológica.

La categorización de condición de presión de la demanda sobre la oferta hídrica se define a partir de cinco rangos:

Tabla 6. Rangos y categorías del índice de uso del agua (IUA)

Rango (Dh/Oh)*100 IUA	Categoría IUA	Significado
>50	Muy alto	La presión de la demanda es muy alta con respecto a la oferta disponible
20.01 - 50	Alto	La presión de la demanda es alta con respecto a la oferta disponible
10.01 - 20	Moderado	La presión de la demanda es moderada con respecto a la oferta disponible
1 - 10	Bajo	La presión de la demanda es baja con respecto a la oferta disponible
≤ 1	Muy bajo	La presión de la demanda no es significativa con respecto a la oferta disponible

Tomado de: *Lineamientos conceptuales y metodológicos para la evaluación regional del agua. IDEAM, 2013.*

A continuación, se presentan los resultados del índice de *uso del agua superficial (IUA)* para cada una de las microcuencas que conforman la cuenca alta del río Chicamocha y en cada uno de los escenarios evaluados:

Tabla 7. Índice de Uso del Agua (IUA) en la cuenca alta del río Chicamocha.

SubCuenca	DEMANDA					
	IUA húmedo		IUA histórico		IUA seco	
	Valor	Categoría	Valor	Categoría	Valor	Categoría
R_Jordan	4.19	BAJO	30.86	ALTO	229.1	MUY ALTO
Q_Honda_Sochagota	7.32	BAJO	23.21	ALTO	13.85	MEDIO
R_Chicamocha_tramo2	15.63	MEDIO	41.13	ALTO	417.5	MUY ALTO
R_Chicamocha_tramo3	12.75	MEDIO	31.5	ALTO	280.8	MUY ALTO
R_Chiquito	17.52	MEDIO	44.11	ALTO	400.4	MUY ALTO
R_Chiticuy	9.97	BAJO	20.67	ALTO	289.3	MUY ALTO
R_Chorrera	23.69	ALTO	85.9	MUY ALTO	2181	MUY ALTO
R_Cormechoque	10.66	MEDIO	28.39	ALTO	237	MUY ALTO
R_Pesca	17.15	MEDIO	50.04	MUY ALTO	330.1	MUY ALTO
R_de_Piedras	8.28	BAJO	16.59	MEDIO	52.18	MUY ALTO
R_Sotaquira	20.81	ALTO	56.84	MUY ALTO	189.3	MUY ALTO
R_Surba	15.69	MEDIO	25.95	ALTO	136.3	MUY ALTO
R_Tota	6.91	BAJO	35.07	ALTO	413	MUY ALTO
R_Tuta	8.92	BAJO	26.22	ALTO	131.4	MUY ALTO
Q_Toibita	25.28	ALTO	78.21	MUY ALTO	134.2	MUY ALTO
Q_Aroma	14.49	MEDIO	144	MUY ALTO	2049	MUY ALTO
R_Monquirá	1.16	BAJO	2.12	BAJO	11.06	MEDIO

Tomado de: CORPOBOYACÁ ERA, 2016

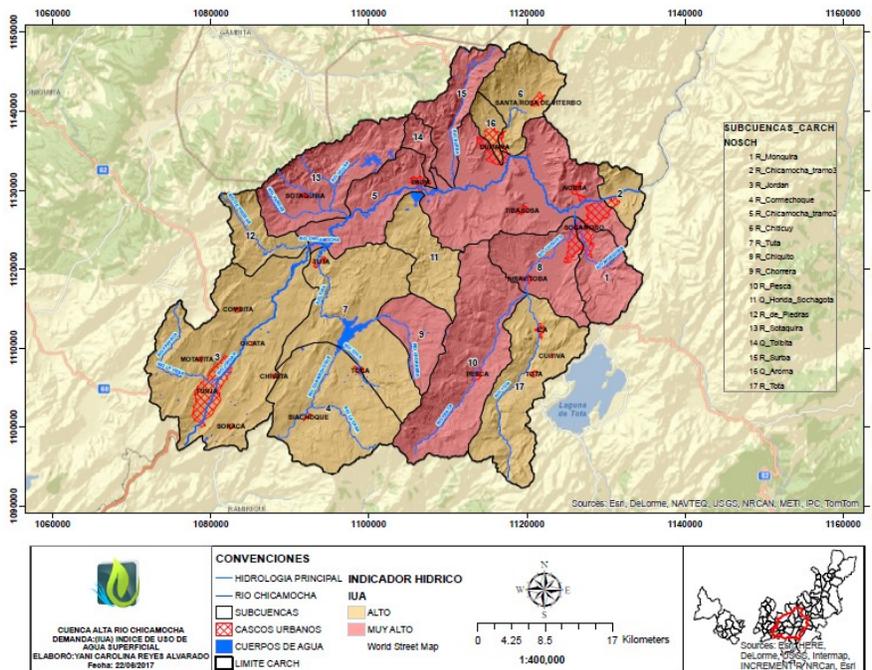


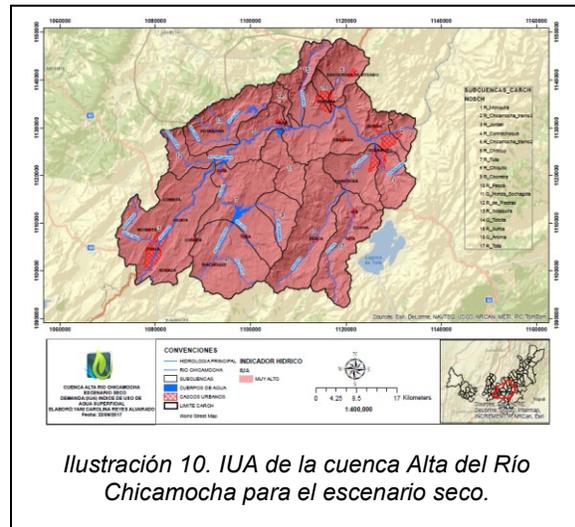
Ilustración 8. IUA de la cuenca Alta del Río Chicamocha para el escenario histórico.

Tomado de: CORPOBOYACÁ ERA, 2016

Como se puede observar, la presión sobre el recurso hídrico en el escenario histórico, es alta en la mayoría de las subcuencas y **muy alta** en las subcuencas del **río Pesca, Chorrera, Sotaquirá, y las quebradas Aroma y Toibita**. La subcuenca que presenta **presión baja** sobre el recurso hídrico es la del **río Monquirá**, por contar con menos demanda respecto a su oferta.

La alta demanda del recurso hídrico identificada, es coherente con las actividades productivas, el desarrollo y la dinámica poblacional en la cuenca, donde prima el uso agrícola. El eje central de desarrollo se centra sobre la corriente principal, sobre el cual se ubican las grandes ciudades y el corredor industrial destacado del departamento de Boyacá.

En cuanto a los escenarios húmedo y seco, se puede observar que en un escenario con mayor precipitación favorecería las condiciones de oferta en la cuenca, en especial en subcuencas como quebrada Honda y el río Tota. Caso opuesto se presenta en condiciones secas, en donde toda el área de la cuenca presenta condiciones críticas y una presión muy alta sobre el recurso hídrico, lo cual requeriría de búsqueda de otras fuentes de agua como el agua subterránea o mayores volúmenes de trasvase.



5. Índice de extracción de aguas subterráneas (IEAS).

Este indicador permite reconocer a nivel anual la intensidad de uso que se hace de la oferta renovable de aguas subterráneas (recarga) (Unesco et ál., 2007, citado por IDEAM, 2013). La unidad de medida es adimensional y se expresa en términos de porcentaje. Es definido así:

$$IEAS = \frac{\text{Extracción total de agua subterránea}}{\text{Recarga}} * 100$$

La escala de aplicación del indicador se refiere a las unidades de agua subterránea (acuíferos) o sistemas de acuíferos. La delimitación de la zona de aplicación requiere una interpretación muy cuidadosa porque comúnmente no coinciden las profundidades y tomas de las captaciones y los límites de las formaciones geológicas (Unesco et ál., 2007, citado por IDEAM, 2013).

Ese indicador solo se estimó para la **subcuenca del río Jordán**, debido a que sólo se cuenta con información de recarga del sistema acuífero de Tunja. A continuación, se presentan los resultados:

Tabla 8. Índice de Extracción de Agua Subterránea (IEAS) en la subcuenca del río Jordán, cuenca Alta del Río Chicamocha.

SubCuenca	DEMANDA					
	IEAS húmedo		IEAS histórico		IEAS seco	
	Valor	Categoría	Valor	Categoría	Valor	Categoría
R_Jordan	6.06	BAJO	6.06	BAJO	6.06	BAJO

Tomado de: CORPOBOYACÁ ERA, 2016

La extracción de agua subterránea frente a la recarga del sistema acuífero de Tunja (calculada en el Plan de Manejo del Sistema Acuífero de Tunja) **es baja**, por lo que presuntamente puede seguir siendo adoptada como fuente alternativa y complementaria de abastecimiento en dado caso que la presión sobre el recurso hídrico superficial llegue a un estado muy alto para la subcuenca del río Jordán. Para los escenarios húmedo y seco, no se pudo simular la variación de la recarga, ya que no se contaba con el modelo distribuido del área de recarga des sistema acuífero.

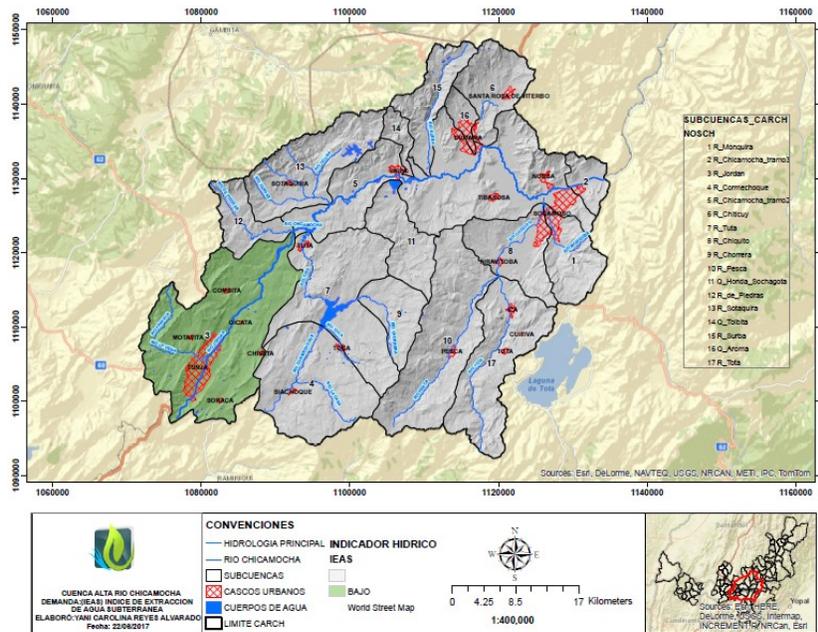


Ilustración 11. IEAS de la cuenca Alta del Río Chicamocha para el escenario histórico.

Tomado de: CORPOBOYACÁ ERA, 2016

6. Índice de aguas subterráneas para abastecimiento público con respecto al número de habitantes (IASAP)

El indicador permite reconocer el uso que se hace del agua subterránea para abastecimiento público per cápita (Unesco et ál., 2007, citado por IDEAM, 2013)

$$IASAP = \frac{\text{Agua subterránea para abastecimiento público}}{\text{No. de habitantes}}$$

A continuación, se presentan los resultados del índice de aguas subterráneas para abastecimiento público con respecto al número de habitantes (IASAP) para cada una de las microcuencas que conforman la cuenca alta del río Chicamocha:

Tabla 9. Índice de Agua Subterránea para Abastecimiento Público con Respecto al Número de Habitantes (IASAP) en la cuenca Alta del Río Chicamocha.

SubCuenca	DEMANDA	
	IASAP	
	Valor	Categoría
R_Jordan	0.003	N/A
Q_Honda_Sochagota		
R_Chicamocha_tramo2	0.01	N/A
R_Chicamocha_tramo3		
R_Chiquito		
R_Chiticuy	0.01	N/A
R_Chorrera		
R_Cormechoque		
R_Pesca		
R_de_Piedras		
R_Sotaquirá	0.1	N/A
R_Surba		
R_Tota		
R_Tuta	0.04	N/A
Q_Toibita		
Q_Aroma		
R_Monquirá		

Tomado de: CORPOBOYACÁ ERA, 2016

De acuerdo con los resultados obtenidos, se observa que la demanda de agua subterránea **es mayor** para el caso de la subcuenca del **río Sotaquirá**. En subcuencas como el río Jordán, debido a la presencia del casco urbano de Tunja, el valor es menor; además cuenta con otras fuentes de abastecimiento y por ende se toma el dato de la población total para calcular esta tasa.

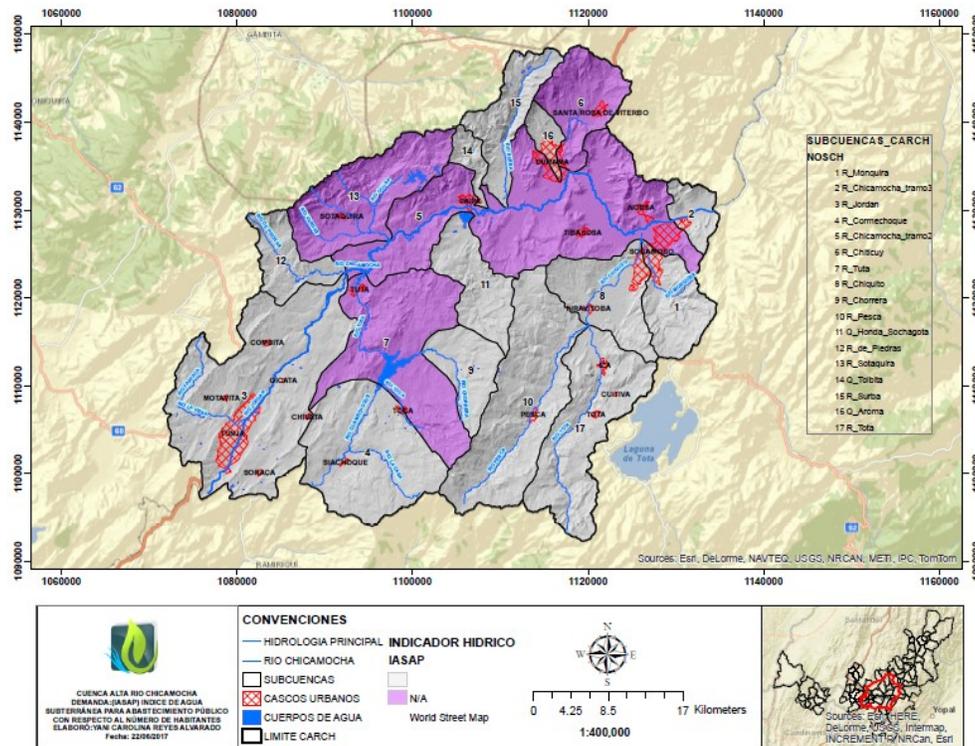


Ilustración 12. IASAP de la cuenca Alta del Río Chicamocha para el escenario histórico.

Tomado de: CORPOBOYACÁ ERA, 2016

7. Índice integral de uso de agua (IIUA)

Este índice permite determinar la presión por uso en relación con la oferta disponible de aguas superficiales y la oferta renovable de aguas subterráneas (IDEAM, 2013).

$$IIUA = \frac{D}{O_{rg} + O_d}$$

Donde:

D : demanda total sectorial

O_{rg} : oferta renovable de aguas subterráneas (recarga)

O_d : oferta agua superficial disponible

Para la aplicación de este indicador no se tuvo en cuenta exclusivamente la demanda sectorial, sino la demanda que fue calculada por tipos de uso. Este indicador solo se calcula para la subcuenca del río Jordán, debido a que solo se cuenta con información del Sistema Acuífero de Tunja.

A continuación, se presentan los resultados del índice integral de uso de agua (IIUA) para la subcuenca del río Jordán, en la cuenca alta del río Chicamocha:

Tabla 10. Índice integral de uso de agua (IIUA) en la subcuenca del río Jordán, cuenca Alta del Río Chicamocha

SubCuenca	DEMANDA					
	IIUA		IIUA		IIUA	
	Valor	Categoría	Valor	Categoría	Valor	Categoría
R_Jordan	5.41	BAJO	39.87	ALTO	213.7	MUY ALTO

Tomado de: CORPOBOYACÁ ERA, 2016

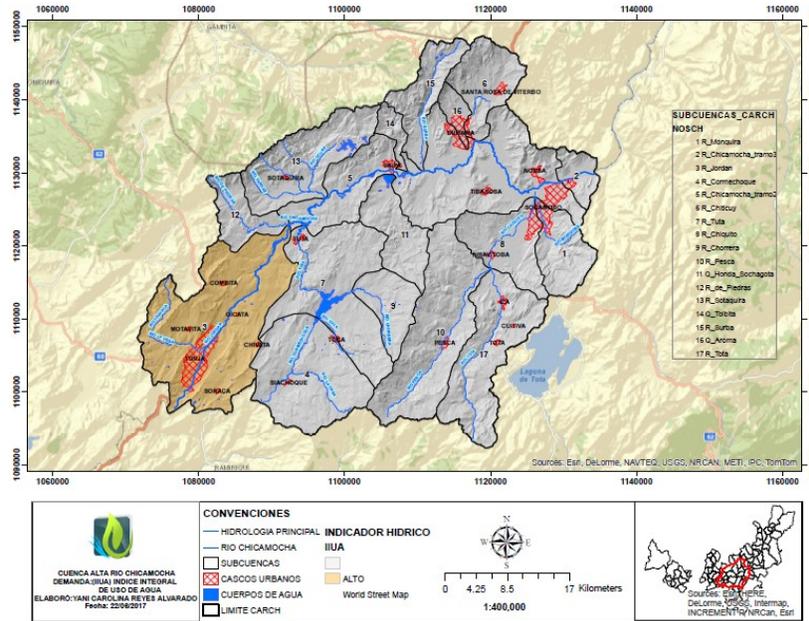


Ilustración 13. IIUA de la cuenca Alta del Río Chicamocha para el escenario histórico.

Tomado de: CORPOBOYACÁ ERA, 2016.



Ilustración 14. IIUA de la cuenca Alta del Río Chicamocha para el escenario húmedo.

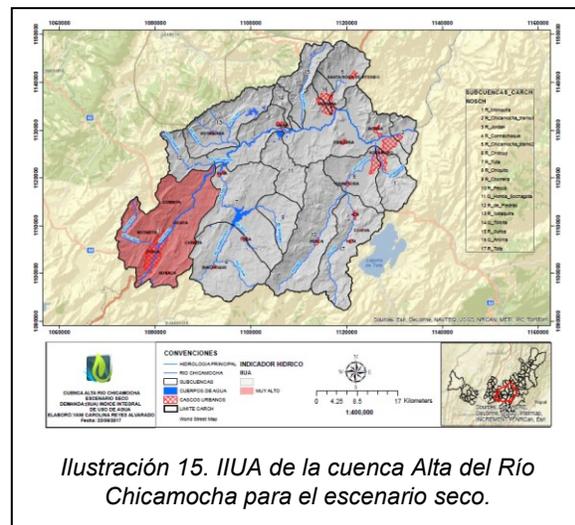


Ilustración 15. IIUA de la cuenca Alta del Río Chicamocha para el escenario seco.

Se puede concluir que a pesar de que se reduce la presión sobre el recurso hídrico superficial, al emplear fuentes de agua subterránea en la subcuenca del río Jordán, no se cambia la categoría bajo los diferentes escenarios; es decir, para el escenario histórico, se presenta una presión alta sobre el recurso hídrico, la cual pasa a ser muy alta en el escenario seco y baja en el escenario húmedo.

B. Indicadores de estado de la calidad de agua y presión por contaminación

8. Índice de calidad de agua (ICA)

El índice de calidad físico-química del agua (ICA) es un indicativo de las condiciones de calidad física, química y microbiológica de las corrientes y cuerpos de agua. El indicador permite identificar problemas de contaminación en un punto determinado, para un intervalo de tiempo específico. Permite representar el estado en general del agua y las posibilidades o limitaciones para determinados usos en función de variables seleccionadas, mediante ponderaciones y agregación de variables físicas, químicas y microbiológicas (IDEAM, 2010^a, citado por IDEAM, 2013).

El índice de calidad del agua es el valor numérico que califica, en una de cinco categorías, la calidad del agua de una corriente superficial con base en las mediciones obtenidas para un conjunto de seis o siete variables, registradas en una estación de monitoreo j en el tiempo t .

$$ICA = \sum_{i=1}^n w_i * l_i$$

Donde:

l_i : valor calculado de la variable i (obtenido de aplicar la curva funcional o ecuación correspondiente)

w_i : ponderación.

El índice de calidad del agua es una expresión agregada y simplificada, sumatoria aritmética equiponderada de varias variables. Para el nivel regional se propone calcular el ICA con siete variables, es decir, con inclusión de un parámetro microbiológico.

Tabla 11. Variables involucradas en el cálculo del ICA (7)

ICA (7 variables - Incluye coliformes fecales)		
Variable	Expresada como	Peso de importancia
Oxígeno disuelto, OD	% saturación	0.16
Sólidos en suspensión	mg/l	0.14
Demanda química de oxígeno, DQO	mg/l	0.14
Conductividad eléctrica	$\mu S/cm$	0.14
Relación N total/P total	(mg/l)/(mg/l)	0.14
pH	Unidades de pH	0.14
Coliformes fecales	UFC/100 ml	0.14

Tomado de: Lineamientos conceptuales y metodológicos para la evaluación regional del agua. IDEAM, 2013.

Las categorías para los descriptores de calidad del indicador se presentan a continuación:

Tabla 12. Descriptores de calidad del ICA

Categorías de valores que puede tomar el indicador	Calificación de la calidad del agua	Señal de alerta
0,00 – 0,25	Muy mala	Rojo
0,26 – 0,50	Mala	Naranja
0,51 – 0,70	Regular	Amarillo
0,71 – 0,90	Aceptable	Verde
0,91 – 1,00	Buena	Azul

Tomado de: Lineamientos conceptuales y metodológicos para la evaluación regional del agua. IDEAM, 2013.

A continuación, se presentan los resultados del índice de calidad de agua (ICA) para cada una de las microcuencas que conforman la cuenca alta del río Chicamocha y en cada uno de los escenarios evaluados:

Tabla 13. Índice de calidad de agua (ICA), cuenca Alta del Río Chicamocha

MicroCuenca	CALIDAD					
	ICA húmedo		ICA histórico		ICA seco	
	Valor	Categoría	Valor	Categoría	Valor	Categoría
R_Jordan	0.51	Regular	0.41	Mala	0.39	Mala
Q_Honda_Sochagota	0.53	Regular	0.56	Regular	0.56	Regular
R_Chicamocha_tramo2	0.51	Regular	0.4	Mala	0.3	Mala
R_Chicamocha_tramo3	0.52	Regular	0.48	Mala	0.33	Mala
R_Chiquito	0.7	Aceptable	0.71	Aceptable	0.67	Regular
R_Chiticuy	0.73	Aceptable	0.78	Aceptable	0.75	Aceptable
R_Chorrera	0.61	Regular	0.62	Regular	0.6	Regular
R_Cormechoque	0.7	Aceptable	0.71	Aceptable	0.68	Regular
R_Pesca	0.69	Regular	0.68	Regular	0.63	Regular
R_de_Piedras	0.67	Regular	0.67	Regular	0.68	Regular
R_Sotaquira	0.78	Aceptable	0.81	Aceptable	0.8	Aceptable
R_Surba	0.82	Aceptable	0.84	Aceptable	0.85	Aceptable
R_Tota	0.76	Aceptable	0.73	Aceptable	0.69	Regular
R_Tuta	0.55	Regular	0.53	Regular	0.49	Mala
Q_Toibita	0.78	Aceptable	0.79	Aceptable	0.77	Aceptable
Q_Aroma	0.74	Aceptable	0.75	Aceptable	0.65	Regular
R_Monquirá	0.72	Aceptable	0.75	Aceptable	0.74	Aceptable

Tomado de: CORPOBOYACÁ ERA, 2016

El índice de calidad del agua para las subcuencas aferentes del río principal de la cuenca Alta Río Chicamocha, son regular y aceptable, a excepción de casos puntuales como el río Jordán que recibe vertimientos de municipios de Tunja, Motavita, Cómbita y Soracá a través de sus afluentes o directamente. También el cauce principal del río Chicamocha en sus dos tramos, presenta **mala calidad del agua**, producto de vertimientos de los municipios como Nobsa, Paipa, Duitama, Sogamoso y Tibasosa (a través del canal de Vargas), además de vertimientos de tipo industrial que drenan al canal de Vargas y al canal Principal, el cual, llega al río Chicamocha en el tramo 3.

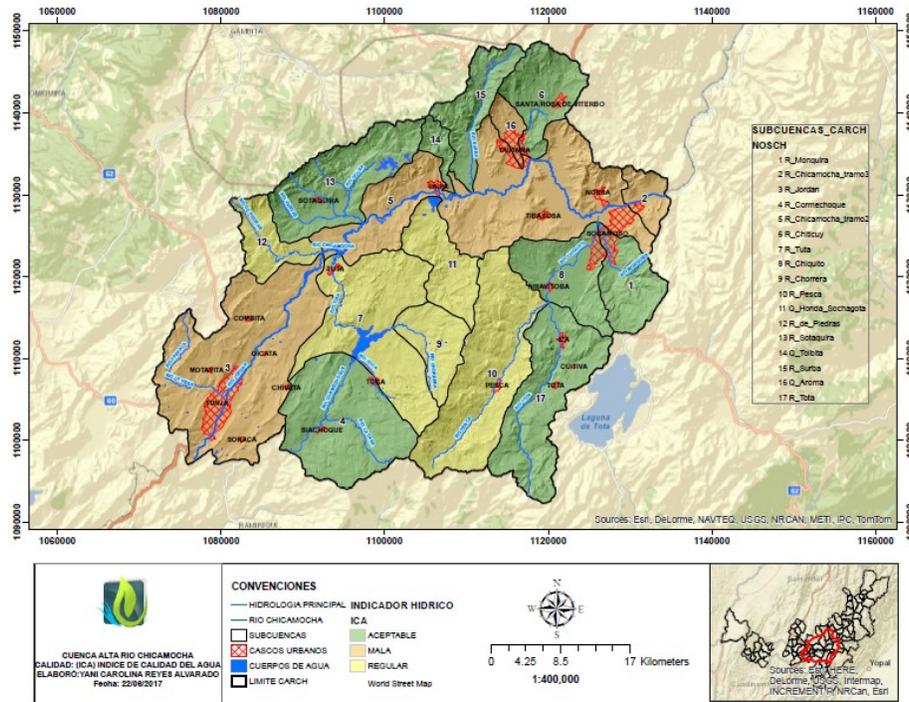


Ilustración 16. ICA de la cuenca Alta del Río Chicamocha para el escenario histórico.

Tomado de: CORPOBOYACÁ ERA, 2016

Evaluando los escenarios húmedo y seco, se evidencia que, bajo un escenario húmedo, al presentarse un mayor factor de dilución por aumento del volumen de agua, se favorecen las condiciones de calidad del agua, para el río Jordán y los tramos 2 y 3 del río Chicamocha, pasa de mala calidad a calidad regular. Por su parte, en el escenario seco, se deteriora la calidad del agua del río Chicamocha y sus afluentes como el río Tuta, con mala calidad; además, **se deteriora la calidad del agua del río Cormechoque, Tota, Chiquito, y la quebrada Aroma**, pasando a tener regular calidad del agua.



Ilustración 17. ICA de la cuenca Alta del Río Chicamocha para el escenario húmedo.

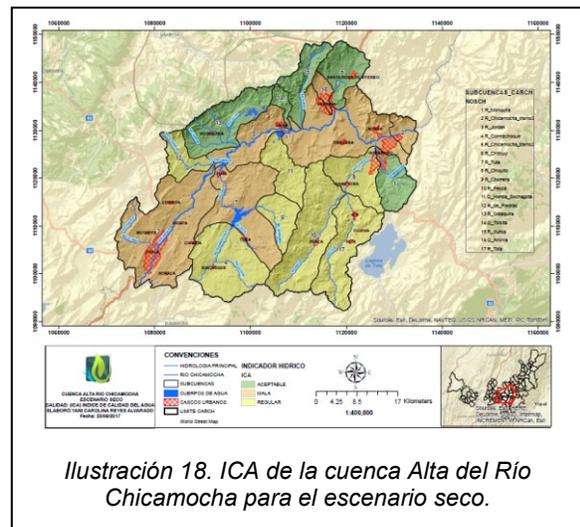


Ilustración 18. ICA de la cuenca Alta del Río Chicamocha para el escenario seco.

9. Índice de calidad biológica de agua. Macroinvertebrados acuáticos (IMA)

Los macroinvertebrados acuáticos (MA) son uno de los grupos biológicos más ampliamente utilizados como bioindicadores de calidad de agua debido a sus peculiares características: gran diversidad de especies con diferente tolerancia a los niveles de contaminación; escasa movilidad, no huyen ante eventos de contaminación; su muestreo e identificación es relativamente fácil. Según Roldan (1999), una de las comunidades biológicas que tiene una alta capacidad indicadora de la calidad del agua de los ecosistemas lóticos (ríos), son los MA o fauna béntica. Estos organismos viven en el fondo del lecho de los ríos, fijados a este o permanecen en sus sedimentos; son animales con tamaños mayores a 0.5 mm, observables a simple vista, que viven por lo menos parte de su ciclo de vida asociados con el sustrato del fondo.

El método Biological Monitoring Working Party (BMWP) ha sido adaptado para Colombia por Gabriel Roldan BMWP/Col (2003), como una primera aproximación para evaluar estos ecosistemas acuáticos. El método solo requiere la identificación taxonómica de los organismos hasta nivel de familia y los datos son cualitativos (presencia/ausencia). El puntaje oscila entre 1 y 10, de acuerdo con la tolerancia de los diferentes grupos a la contaminación, donde 10 son familias sensibles (P. ej. Perlidae, Oligoneuriidae, entre otras) que no toleran la contaminación, y 1 son familias que viven en aguas muy contaminadas (p. ej., Tubificidae). La suma de los puntajes de todas las familias presentes proporciona el puntaje total BMWP/Col. Cuanto mayor es la puntuación final, menor es el grado de contaminación ambiental.

Tabla 14. Valoración de la calidad biológica del agua por el IMA

CLASE	CALIDAD	BMWP/Col	SIGNIFICADO	COLOR
I	Buena	>150, 101 -120	Aguas muy limpias	AZUL
II	Aceptable	61 – 100	Se evidencian efectos de la contaminación	VERDE
III	Dudosa	36 – 60	Aguas moderadamente contaminadas	AMARILLO
IV	Crítica	16 – 35	Aguas muy contaminadas	NARANJA
V	Muy crítica	< 15	Aguas fuertemente contaminadas, situación crítica	ROJO

Tomado de: Lineamientos conceptuales y metodológicos para la evaluación regional del agua. IDEAM, 2013.

Para cada una de las subcuencas y unidades de análisis, se obtuvo el índice de calidad del agua (IMA), de acuerdo a los muestreos realizados por INGFOCOL en el 2016, en el marco del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico de la cuenca Alta y Media del Río Chicamocha. El IMA para los escenarios húmedo y seco no se simuló, debido a que la herramienta de modelación no tiene el módulo de macroinvertebrados; en su lugar, se tomaron los datos de los muestreos realizados en los meses de octubre y febrero por INGFOCOL (2016) para el periodo húmedo y seco respectivamente. Los resultados se presentan a continuación:

Tabla 15. Índice de calidad biológica de agua - Macroinvertebrados acuáticos (IMA), en la cuenca Alta del Río Chicamocha.

MicroCuenca	CALIDAD					
	IMA húmedo		IMA histórico		IMA seco	
	Valor	Categoría	Valor	Categoría	Valor	Categoría
R_Jordan	44	Dudosa	35	Crítica	14	Muy crítica
Q_Honda_Sochagota	1	Muy crítica			1	Muy crítica
R_Chicamocha_tramo2	88	Aceptable	39	Dudosa	44	Dudosa
R_Chicamocha_tramo3	18	Crítica	9	Muy crítica	5	Muy crítica
R_Chiquito						
R_Chiticuy	52	Dudosa	7	Muy crítica	17	Crítica
R_Chorrera	49	Dudosa	26	Crítica	15	Muy crítica
R_Cormecheque	49	Dudosa	26	Crítica	15	Muy crítica
R_Pesca						
R_de_Piedras	25	Crítica	11	Muy crítica	3	Muy crítica
R_Sotaquirá	54	Dudosa	32	Crítica	13	Muy crítica
R_Surba	12	Muy crítica	19	Crítica	14	Muy crítica
R_Tota						
R_Tuta	49	Dudosa	26	Crítica	15	Muy crítica
Q_Toibita						
Q_Aroma						
R_Monquirá						

Tomado de: CORPOBOYACÁ ERA, 2016

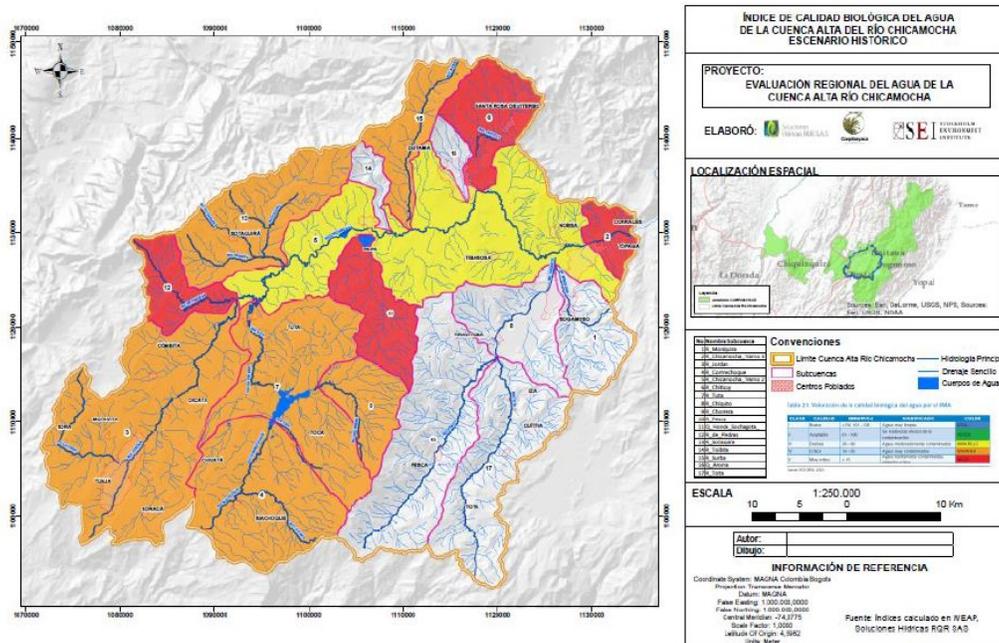
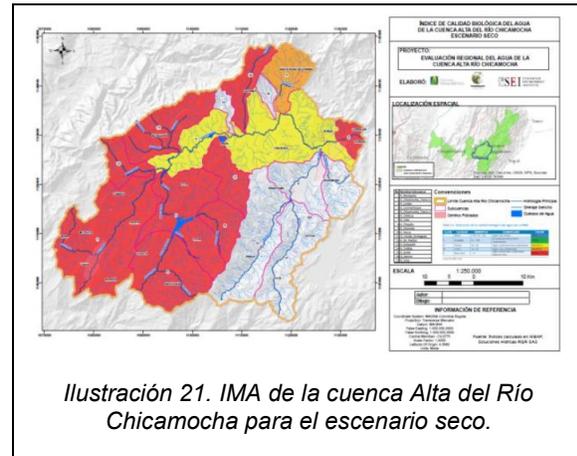
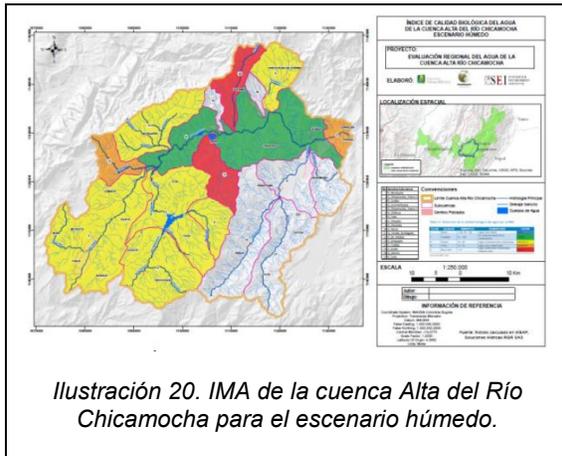


Ilustración 19. IMA de la cuenca Alta del Río Chicamocha para el escenario histórico.

Tomado de: CORPOBOYACÁ ERA, 2016.

Para el escenario histórico, los macroinvertebrados presentes en las secciones transversales de algunos afluentes que desembocan en el río Chicamocha corresponden a aguas muy contaminadas (críticas) y fuertemente contaminadas (muy críticas), destacándose estas últimas, el río Piedras y Chiticuy. Para el río Chicamocha, en el tramo 2

presenta mejores condiciones propias de aguas moderadamente contaminadas y en el tramo 3 pasa a ser fuertemente contaminadas, por los vertimientos y la recepción de las aguas del canal Vargas y el canal principal. Esta caracterización denota que la salud del río Chicamocha y los puntos muestreados de los afluentes referidos, no es favorable para el desarrollo de la vida acuática con mayor diversidad y exigencias en términos de calidad, conectividad y red trófica.



Para el periodo húmedo, se evidencia condiciones mejores de calidad biológica, pasando en general de aguas muy contaminadas a moderadamente contaminadas. Lo opuesto se presenta en el periodo seco, en el cual la mayoría presenta condiciones muy críticas.

10. Índice de alteración potencial de la calidad del agua (IACAL)

Este indicador tiene como propósito determinar las amenazas potenciales por alteración de la calidad en las unidades de análisis (IDEAM, 2013).

El Índice se puede generar a escala municipal en centros urbanos y agregar para unidades hidrográficas de análisis de acuerdo con la zonificación en las regiones. Las categorías del descriptor se presentan a continuación:

Tabla 16. Categoría y descriptor del IACAL.

IACAL	
Promedio Categoría (NT + PT + SST + DBO + (DQO - DBO) / 5	
Categoría	Valor
Baja	1
Moderada	2
Media Alta	3
Alta	4
Muy Alta	5

Tomado de: Lineamientos conceptuales y metodológicos para la evaluación regional del agua. IDEAM, 2013.

A continuación, se presenta el esquema que sintetiza el proceso para obtener las estimaciones de carga contaminante y generación del IACAL, elaborado para el Estudio Nacional del Agua 2010 y modificado para la ERA:

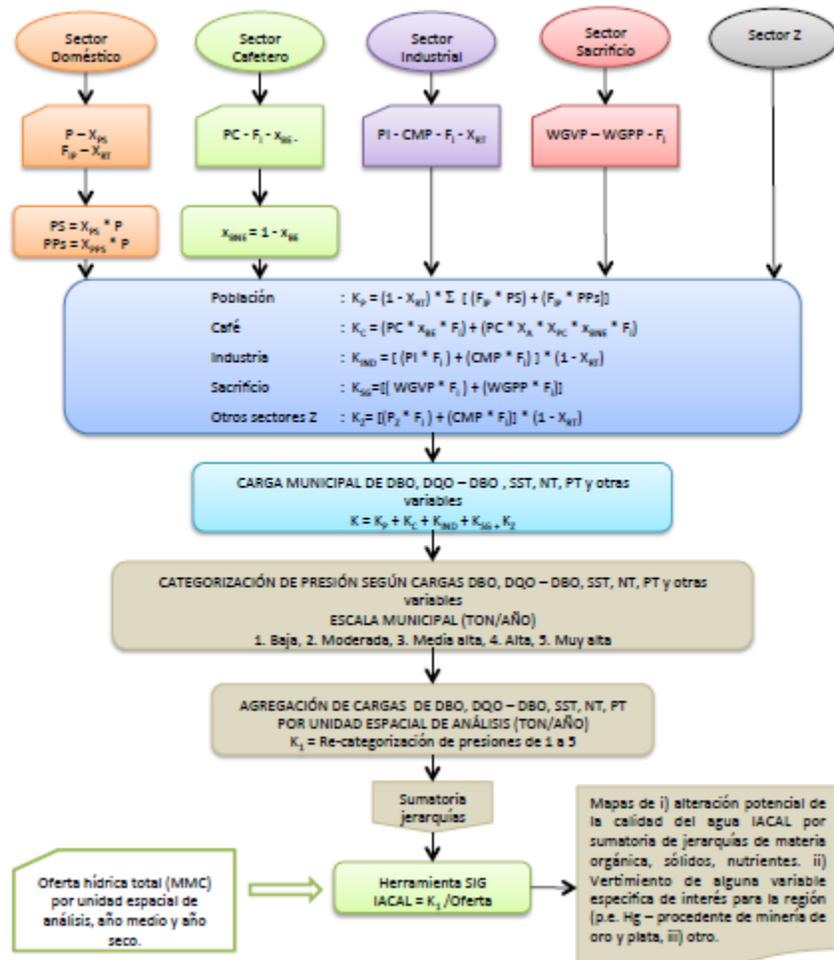


Figura 2. Diagrama metodológico para procesamiento de información para el IACAL.

Tomado de: Lineamientos conceptuales y metodológicos para la evaluación regional del agua. IDEAM, 2013.

A nivel municipal, se evidencia un potencial de alteración de la calidad del agua en municipios como Tunja, Duitama y Sogamoso, debido principalmente a la carga contaminante por vertimientos de aguas residuales domesticas y sacrificio de ganado, y seguido de la carga potencial a aportar por parte del sector industrial, en especial ara parámetros como DBO y DQO.

Luego de definirse a escala municipal, se expresa a nivel de subcuenca de acuerdo al área ocupada por el municipio, obteniendo que se atenúa el indicador para el tramo 2 del río Chicamocha al incluir otros municipios con menor potencial de contaminación. En contraste, se destaca el valor de afectación potencial para las subcuencas río Surba y las quebradas Toibita y Aroma por influencia del municipio de Duitama, y el río Monquirá por influencia del municipio de Sogamoso. Sin embargo, a nivel de corrientes sólo aplica para el caso de la subcuenca de la quebrada Aroma en su parte baja, donde recibe los vertimientos del

municipio de Duitama; en el caso de Sogamoso, afecta directamente la calidad del agua del río Chicamocha y en el caso de Tunja, el afectado es el río Jordán.

Tabla 17. Índice de Alteración Potencial a la calidad del agua (IACAL), en la cuenca Alta del Río Chicamocha.

MicroCuenca	CALIDAD			
	IACAL histórico		IACAL seco	
	Valor	Categoría	Valor	Categoría
R_Jordan	2.48	Media Alta	1.80	Moderada
Q_Honda_Sochagota	2.61	Media Alta	2.15	Media Alta
R_Chicamocha_tramo2	2.48	Media Alta	2.13	Media Alta
R_Chicamocha_tramo3	2.69	Media Alta	2.27	Media Alta
R_Chiquito	2.58	Media Alta	2.10	Media Alta
R_Chiticuy	1.20	Moderada	1.45	Moderada
R_Chorrera	2.18	Media Alta	1.58	Moderada
R_Cormechoque	1.76	Moderada	1.16	Moderada
R_Pesca	2.46	Media Alta	1.86	Moderada
R_de_Piedras	1.60	Moderada	1.00	Baja
R_Sotaquira	1.61	Moderada	1.01	Moderada
R_Surba	3.73	Alta	4.20	Muy Alta
R_Tota	1.63	Moderada	1.06	Moderada
R_Tuta	1.95	Moderada	1.35	Moderada
Q_Toibita	3.00	Media Alta	2.60	Media Alta
Q_Aroma	4.00	Alta	4.80	Muy Alta
R_Monquirá	4.00	Alta	3.80	Alta

Tomado de: CORPOBOYACÁ ERA, 2016.

De esta forma, se obtienen valores críticos con IACAL de categoría Muy Alta para el escenario seco en las subcuencas río Surba y la quebrada Aroma y de categoría Alta en la subcuenca del río Monquirá. En el escenario histórico, el IACAL mejora en las subcuencas río Surba y quebrada el Aroma y se mantiene en el río Monquirá.

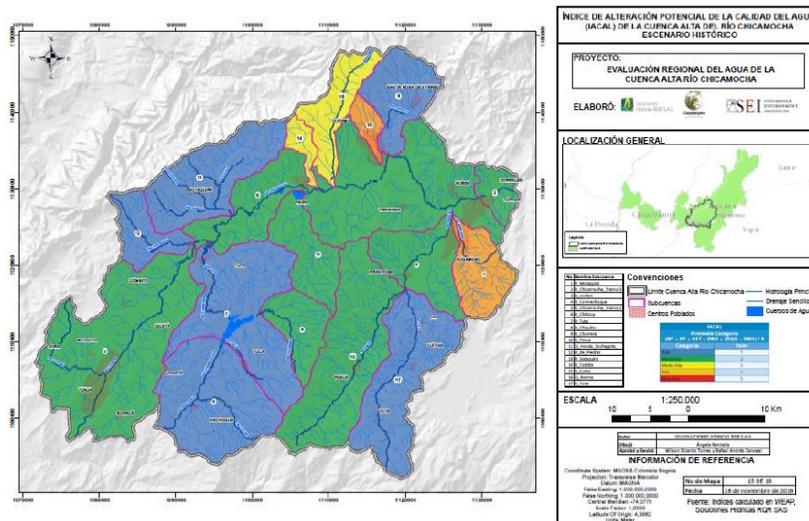


Ilustración 22. IACAL de la cuenca Alta del Río Chicamocha para el escenario histórico.

Tomado de: CORPOBOYACÁ ERA, 2016.

A partir de estos resultados, se puede observar que el área más vulnerable es dónde se ubica el corredor industrial, los grandes centros urbanos y donde se encuentran subcuencas aferentes del Río Chicamocha que cuentan con baja capacidad de dilución para la carga potencial aportada. Sin embargo, en alguno de estos casos, los vertimientos no se hacen sobre estas subcuencas, sino a la red de canales de desagüe y vertimientos, concentradas en el canal de Vargas y el canal Principal, o directamente al río Chicamocha. Por ello, se presume que los niveles de presión sobre la calidad del recurso hídrico con afectación potencial se trasladarán al río Chicamocha.

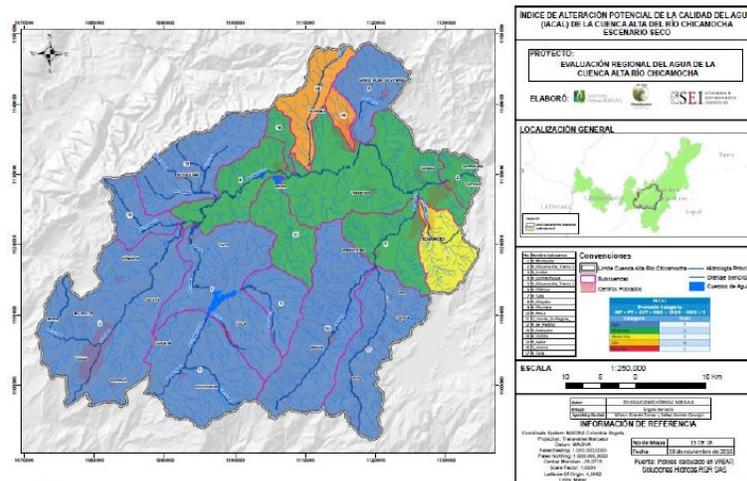


Ilustración 23. IACAL de la cuenca Alta del Río Chicamocha para el escenario Seco.

Tomado de: CORPOBOYACÁ ERA, 2016.

C. Indicadores de riesgo

11. Índice de vulnerabilidad por desabastecimiento hídrico (IVH)

Grado de fragilidad del sistema hídrico para mantener una oferta para el abastecimiento de agua que, ante amenazas – como periodos largos de estiaje o eventos como el Fenómeno cálido del Pacífico (El Niño) –, podría generar riesgos de desabastecimiento. El IVH se determina a través de una matriz de relación de rangos del índice de regulación hídrica (IRH) y el índice de uso de agua (IUA) (IDEAM, 2013).

Tabla 18. Matriz de relación para categorizar el índice de vulnerabilidad al desabastecimiento (IVH).

Categorías Índice de vulnerabilidad al desabastecimiento (IVH)		
Índice de uso de agua	Índice de regulación	Categoría Vulnerabilidad
Muy bajo	Alto	Muy bajo
Muy bajo	Moderado	Bajo
Muy bajo	Bajo	Medio
Muy bajo	Muy bajo	Medio
Bajo	Alto	Bajo
Bajo	Moderado	Bajo
Bajo	Bajo	Medio
Bajo	Muy bajo	Medio
Medio	Alto	Medio
Medio	Moderado	Medio
Medio	Bajo	Alto
Medio	Muy bajo	Alto
Alto	Alto	Medio
Alto	Moderado	Alto
Alto	Bajo	Alto
Alto	Muy bajo	Muy alto
Muy alto	Alto	Medio
Muy alto	Moderado	Alto
Muy alto	Bajo	Alto
Muy alto	Muy bajo	Muy alto

Tomado de: IDEAM ENA, 2010.

A continuación, se presentan los resultados del índice de vulnerabilidad por desabastecimiento hídrico (IVH) para cada una de las microcuencas que conforman la cuenca alta del río Chicamocha y en cada uno de los escenarios evaluados:

Tabla 19. Índice de vulnerabilidad por desabastecimiento hídrico (IVH), en la cuenca Alta del Río Chicamocha.

SubCuenca	RIESGO		
	IVH húmedo	IVH histórico	IVH seco
	Categoría	Categoría	Categoría
R_Jordan	Medio	Medio	Medio
Q_Honda_Sochagota	Bajo	Muy Alto	Alto
R_Chicamocha_tramo2	Medio	Alto	Muy Alto
R_Chicamocha_tramo3	Medio	Alto	Alto
R_Chiquito	Medio	Alto	Muy Alto
R_Chiticuy	Bajo	Alto	Alto
R_Chorrera	Medio	Muy Alto	Medio
R_Cormechoque	Medio	Alto	Muy Alto
R_Pesca	Medio	Alto	Muy Alto
R_de_Piedras	Muy bajo	Medio	Alto
R_Sotaquira	Medio	Alto	Muy Alto
R_Surba	Medio	Alto	Alto
R_Tota	Bajo	Alto	Alto
R_Tuta	Bajo	Alto	Muy Alto
Q_Toibita	Medio	Alto	Muy Alto
Q_Aroma	Alto	Medio	Medio
R_Monquirá	Bajo	Medio	Alto

Tomado de: CORPOBOYACÁ ERA, 2016.

Como se puede observar, para el periodo histórico, el índice de vulnerabilidad por desabastecimiento hídrico es alto para la mayoría de las subcuencas, y **muy alto** para las subcuencas **río Chorrera y quebrada Honda**; es importante resaltar que estas subcuencas que cuentan con embalses o lagos, cuentan con una medida de adaptación a las condiciones de vulnerabilidad alta por desabastecimiento hídrico, lo cual favorece la cobertura de las demandas de los usuarios de las subcuencas.

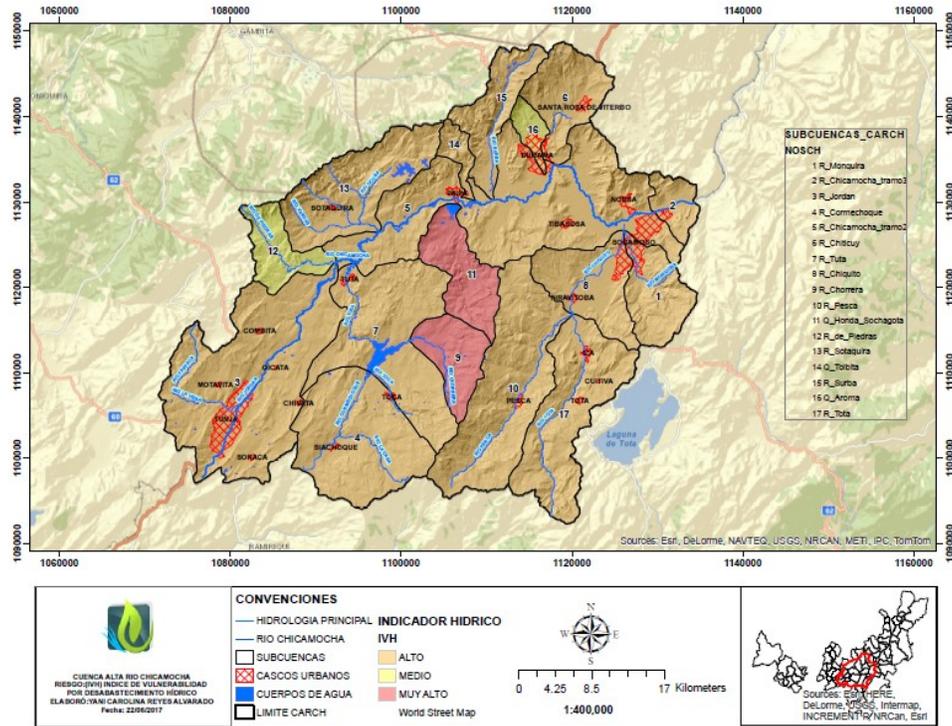


Ilustración 24. IVH de la cuenca Alta del Río Chicamocha para el escenario histórico.

Tomado de: CORPOBOYACÁ ERA, 2016.



Ilustración 25. IVH de la cuenca Alta del Río Chicamocha para el escenario húmedo.

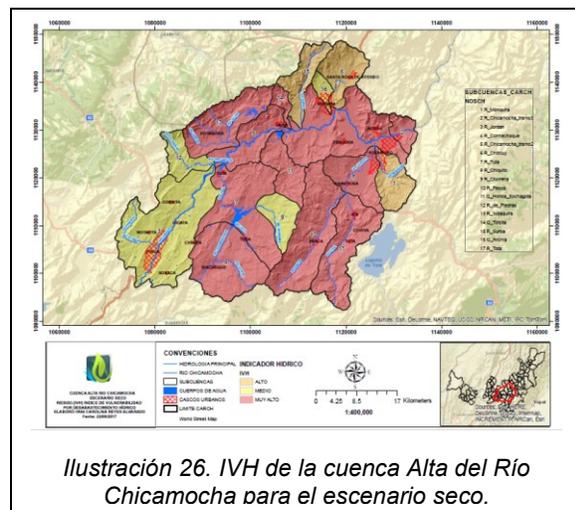


Ilustración 26. IVH de la cuenca Alta del Río Chicamocha para el escenario seco.

En el periodo húmedo, se reduce la vulnerabilidad al desabastecimiento por presentarse mayor oferta de precipitación, siendo de carácter medio y bajo para la mayoría de las

subcuencas, y muy bajo especialmente para la subcuenca de río de Piedras. En el caso del escenario seco, el IVH pasa de ser Alto a muy Alto, para la mayoría de las subcuencas.

12. Índice de vulnerabilidad a eventos torrenciales (IVET).

La vulnerabilidad se expresa en relación con los índices morfométricos de torrencialidad e índice de variabilidad. La unidad de medida del indicador es cualitativa y se expresa en términos de vulnerabilidad muy alta, alta, media y baja. (IDEAM, 2013).

El índice morfométrico se caracteriza por medio de la siguiente tabla:

Tabla 20. Relaciones para categorizar el índice morfométrico.

Índice morfométrico	Escala	Área de la cuenca de drenaje (km ²)	Categorías				
			1	2	3	4	5
Densidad de drenaje (km/km ²)	1:10.000	<15	<1,50	1,51 – 2,00	2,01 – 2,50	2,51 – 3,00	> 3
	1:25.000	16 a 50	<1,20	1,21 – 1,80	1,81 – 2,00	2,01 – 2,50	> 2,5
	1:100.000	>50	<1,00	1,01 – 1,50	1,51 – 2,00	2,01 – 2,50	> 2,5
			Baja	Moderada	Moderada Alta	Alta	Muy Alta
Pendiente media de la cuenca (%)	1:10.000	<15	<20	21 – 35	36 – 50	51 – 75	>75
	1:100.000	>50	<15	16 – 30	30 – 45	46 – 65	>65
			Accidentado	Fuerte	Muy Fuerte	Escarpado	Muy Escarpado
Coeficiente de compacidad			<1,625	1,376 – 1,500	1,251 – 1,375	1,126 – 1,250	1,00 – 1,125
			Oval-oblonga a rectangular-oblonga	Oval-redonda a oval-oblonga		Casi redonda a oval-redonda	

Tomado de: Lineamientos conceptuales y metodológicos para la evaluación regional del agua. IDEAM, 2013.

Con la categorización, se relacionan las variables del índice morfométrico, por medio de la siguiente matriz:

Tabla 21. Relaciones entre variables para el índice morfométrico.

		Pendiente media de la cuenca					
		1	2	3	4	5	
Densidad de drenaje	1	111	121	131	141	151	1
		112	122	132	142	152	2
		113	123	133	143	153	3
		114	124	134	144	154	4
		115	125	135	145	155	5
	2	211	221	231	241	251	1
		212	222	232	242	252	2
		213	223	233	243	253	3
		214	224	234	244	254	4
		215	225	235	245	255	5
	3	311	321	331	341	351	1
		312	322	332	342	352	2
		313	323	333	343	353	3
		314	324	334	344	354	4
		315	325	335	345	355	5
4	411	421	431	441	451	1	
	412	422	432	442	452	2	
	413	423	433	443	453	3	
	414	424	434	444	454	4	
	415	425	435	445	455	5	
5	511	521	531	541	551	1	
	512	522	532	542	552	2	
	513	523	533	543	553	3	
	514	524	534	544	554	4	
	515	525	535	545	555	5	

■ Muy alta ■ Baja ■ Muy baja
■ Alta ■ Moderada

Tomado de: Lineamientos conceptuales y metodológicos para la evaluación regional del agua. IDEAM, 2013.

El *índice de variabilidad* se obtiene de la curva de duración de caudales, aplicando la siguiente ecuación:

$$\text{Índice Variabilidad} = \frac{\log(Q_i) - \log(Q_f)}{\log(X_i) - \log(X_f)}$$

Esta se clasifica en las siguientes categorías:

Tabla 22. Clasificación del índice de variabilidad.

Índice de variabilidad	Vulnerabilidad
< 10°	Muy baja
10.1° - 37°	Baja
37.1° - 47°	Media
47.1° - 55	Alta
>55°	Muy alta

Tomado de: *Lineamientos conceptuales y metodológicos para la evaluación regional del agua*. IDEAM, 2013.

El *índice de vulnerabilidad frente a eventos torrenciales* indica la relación existente entre las características de la forma de una cuenca que son indicativos de la torrencialidad en la misma, en relación con las condiciones hidrológicas en dicha cuenca y se determina por medio de la siguiente matriz:

Tabla 23. Clasificación del índice de vulnerabilidad frente a eventos torrenciales

Índice de variabilidad	Índice morfométrico de torrencialidad				
	Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy alta
Muy baja	Baja	Baja	Media	Alta	Alta
Baja	Baja	Media	Media	Alta	Muy alta
Media	Baja	Media	Alta	Alta	Muy alta
Alta	Media	Media	Alta	Muy alta	Muy alta
Muy alta	Media	Alta	Alta	Muy alta	Muy alta

Tomado de: *Lineamientos conceptuales y metodológicos para la evaluación regional del agua*. IDEAM, 2013.

Se expresa en relación con los índices morfométrico y de variabilidad para estimar una sola vulnerabilidad frente a eventos torrenciales, teniendo en cuenta los rangos y las clasificaciones de cada uno de ellos.

La vulnerabilidad a eventos torrenciales en la cuenca en general está dominada por la categoría alta, debido a las características morfométricas de las cuencas y a los caudales históricos simulados. Además, se destaca la subcuenca del río Chiticuy como una subcuenca con muy alta vulnerabilidad a eventos torrenciales, especialmente por su forma. Por otra parte, las subcuencas que presentan una vulnerabilidad media son la del río Jordán, la del río Tota por su forma más ovalada, aunque en el caso del río Jordán, es conocido que su cauce no cuenta con capacidad de transporte de crecientes extremas. En el caso del tramo 2 del río Chicamocha se han efectuado intervenciones por medio de canales de desecación que disminuyeron áreas de inundación y amortiguación, las cuales durante eventos extremos se inundan y hacen más vulnerable a la población ante eventos de crecientes súbitas.

Tabla 24. Índice de Vulnerabilidad a Eventos Torrencales (IVET), en la cuenca Alta del Río Chicamocha.

SubCuenca	RIESGO		
	IVET húmedo	IVET histórico	IVET seco
	Categoría	Categoría	Categoría
R_Jordan	Media	Media	Media
Q_Honda_Sochagota	Media	Alta	Muy Baja
R_Chicamocha_tramo2	Media	Alta	Alta
R_Chicamocha_tramo3	Media	Media	Media
R_Chiquito	Media	Alta	Alta
R_Chiticuy	Alta	Alta	Alta
R_Chorrera	Media	Media	Muy Baja
R_Cormechoque	Media	Media	Alta
R_Pesca	Media	Alta	Media
R_de_Piedras	Alta	Alta	Muy Alta
R_Sotaquira	Media	Alta	Media
R_Surba	Alta	Alta	Muy Alta
R_Tota	Media	Media	Media
R_Tuta	Alta	Alta	Alta
Q_Toibita	Media	Alta	Media
Q_Aroma	Muy Alta	Alta	Alta
R_Monquira	Alta	Alta	Muy Alta

Tomado de: CORPOBOYACÁ ERA, 2016.

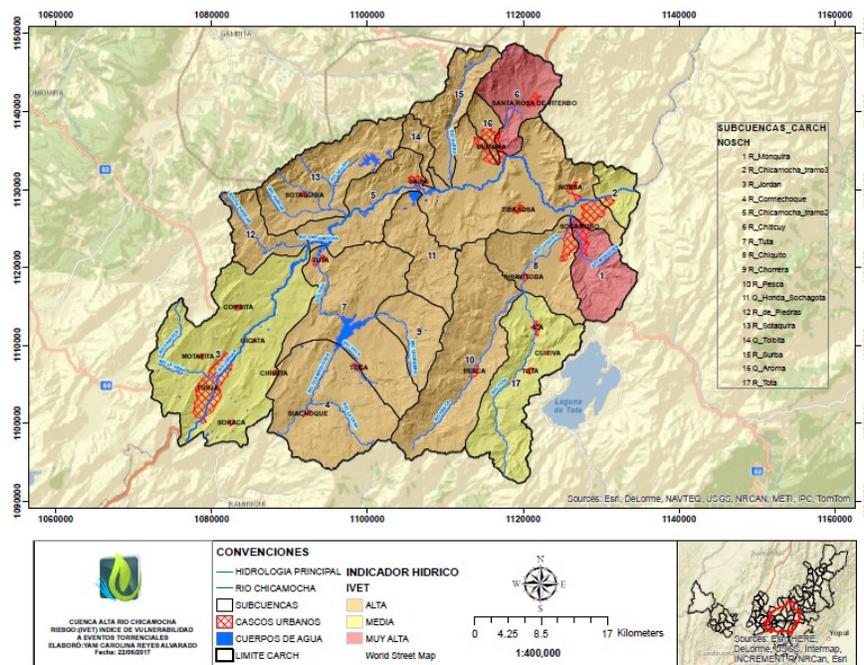


Ilustración 27. IVET de la cuenca Alta del Río Chicamocha para el escenario histórico.

Tomado de: CORPOBOYACÁ ERA, 2016.

En el escenario húmedo se evidencia el aumento de la vulnerabilidad a eventos torrencales; en el caso opuesto se presenta el escenario seco, donde se evidencia reducción de la vulnerabilidad como es el caso del río La Chorrera y la quebrada Aroma.

