



POMCA

RÍO SUCIO ALTO



FASE DE DIAGNÓSTICO INFORME DE HIDROLOGÍA

NOVIEMBRE DE 2019

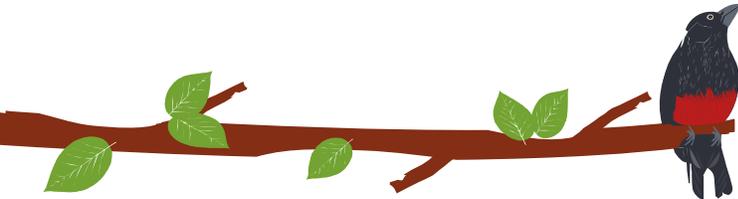
CONTRATO No: 200-10-01-09-0240-2017

CONESTUDIOS S.A.S

NIT.811.044.748-1

PBX: 456 18 27

Carrera 46#45 #10. Oficinas 211-212. Bello, Antioquia



FASE DE DIAGNÓSTICO INFORME DE HIDROLOGÍA

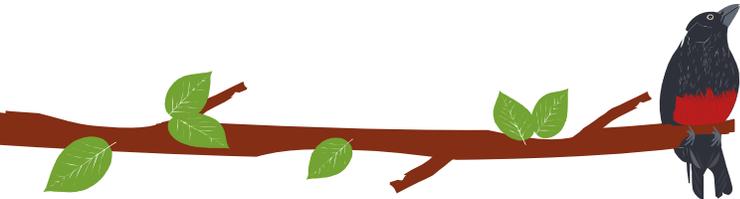
REGISTRO DE APROBACIÓN:

Versión N°	Elaboró:	Revisó: (Pendiente)	Aprobó: (Pendiente)	Fecha:
		CONESTUDIOS S.A.	CORPOURABA	Entidad: Funcionario: Cargo:

REGISTRO DE MODIFICACIONES:

REVISIÓN		DESCRIPCIÓN DE LAS MODIFICACIONES
Número	Fecha	
1	00/00/2018	Ajustes de acuerdo a concepto técnico de CORPOURABA n° _____ del (dd/mm/aaaa) _____
2	00/00/2018	Ajustes de acuerdo a concepto técnico de CORPOURABA n° _____ del (dd/mm/aaaa) _____

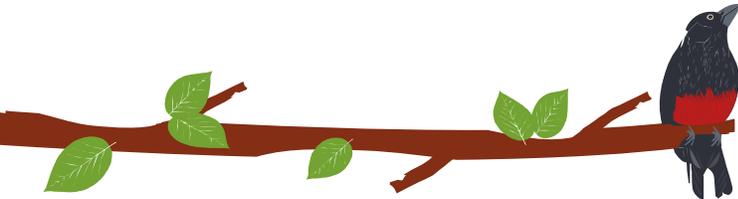




Contenido

1	HIDROLOGIA	9
1.1	DESCRIPCIÓN Y EVALUACIÓN DE LA RED HIDROLÓGICA	9
1.1.1	Localización de estaciones hidrológicas	9
1.1.2	Análisis de información hidrológica de la red de monitoreo	11
1.2	INVENTARIO DE INFRAESTRUCTURA HIDRÁULICA.....	13
1.2.1	PEQUEÑAS CENTRALES HIDROELECTRICAS (PCH)	14
1.3	SISTEMAS LÉNTICOS Y LÓTICOS.....	17
1.4	CARACTERIZACIÓN DEL RÉGIMEN HIDROLÓGICO	18
1.4.1	VARIABILIDAD HIDROCLIMÁTICA	19
1.4.2	CARACTERIZACIÓN DE SERIES HIDROLÓGICAS EXISTENTES.....	20
1.4.3	MODELO LLUVIA ESCORRENTIA.....	27
1.4.4	PARAMETRIZACIÓN PARA LAS UAH DE LA CUENCA DEL RSA.....	39
1.5	OFERTA HÍDRICA SUPERFICIAL TOTAL Y DISPONIBLE A ESCALA MENSUAL Y ANUAL.....	41
1.5.1	UAH-1 Cuenca Rio Sucio Alto.....	42
1.5.2	UAH-2 Cuencas Nivel 02	44
1.5.3	UAH-3 Cuencas Nivel 03 Microcuencas Abastecedoras	47
1.5.4	DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL RENDIMIENTO HÍDRICO	49
1.6	CAUDALES MÁXIMOS PARA DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO Y EVENTOS EXTREMOS.....	53
1.7	REGIMEN DE SEDIMENTOS	53
1.8	CAUDALES AMBIENTALES.....	54
1.9	ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA HÍDRICA	57
1.9.1	DEMANDA DE USO PARA CONSUMO HUMANO Y DOMÉSTICO (DUD).....	59
1.9.2	DEMANDA DE USO SECTOR PECUARIO (DUP).....	61
1.9.3	DEMANDA DE USO SECTOR AGRÍCOLA (DUA)	63
1.9.4	DEMANDA TOTAL.....	67
	Fuente:	68
1.10	INDICADORES DE SOSTENIBILIDAD DEL RECURSO HIDRICO	68
1.10.1	ÍNDICE DE RETENCIÓN Y REGULACIÓN HÍDRICA (IRH)	69
1.10.2	ÍNDICE DE USO DEL AGUA (IUA)	77
1.10.3	Índice de vulnerabilidad por desabastecimiento hídrico (IVH).....	84





ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Estaciones hidrológicas del área de estudio. Elaboración propia.....	10
Figura 2 Cantidad de estaciones por categoría. Elaboración propia.....	11
Figura 3 Porcentaje de estaciones consistentes y no consistentes. Elaboración propia.	12
Figura 4 porcentaje de valores anómalos. Elaboración propia	12
Figura 5 Ubicación de las estaciones consistentes presentes en la zona de estudio. Elaboración propia	13
Figura 6. Localización de la infraestructura hidráulica presente en la Cuenca Alta del Río Sucio. Elaboración propia	16
Figura 7 Red Hidrográfica UAH Cuenca Rio Sucio Alto. Elaboración propia.....	18
Figura 8 Diagrama conceptual de variabilidad hidrológica para zonas tropicales. Elaboración propia a partir de Velasco (2016)	19
Figura 9 Prueba de aleatoriedad para los conjuntos estadísticos mensuales y anuales de la variable caudal medio. Elaboración propia.	21
Figura 10 Prueba de tendencia Caudales Medios. Elaboración propia	22
Figura 11 Prueba de aleatoriedad para los conjuntos estadísticos mensuales y anuales de la variable caudal máximo. Elaboración propia	23
Figura 12 Prueba de tendencia Caudales Máximos. Elaboración propia	24
Figura 13 Prueba de aleatoriedad para los conjuntos estadísticos mensuales y anuales de la variable caudal mínimo. Elaboración propia.	25
Figura 14 Prueba de tendencia Caudales Mínimo. Elaboración propia.....	26
Figura 15 Esquema metodológico modelo lluvia escurrentía. Elaboración propia	28
Figura 16. Esquema simplificado de una cuenca hidrográfica.Tomado de: Google imágenes 2018	29
Figura 17. Esquema conceptual del modelo GR4J Tomado de: (Bodian et al., 2018)..	30
Figura 18. Ubicación espacial estaciones Hidrológicas para calibración. Elaboración propia	34
Figura 19. Diagrama de fase de las métricas de desempeño del Modelo Lluvia escurrentía estación 11117050. Elaboración propia	35
Figura 20. Diagrama de fase de las métricas de desempeño del Modelo Lluvia escurrentía estación 11117010. Elaboración propia.	36
Figura 21. Evolución de los parámetros estación 11117050. Elaboración propia.....	36
Figura 22. Evolución de los parámetros estación 11117010. Elaboración propia.....	37
Figura 23. Modelo Lluvia Escurrentía Estación 11117050. Elaboración propia.....	38
Figura 24. Grafica de dispersión modelo lluvia escurrentía estación 11117050. Elaboración propia	38
Figura 25. Modelo Lluvia Escurrentía Estación 11117070. Elaboración propia.....	39
Figura 26. Grafica de dispersión modelo lluvia escurrentía estación 11117050. Elaboración propia	39



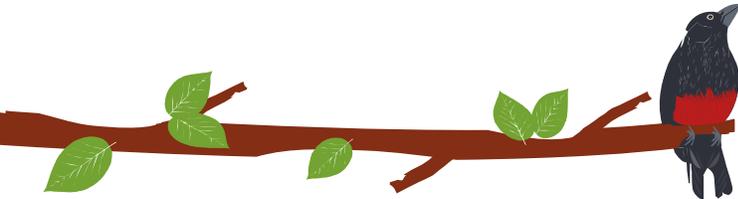
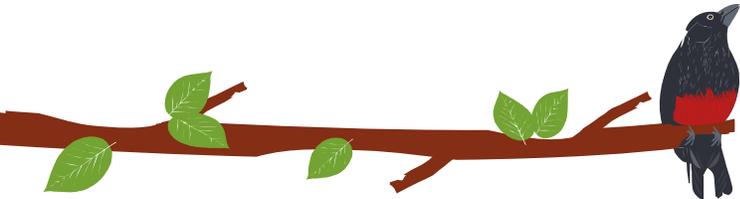


Figura 27. Distribución intra-anual de la escorrentía en la cuenca de RSA en condiciones hidrológicas de año normal. Elaboración propia.	43
Figura 28. Distribución intra-anual de la escorrentía en la cuenca de RSA en condiciones hidrológicas de año seco. Elaboración propia.	44
Figura 29 Rendimiento hídrico condición Año Normal, se observa en la parte latitudinal de la cuenca disminución en el rendimiento hídrico, en el sector sur oriental de la cuenca se presentan los mayores valores de rendimiento, en el sector norte de la cuenca se ve un leve aumento en relación con el sector medio. los valores oscilan entre los 18 a 82.74 L/s/Km ²	51
Figura 30 Mosaico rendimiento hídrico condición Año Seco, el comportamiento para esta condición es similar al de año normal, el sector que presenta los mayores valores se evidencia en la parte alta de la cuenca, en el sector latitudinal se presenta una disminución la cual se prolonga hasta el sector bajo, los valores oscilan entre los 4.38 a 56.48 L/s/Km ²	52
Figura 31 Carga media mensual de sedimentos estación Limnimétrica 11117010 EL ANIL. Elaboración propia.	54
Figura 32. Evolución de la población en la cuenca de RSA en el periodo 1985 – 2020 (proyección). Elaboración propia.	59
Figura 33 Curva de duración de caudales UAH nivel 1. Elaboración propia.	70
Figura 34 Distribución espacial del índice de retención y regulación hídrica UAH – nivel 2, Año normal. Elaboración propia.	72
Figura 35 Distribución espacial del índice de retención y regulación hídrica UAH – nivel 3 Año normal. Elaboración propia.	73
Figura 36 Distribución espacial del índice de retención y regulación hídrica UAH – nivel 2 Año seco. Elaboración propia.	75
Figura 37 Distribución espacial del índice de retención y regulación hídrica UAH – nivel 3 año seco. Elaboración propia.	76
Figura 38 Índice de uso del agua (IUA) por UHN-2 Año normal. Elaboración propia... ..	79
Figura 39 Índice de uso del agua (IUA) por UHN-3 Año normal. Elaboración propia... ..	80
Figura 40 Índice de uso del agua (IUA) por UHN-2 Año seco. Elaboración propia.	82
Figura 41 Índice de uso del agua (IUA) por UHN-3 Año seco. Elaboración propia.	83
Figura 42 Índice de vulnerabilidad por desabastecimiento hídrico UAH Nivel 2 año normal. Elaboración propia.	86
Figura 43 Índice de vulnerabilidad por desabastecimiento hídrico por UHN-3 año normal. Elaboración propia.	87
Figura 44 Índice de vulnerabilidad por desabastecimiento hídrico UAH Nivel 2 año seco. Elaboración propia.	89
Figura 45 Índice de vulnerabilidad por desabastecimiento hídrico por UHN-3 año seco. Elaboración propia.	90





ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Puntos de captación UAH cuenca Rio Sucio Alto.....	13
Tabla 2 Cuerpos Loticos UAH-1 Rio Sucio Alto	17
Tabla 3 Resumen de los ajustes de la función de distribución teórica en los conjuntos mensuales y anuales. Caudal Medio.	22
Tabla 4. Resumen de los ajustes de la función de distribución teórica en los conjuntos mensuales y anuales. Caudal Máximo	24
Tabla 5. Resumen de los ajustes de la función de distribución teórica en los conjuntos mensuales y anuales. Caudal Mínimo.	27
Tabla 6 Parámetros modelo GR4J	37
Tabla 7 Parámetros modelo Lluvia – Escorrentía UAH Nivel 1	40
Tabla 8 Parámetros modelo Lluvia – Escorrentía UAH Nivel 2	40
Tabla 9 Parámetros modelo Lluvia – Escorrentía UAH Nivel 3 Cuencas Abastecedoras	40
Tabla 10 Resumen de los ajustes de la función de distribución teórica en los conjuntos mensuales y anuales. UAH Nivel 1	41
Tabla 11 Resumen de los ajustes de la función de distribución teórica en los conjuntos mensuales y anuales. UAH Nivel 2	41
Tabla 12 Resumen de los ajustes de la función de distribución teórica en los conjuntos mensuales y anuales. UAH Nivel 3	42
Tabla 13 Oferta Hídrica Mensual y Anual [m ³ /s] – Año normal - UHN - 1.....	43
Tabla 14 Rendimiento Hídrico Mensual y Anual [l/s Km ²] – Año normal - UHN - 1.....	43
Tabla 15 Oferta Hídrica Mensual y Anual [m ³ /s] – Año seco - UHN - 1.....	44
Tabla 16 Rendimiento Hídrico Mensual y Anual [l/s Km ²] – Año seco - UHN - 1.....	44
Tabla 17 Oferta Hídrica Mensual y Anual [m ³ /s] – Año normal - UHN – 2.....	44
Tabla 18 Rendimiento Hídrico Mensual y Anual [L/s Km ²] – Año normal - UHN – 2....	45
Tabla 19 Oferta Hídrica Mensual y Anual [m ³ /s] – Año seco - UHN - 2.....	46
Tabla 20 Rendimiento Hídrico Mensual y Anual [L/s Km ²] – Año seco - UHN – 2	47
Tabla 21 Oferta Hídrica Mensual y Anual [m ³ /s] – Año normal - UHN – 3.....	47
Tabla 22 Rendimiento Hídrico Mensual y Anual [L/s Km ²] – Año normal - UHN – 3....	48
Tabla 23 Oferta Hídrica Mensual y Anual [m ³ /s] – Año seco - UHN – 3	48
Tabla 24 Rendimiento Hídrico Mensual y Anual [L/s Km ²] – Año seco - UHN - 3.....	49
Tabla 25 Caudales máximos para distintos periodos de retorno en la UAH-1	53
Tabla 26 Porcentaje de caudal Ambiental para condición Seca.....	54
Tabla 27 Caudal ambiental Año normal UAH nivel 1, nivel 2 y nivel 3.....	55
Tabla 28 Caudal ambiental Año Seco UAH nivel 1, nivel 2 y nivel 3.....	56
Tabla 29 Expresiones matemáticas usadas en la determinación de la demanda hídrica	58
Tabla 30 Porcentajes de cobertura y población total con cobertura de acueducto	59
Tabla 31 Niveles de complejidad en sistemas de acueducto.....	60



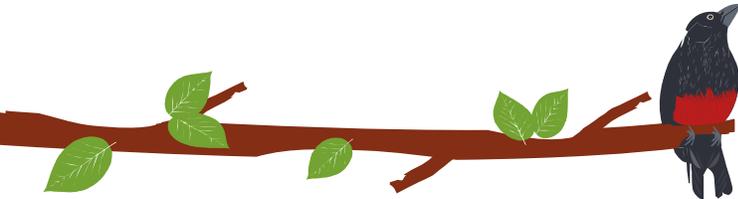
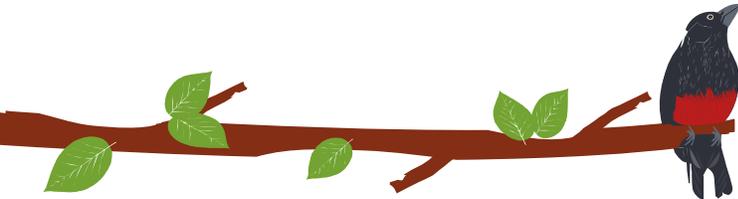


Tabla 32 Dotación Bruta por municipio	60
Tabla 33 Demanda de uso doméstico por Municipio.....	60
Tabla 34. Demanda de uso Doméstico en las UAH - Nivel 1, Nivel 2 y nivel 3 (L/s) ...	60
Tabla 35 Inventario pecuario de la cuenca rio Sucio Alto.....	61
Tabla 36 Módulos de consumo del sector pecuario	62
Tabla 37 Demanda de uso pecuario por municipio en la cuenca de RSA	62
Tabla 38 Demanda de uso Pecuario UAH - Nivel 1, Nivel 2 y nivel 3	62
Tabla 39 Áreas [Ha] por tipo de producción para UAH-1.	64
Tabla 40 Áreas [Ha] por tipo de producción para UAH-2	64
Tabla 41 Áreas [Ha] por tipo de producción para UAH-3	65
Tabla 42 Coeficiente de cultivo (K_c) para las coberturas identificadas en la cuenca RSA	65
Tabla 43 Valores de Evapotranspiración Potencial UAH - Nivel 1, Nivel 2 y nivel 3.....	65
Tabla 44 Demanda de uso agrícola UAH - Nivel 1, Nivel 2 y nivel 3	66
Tabla 45 Demanda de uso total UAH Nivel 1, Nivel 2 y nivel 3.....	67
Tabla 46 Clasificación para los valores del IRH UHN-1	69
Tabla 47 Índice de retención y regulación hídrica UAH Nivel 1	70
Tabla 48 Índice de retención y regulación hídrica UAH Nivel 1	73
Tabla 49 Clasificación para los valores del IUA	77
Tabla 50 Cálculo del IUA UAH-nivel 1 Año normal	77
Tabla 51 Cálculo del IUA UAH-nivel 2 Año normal	78
Tabla 52 Cálculo del IUA UAH-nivel 3 Año normal	78
Tabla 53 Cálculo del IUA UAH-nivel 1 Año seco.....	81
Tabla 54 Cálculo del IUA UAH-nivel 2 Año seco.....	81
Tabla 55 Cálculo del IUA UAH-nivel 3 Año seco.....	81
Tabla 56 Matriz de relación entre el IRH y el IUA para determinar el IVH UHN-1.....	84
Tabla 57 Índice de vulnerabilidad por desabastecimiento hídrico UAH Nivel 1 año normal	84
Tabla 58 Índice de vulnerabilidad por desabastecimiento hídrico UAH Nivel 2 año normal	84
Tabla 59 Índice de vulnerabilidad por desabastecimiento hídrico UAH Nivel 3 año normal	85
Tabla 60 Índice de vulnerabilidad por desabastecimiento hídrico UAH Nivel 1 año seco	88
Tabla 61 Índice de vulnerabilidad por desabastecimiento hídrico UAH Nivel 2 año seco	88
Tabla 62 Índice de vulnerabilidad por desabastecimiento hídrico UAH Nivel 3 año seco	88

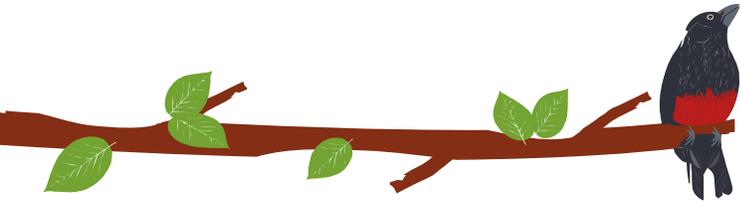




ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1	31
Ecuación 2	31
Ecuación 3	31
Ecuación 4	31
Ecuación 5	31
Ecuación 6	31
Ecuación 7	31
Ecuación 8	31
Ecuación 9	31
Ecuación 10	32
Ecuación 11	32
Ecuación 12	32
Ecuación 13	32
Ecuación 14	32
Ecuación 15	32
Ecuación 16	32
Ecuación 17	32
Ecuación 18	33
Ecuación 19	33
Ecuación 20	33
Ecuación 21	33





1 HIDROLOGIA

1.1 DESCRIPCIÓN Y EVALUACIÓN DE LA RED HIDROLÓGICA

El presente capítulo describe la información original utilizada para la descripción y caracterización del componente hidrológico. Entre los análisis implementados se encuentran la identificación de datos anómalos, el análisis de consistencia, la estimación de datos faltantes, análisis de persistencia, homogeneidad, aleatoriedad y finalmente una caracterización probabilística de las series de tiempo hidrológicas.

La caracterización hidrológica permitió identificar aspectos relacionados con la oferta hídrica ambiental consolidados en la generación de índices importantes para la gestión del recurso hídrico. En general, toda temática de ordenamiento del territorio, el recurso hídrico por supuesto es un eje transversal fundamental. Para el caso de la cuenca Rio Sucio Alto (1111-01) y sus respectivas Unidades de Análisis Hidrográfica (UAH) niveles 2 y 3, las condiciones ambientales indican excedentes de humedad en todo el dominio espacial de la UAH de acuerdo con los balances de largo plazo.

Sin embargo, una de las mayores restricciones en la elaboración de esta memoria es la disponibilidad de información adecuada para la escala espacial y resolución temporal que exige este tipo de estudios, pues se pretende caracterizar unidades de orden 1 (de acuerdo con la clasificación propuesta por IDEAM) soportándose básicamente en la red nacional de monitoreo que cumple otro tipo de propósitos a escala de País pero que sin duda aporta información valiosa a las regiones. Lo anterior se convierte en un hallazgo en el sentido que es necesario el reforzamiento de la red de monitoreo hidrológico basados en criterios de red óptima para la generación de información de mayor resolución espacio-temporal que permita la captura de componentes de variabilidad a las escalas de las unidades hidrológicas nivel 1 (UHN-1), de tal forma que se reduzca la incertidumbre en la caracterización de oferta hídrica y los rasgos de variabilidad en cada una de las unidades.

El reforzamiento de la red de monitoreo hidrológico debe ser acompañado de campañas periódicas de aforo para la reducción de la incertidumbre en la transformación de los registros a caudales mediante las curvas de gasto.

1.1.1 Localización de estaciones hidrológicas

Para la realización del inventario se parte de una selección de estaciones cercanas a la cuenca Rio Sucio Alto (1111-01), proveniente del catálogo de estaciones del IDEAM, mediante la observación de la distribución espacial de dichas estaciones a través del software QGIS (Team QGIS Development, 2016) a lo largo de la zona de influencia. Para ello se implementa una ventana de análisis que corresponde a una amplia área dado que la densidad de la red hidrometeorológica es muy baja en la región de Caribe. A continuación, en la Figura 1 se presenta la ubicación espacial de las estaciones hidrológicas en un buffer de 60 km a la cuenca RSA.



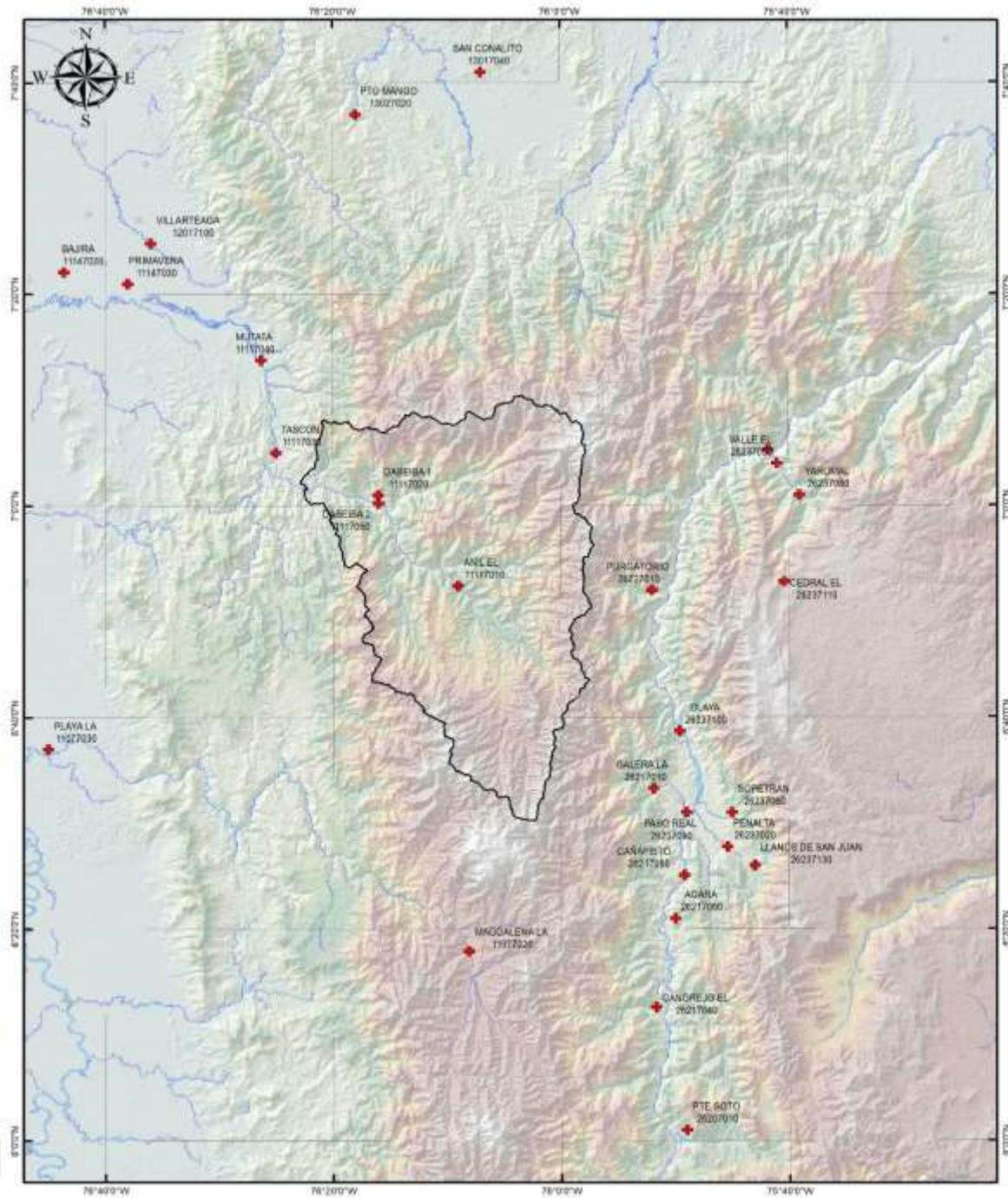
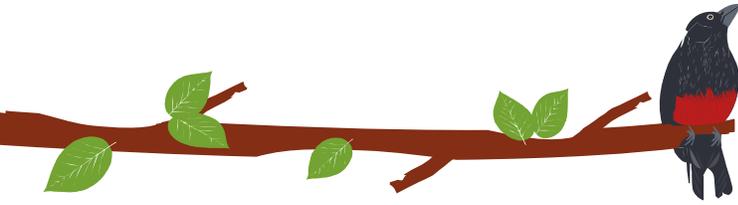


Figura 1 Estaciones hidrológicas del área de estudio. Elaboración propia.

En la Figura 2 se observa dos (2) categorías de estaciones que registran la variable caudal líquido. En total se filtraron 27 estaciones hidrológicas en la ventana de estudio distribuidas en las categorías limnimétricas (LM), limnigráficas (LG).



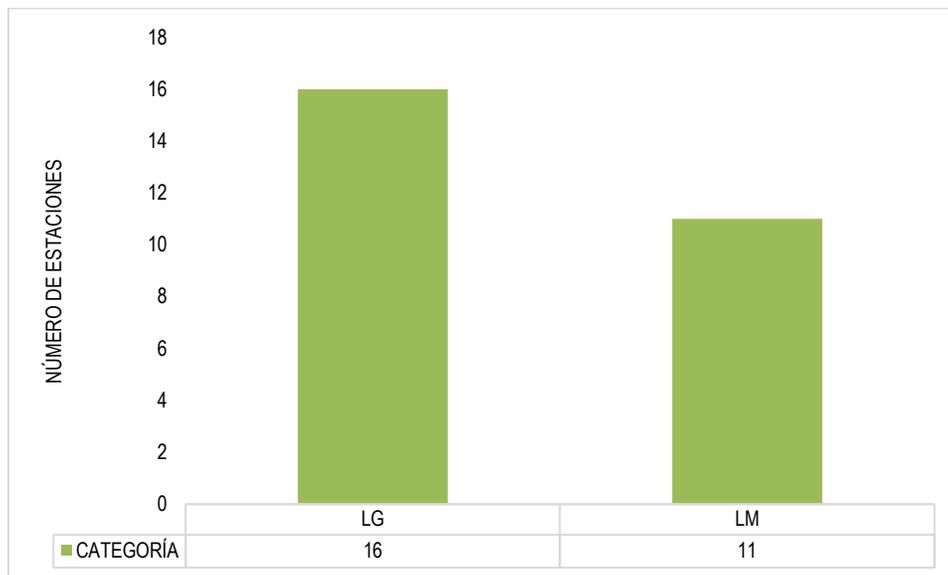
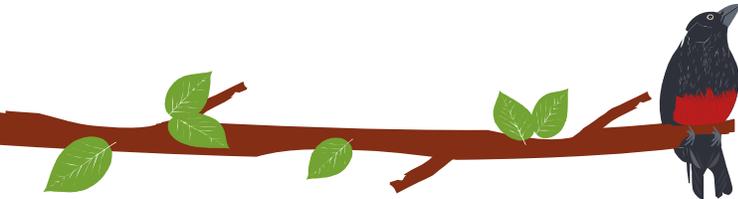


Figura 2 Cantidad de estaciones por categoría. Elaboración propia

1.1.2 Análisis de información hidrológica de la red de monitoreo

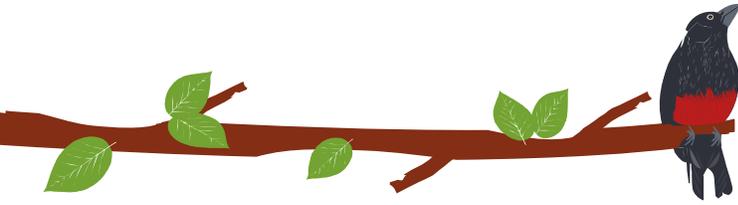
En este numeral se describe la información hidrológica base utilizada para la realización de la presente caracterización hidrológica. Se incluye en este capítulo la ubicación geográfica de las estaciones de monitoreo, series históricas, y describe el tratamiento y filtrado de datos realizados como paso previo a los análisis que se describen más adelante.

1.1.2.1 Análisis de consistencia de la información

El análisis de calidad inicial realizado consiste en identificar los registros potenciales (en función de la fecha de inicio de operación y suspensión de la estación) y los datos registrados en el histórico de la serie para de esta forma calcular el porcentaje de completitud. El porcentaje de completitud deseable para los análisis hidrológicos recomendado por la Guía de Prácticas Hidrológicas de la OMM No 168 (WMO, 2011) y los estándares de calidad aplicables para Colombia, es del 70 % o mayor a este.

- Tratamiento de datos: teniendo en cuenta la Guía de Prácticas Hidrológicas de la OMM No 168 (WMO, 2011) y los estándares de calidad aplicables para Colombia, fueron seleccionadas series que contaran mínimo con 20 años de registros. En este caso, datos hidrológicos con un porcentaje de datos faltantes menor al 30%.
- Identificación de valores Anómalos: se aplicó la metodología de las desviaciones absolutas en términos de medianas (MADs, Median Absolute Deviations) (Leys, Ley, Klein, Bernard, & Licata, 2013; Rosenmai, 2013; Rousseeuw & Croux, 1993) en donde se busca identificar el número de desviaciones en términos de las medianas por derecha y por izquierda (cubriendo de esta forma distribuciones asimétricas) para cada conjunto estadístico (conjuntos mensuales y días julianos).
- Análisis de consistencia: Posterior al análisis de datos anómalos, se aplicó una prueba de completitud de los datos, donde se considera la longitud esperada (potencial) y observada de la serie. De acuerdo con los términos, el periodo efectivo de registro de la serie no puede ser inferior a 15 años. Adicionalmente, se incluyó un criterio de





consistencia relacionado con un porcentaje de datos faltantes inferior al 30 %. Para aprobar el análisis de completitud la serie debe cumplir con los dos criterios anteriores simultáneamente.

En la siguiente figura se presenta las estaciones que pasaron los criterios de completitud y consistencia, en los cuales se buscaba series cuyos registros potenciales tuvieran más de 15 años.

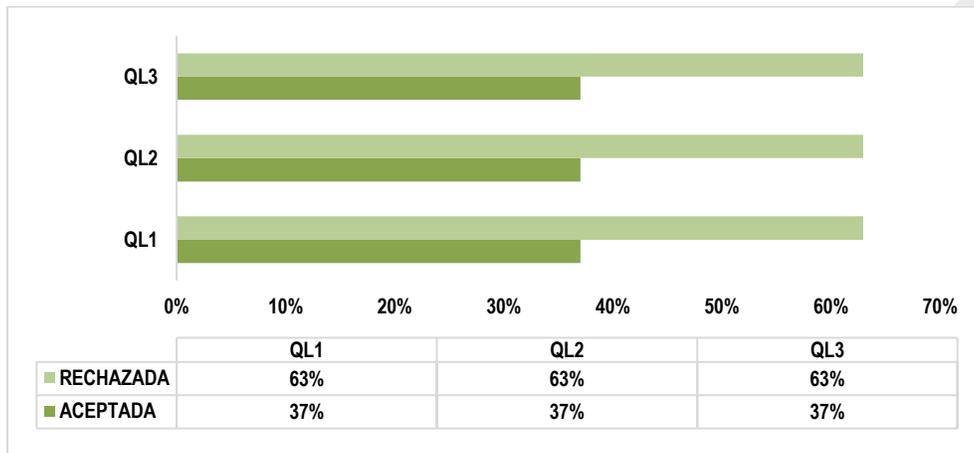


Figura 3 Porcentaje de estaciones consistentes y no consistentes. Elaboración propia.

En la siguiente figura se presenta el porcentaje de valores identificados y removidos como valores anómalos en las diferentes variables en estudio.

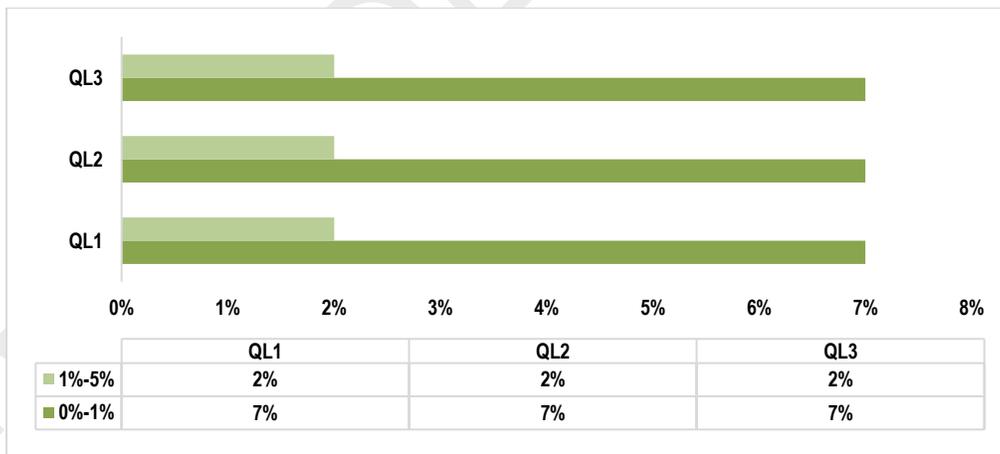


Figura 4 porcentaje de valores anómalos. Elaboración propia

La Figura 5 presenta la ubicación espacial de las estaciones hidrológicas consistentes presentes en el área de estudio. Se priorizan tres estaciones las cuales tienen registros potenciales mayores a 15 años y de las cuales dos se encuentran al interior de la cuenca Río Sucio Alto.



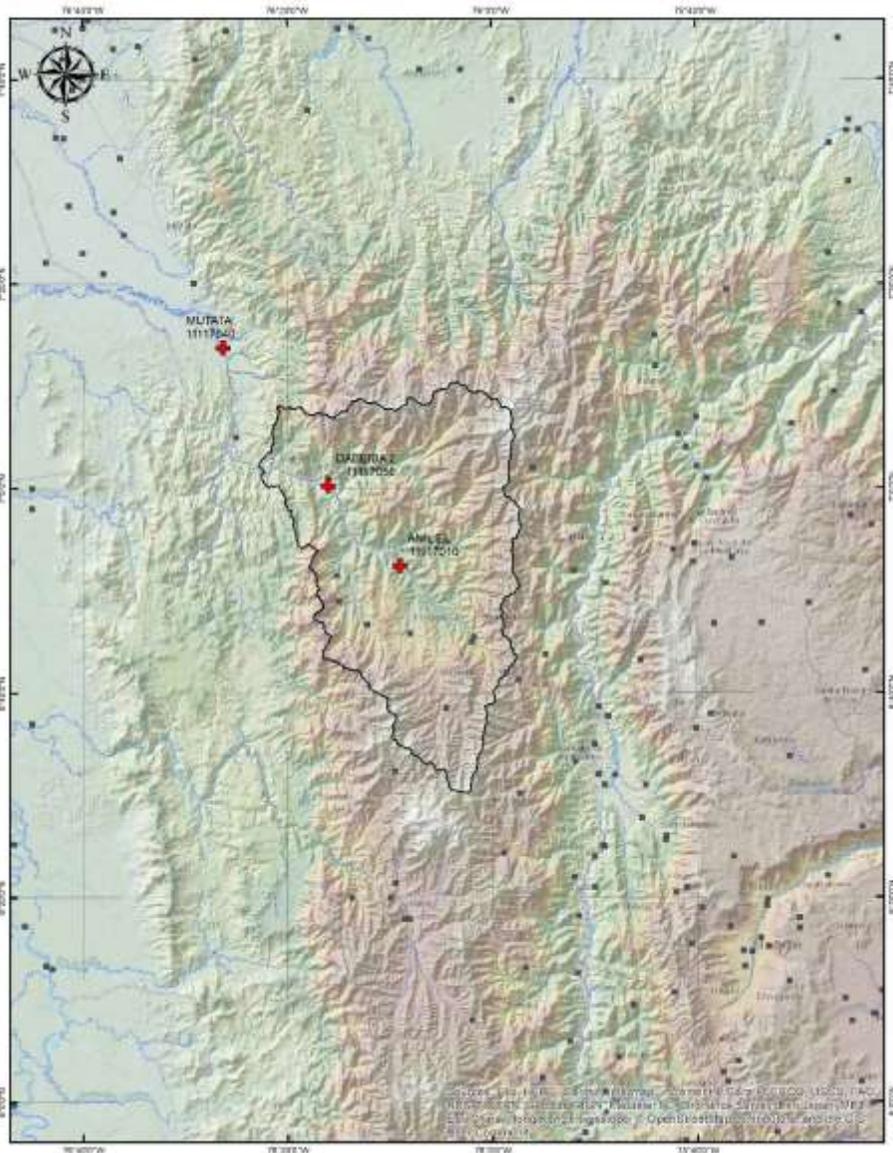
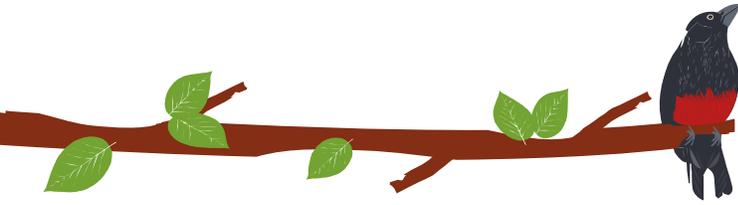


Figura 5 Ubicación de las estaciones consistentes presentes en la zona de estudio. Elaboración propia

1.2 INVENTARIO DE INFRAESTRUCTURA HIDRÁULICA

A partir de información secundaria se establece a continuación un inventario de infraestructura hidráulica presente en la UAH río Sucio Alto las cuales afectan de forma directa la oferta hídrica disponible en las diferentes unidades de análisis hidrológico nivel 2 y nivel 3. A partir de información suministrada por la corporación autónoma regional (CORPOURABA) se consolidó el inventario de infraestructura sobre la UAH nivel 1. En resumen, se determinó un total de 39 puntos de captaciones y tres pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH). A continuación, se presenta una descripción de las tres centrales y la ubicación de las captaciones en la UAH Cuenca río Sucio Alto.

Tabla 1 Puntos de captación UAH cuenca Río Sucio Alto

VEREDA	NOMBRE	COTA	ESTE	NORTE
El Eden	Bocatoma Acueducto Urbano Los Chorros	2125	1113411.552	1226671.104
San Pascual	Boca Toma Palmichal	1650	1116743.603	1249970.474
San Andres	Bocatomas San Andres	1790	1089180.747	1255008.755
Ponton	Bocatomas Ponton	1700	1108331.418	1235140.123
Piedras	Bocatomas Piedras	1670	1093846.941	1240060.211
San Lazaro	Bocatomas San Lazaro	1720	1101235.691	1236529.381
Monos	Bocatomas Auyameras	2100	1113620.786	1226250.186
Apucarco	Bocatomas Apucarpo	1467	1116121.283	1236327.805
Apucarco	Bocatomas Media Cuesta	1478	1115887.107	1237257.680
Antado	Bocatomas Antado	600	1088464.161	1268078.134
Chorromando	Bocatomas Cerraz	825	1086868.958	1265649.191
El Jordan	Bocatomas El Jordan	1350	1111222.469	1262878.488
La Armenia	Bocatomas La Armenia	1440	1112581.440	1261960.406
El Caliche	Bocatomas El Caliche	1400	1113019.941	1263699.380
Agualinda	Bocatomas Agualinda	1530	1113606.266	1264952.929
El Tigre	Bocatomas El Tigre	1530	1114464.694	1265621.967
El Cerro	Bocatomas La Piedrahita	1675	1103337.050	1236304.659
El Cerro	Bocatomas La Carmelita	2000	1103741.904	1232177.166
El Tambo	Bocatomas Golondrina	1925	1089965.177	1240844.957
El Tambo	Bocatomas El Tambo	1530	1090368.710	1242415.914
Noboga	Bocatomas Noboga	1720	1100882.843	1243304.554
Las Cruces	Bocatomas Las Cruces	1195	1105321.428	1244736.339
Montanon	Bocatomas Monta	1700	1088265.826	1249607.813
Mucinga	Bocatomas Nusido	1500	1097018.952	1242709.123
Mucinga	Bocatomas Musinga	1410	1096453.157	1240486.752
Los Monos	Bocatomas Monos	1315	1092520.938	1247053.591
Nobogacita	Bocatomas Nobogacita	1550	1097045.198	1245498.672
Chontaduro	Bocatomas Chontaduro	1790	1096974.280	1246851.027
Loma De Los Indios	Bocatomas Madero	1580	1102551.463	1247219.236
Loma De Los Indios	Bocatomas Loma De Los Indios	1495	1102271.706	1246242.185
Chuscal	Bocatomas Chuscal De Musinga	1820	1095833.512	1235651.694
Fuemia	Bocatomas Fuemia	1180	1090421.545	1249613.198
Nor	Bocatomas Nore	1550	1106532.750	1237925.973
La Cabana	Bocatomas	1280	1103586.053	1247594.665
Cabritas	Bocatomas Cabritas	1400	1102349.440	1244116.455
Caracolal	Bocatomas Oso	1250	1099564.545	1259306.909
La Antigua	PCH Herradura	.	1109064.243	1235618.292
La Honda	PCH La Vuelta	1600	1109787.461	1242033.124
Los Naranjos	PCH La Gema-Rio Urama	700	1093023.231	1266923.942

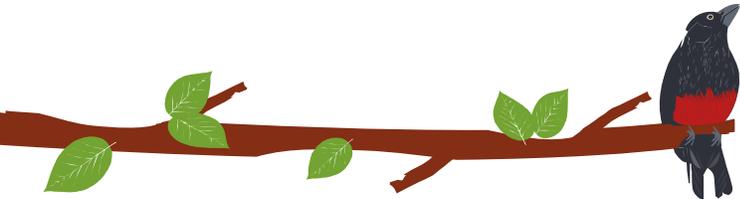
Fuente: Elaboración propia.

1.2.1 PEQUEÑAS CENTRALES HIDROELECTRICAS (PCH)

A continuación, se presenta una descripción de las tres PCH identificadas en la Unidad de análisis hidrológico río Sucio Alto.

1.2.1.1 LA VUELTA

Esta central, con una capacidad instalada de 11.8 MW, entró en operación en octubre de 2004. Está localizada en jurisdicción de los municipios de Frontino y Abriaquí, el primero ubicado a 160 kilómetros de Medellín por la vía al mar y el segundo a 30 kilómetros de Frontino, por una vía de carácter secundario. La captación del agua está en el límite de los dos municipios, en la cota 1.600 m.s.n.m. La central aprovecha la parte alta y media de la cuenca del río La Herradura hasta la cota 1.600 m.s.n.m en la desembocadura de la quebrada La Nancui, en jurisdicción del municipio de Abriaquí. La cuenca tiene una



extensión aproximada de 286 km² y drena en el sitio de captación un caudal promedio de 12.1 m³/seg. Posee una unidad generadora accionada por una turbina tipo Francis de eje horizontal. La central aprovecha una caída neta de 112.9 metros y un caudal de 12 m³/seg.

1.2.1.2 LA HERRADURA

Esta central, con una capacidad instalada de 19,8 MW, entró en operación en agosto de 2004. Está ubicada en los límites de los municipios de Cañasgordas y Frontino a 142 kilómetros de Medellín, por la carretera al mar. La captación del proyecto sobre el río La Herradura, está localizada en el municipio de Frontino; mientras que en el municipio de Cañasgordas se encuentran la casa de máquinas, las obras de conducción y la descarga de aguas turbinadas al río Cañasgordas. Posee dos unidades generadoras accionadas por turbinas tipo Francis de eje horizontal. La central aprovecha una caída neta de 230.6 metros y un caudal de (5) cinco m³/seg. La central La Herradura se encuentra registrada como proyecto de Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), por la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático, en el marco del Protocolo de Kyoto.

1.2.1.3 LA GEMA

La central general 20 MW y aprovecha la parte alta y media de la cuenca del río Urama hasta la cota 700 m.s.n.m, en jurisdicción del municipio de Dabeiba, drena en el sitio de captación un caudal promedio de 15 m³/seg. Posee dos unidades generadoras accionadas por turbinas tipo Francis de eje horizontal. La central aprovecha una caída neta de 130.6 metros y un caudal de 10 m³/seg.



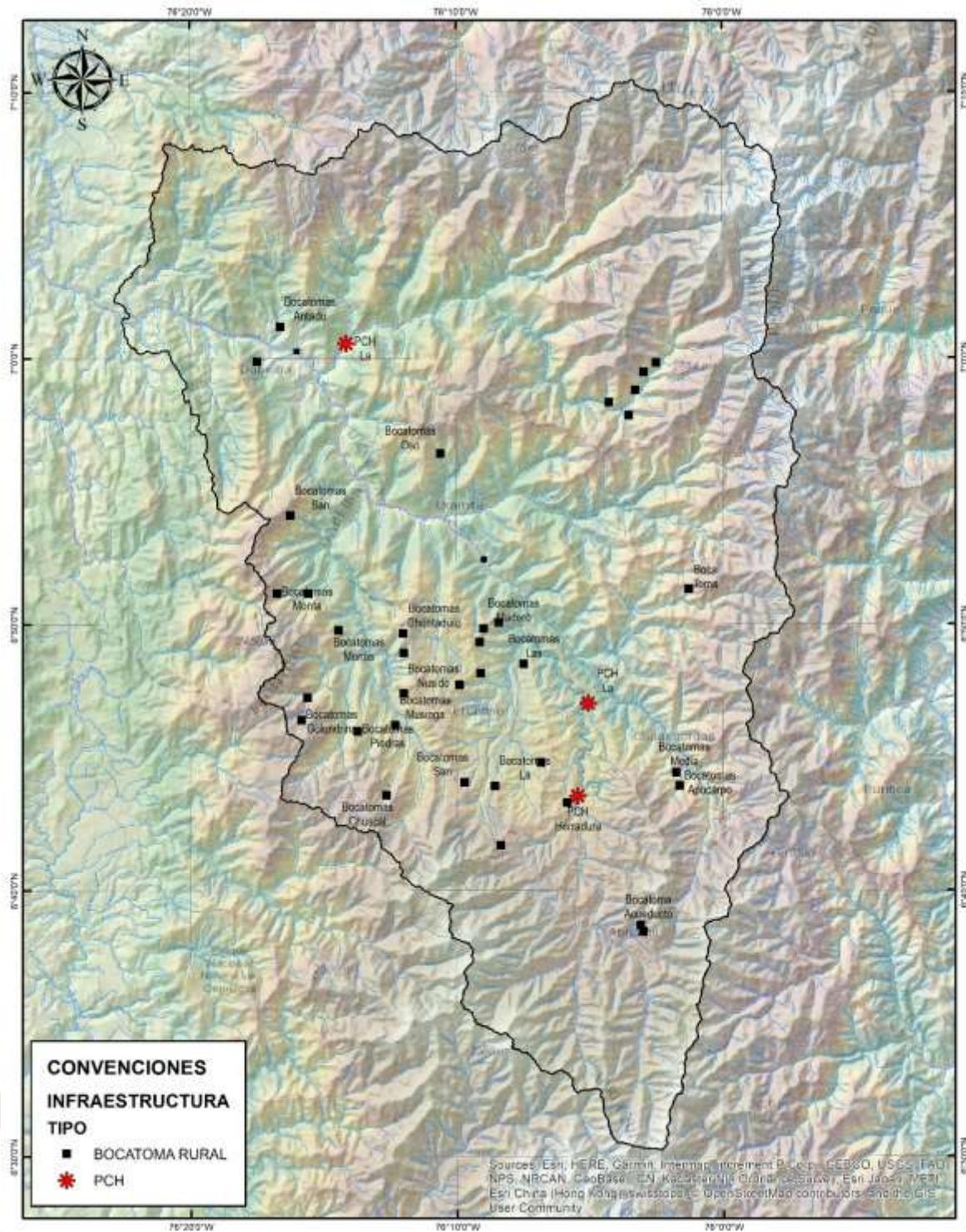
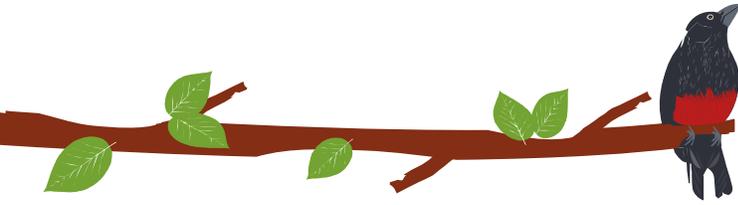


Figura 6. Localización de la infraestructura hidráulica presente en la Cuenca Alta del Río Sucio. Elaboración propia



1.3 SISTEMAS LÉNTICOS Y LÓTICOS

En la Figura 7 se evidencia que en la zona de la cuenca Río Sucio Alto no se identifican ecosistemas lénticos dentro de los cuales hacen parte pantanos, lagunas, embalses, ciénagas, humedales entre otros; esto se puede presentar por la topografía que tiene la zona, debido a que se encuentra en un terreno altamente montañoso con solo un 20% de áreas planas donde se podrían encontrar este tipo de sistemas.

En la cuenca de Río Sucio Alto nace la corriente del mismo nombre, a este río llegan igualmente quebradas y ríos secundarios (ver Tabla 2), hasta su desembocadura al río Curcubaradó, el cual a su vez drena al río Atrato que finalmente desemboca al Mar Caribe en el Golfo de Urabá. A continuación, se relacionan todos los drenajes extraídos de la hidrografía escala 1:25.000 elaborada en el marco de este pomca.

Tabla 2 Cuerpos Loticos UAH-1 Río Sucio Alto

Río Sucio	Quebrada de las Minas	Quebrada Golondrinas	Quebrada Las Cabras	Quebrada Los Reyes	Quebrada Botija
Río Quiparado	Quebrada Morro Gacho	Quebrada El Duende	Quebrada El Infierno	Quebrada Chachafrutal	Quebrada Palmichal
Río Frontino	Quebrada Nancui	Quebrada Cristales	Quebrada Las Abejas	Quebrada La Tupia	Quebrada Moscoso
Río Musinga	Quebrada El Burro	Quebrada Piedras Blancas	Quebrada Orobajo	Quebrada San Luis	Quebrada El Mango
Río Herradura	Quebrada Blanquita	Quebrada La Balsa	Quebrada La Esperanza	Quebrada FiloLargo	Quebrada Guaimaral
Río Mucinga	Quebrada San Bartolo	Quebrada El Aguila	Quebrada Nudillales	Quebrada El Indio	Quebrada El Cedral
Río Riecito	Quebrada Pantanillos	Quebrada La Linda	Quebrada Las Cruces	Quebrada Chiqueral	Quebrada El Zancudo
Río El Cerro	Quebrada La Mansa	Quebrada Los Micos	Quebrada Sacrificio	Quebrada Guadual	Quebrada El Vesubio
Río Uramita	Quebrada Insor	Quebrada Buenavista	Quebrada Las Brisas	Quebrada Escalera	Quebrada Piedras Blanquitas
Río Seco	Quebrada La Mulera	Quebrada La Silencia	Quebrada Tocunal	Quebrada Cantarrana	Quebrada Nobogacita
Río Chimurro	Quebrada La Mina	Quebrada Quiparadocito	Quebrada La Blanquita	Quebrada Salto	Quebrada Chontaduro
Río Verde	Quebrada Monos	Quebrada El Osito	Quebrada Llano Grande	Quebrada Golondrina	Quebrada El Salto
Quebrada Acusuti	Quebrada San Miguel	Quebrada El Tigre	Quebrada El Porvenir	Quebrada El Terco	Quebrada Los Chinos
Quebrada La Llorona	Quebrada Chupadero	Quebrada Iracal	Quebrada de Playones	Quebrada La Aguada	Quebrada Pernilla
Quebrada Palenque	Quebrada San Ruperto	Quebrada Pital	Quebrada La Manga	Quebrada Granizales	Quebrada Cruces
Quebrada El Tigree	Quebrada San Lorenzo	Quebrada Barranquitas	Quebrada Montenegro	Quebrada La Florida	Quebrada La Paloma
Quebrada la Golondrina	Quebrada de San Felipe	Quebrada Barrancas	Quebrada Carra	Río juntas de Uramita	Quebrada de Chobar
Quebrada Limo	Quebrada Los Chorlos	Quebrada La Horqueta	Quebrada Llano Gordo	Quebrada Chontadural	Quebrada Angosturas
Quebrada Mediacuesta	Quebrada El Oso	Quebrada Dabeiba Viejo	Quebrada El Retiro	Quebrada El Guagua	Quebrada Godo
Quebrada Chuscal	Quebrada La Clara	Quebrada Los Monos	Quebrada La Divisa	Quebrada Lejia	Quebrada Ambalema
Quebrada La Antigua	Quebrada Quebradona	Quebrada Florentino	Quebrada El Bosque	Quebrada Chuzacito	Quebrada Desmontadora
Quebrada Timotea	Quebrada Auyameras	Quebrada Nutibara	Quebrada Corcovado	Quebrada La Cristalina	Quebrada Azul
Quebrada del Oso	Quebrada Minas	Quebrada Los Iraeles	Quebrada Ventiadero	Quebrada La Estrella	Quebrada Tumbas
Quebrada La Zapata	Quebrada Santa Teresa	Quebrada Caliche	Quebrada La Sucia	Quebrada Membrillal	Quebrada Los Chorros
Quebrada de Portachuelo	Quebrada Apucarpo	Quebrada El Salado	Quebrada El Diablo	Quebrada Cestillal	Quebrada Quebraditas
Quebrada El Hoyo	Quebrada El Rodeo	Quebrada Murrupal	Quebrada La Lejia	Quebrada El Roble	Quebrada Morrogacho
Quebrada La Popala	Quebrada Morropelado	Quebrada El Pital	Quebrada La Morróna	Quebrada La Honda	Quebrada Chachafruto

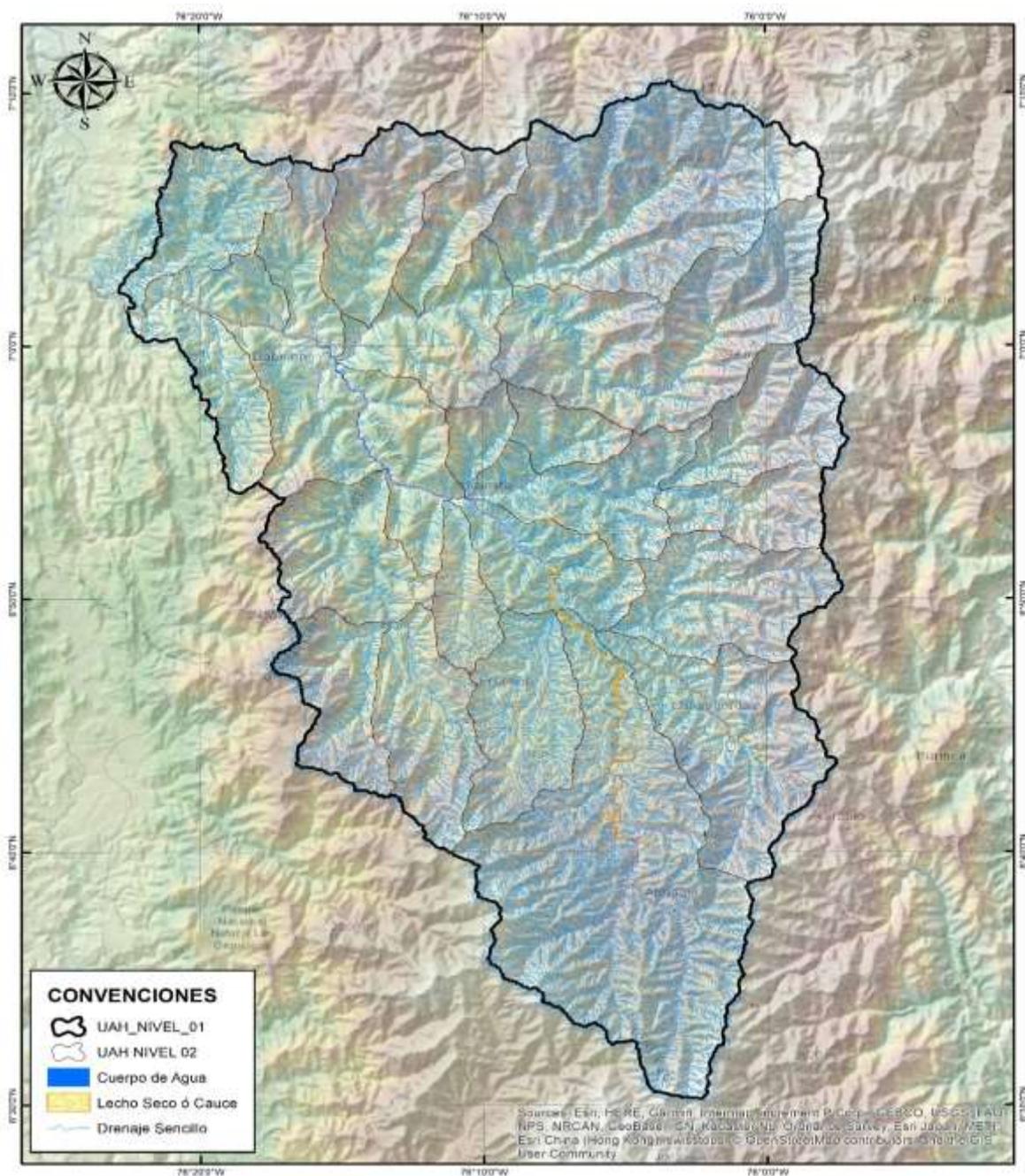
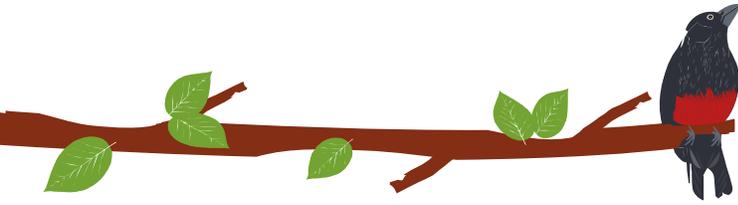


Figura 7 Red Hidrográfica UAH Cuenca Rio Sucio Alto. Elaboración propia

1.4 CARACTERIZACIÓN DEL RÉGIMEN HIDROLÓGICO

El capítulo de caracterización hidrológica contiene los resultados y análisis relacionados con la oferta hídrica de largo plazo en condiciones normales, alta y baja humedad, además de aspectos macroclimáticos que tienen que influyen en la variabilidad climática de la cuenca alta de río Sucio.



1.4.1 VARIABILIDAD HIDROCLIMÁTICA

De acuerdo con Woods (Woods, 2006), los fenómenos hidrológicos tienen variaciones significativas en tiempo y espacio. Estas variaciones están influenciadas por diferentes factores fisiográficos, así como también por actividades humanas y animales. Estos factores externos se propagan a través de los sistemas hidrológicos, resultando un gran espectro de variabilidad hidrológica en diferentes escalas espaciales y temporales. Cualquier enfoque al problema de la variabilidad requiere la selección adecuada de escalas temporales y espaciales para diferentes configuraciones físicas. La selección de la escala tendrá un resultado directo sobre la forma en que la variabilidad es percibida. De acuerdo con Doménech et al. (Andrés-Doménech, García-Bartual, Montanari, & Marco, 2015), la variabilidad climática no implica variabilidad hidrológica, esto debido al rol que cumple la cuenca en el proceso hidrológico.

La principal causa de variabilidad hidrológica temporal puede estar asociada a procesos meteorológicos que controlan la precipitación y la evaporación. Los otros factores comunes de variabilidad hidrológica temporal son el manejo del agua y la tierra que damos los humanos. La variabilidad hidrológica espacial está gobernada externamente por patrones espaciales del clima, suelos, vegetación, topografía y geología. Sin embargo, a escalas muy grandes, se desarrollan organizaciones espaciales complejas las cuáles son creadas por la dinámica interna del sistema hidrológico.

La presión antrópica interviene directa e indirectamente sobre la variabilidad hidrológica, puesto que las captaciones de agua generan desviaciones en los valores de los caudales y la transformación de las cuencas hidrográficas genera modificaciones en la magnitud y velocidad de la escorrentía, la infiltración, la evaporación y la absorción.

En la Figura 8, se presenta un diagrama conceptual para los componentes de la variabilidad climática para zonas tropicales, como es el caso de Colombia. A través de esta caracterización, se pretende explicar cuál es la influencia que tiene cada fenómeno en la variabilidad climática. Para poder discernir un evento actual, y explicar cómo y por qué se desenvuelve, es necesario recurrir a herramientas que nos permitan establecer conexiones entre las características de una realización completa contra los factores que influyen sobre el sistema.

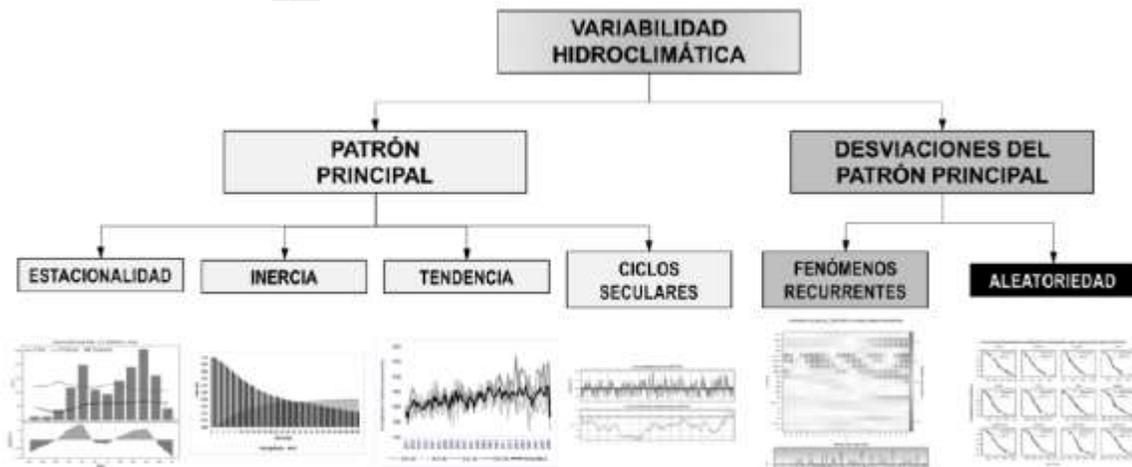
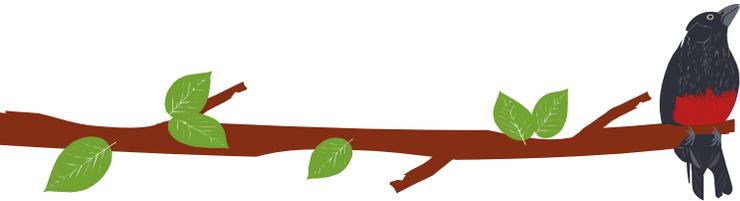


Figura 8 Diagrama conceptual de variabilidad hidroclimática para zonas tropicales. Elaboración propia a partir de Velasco (2016)





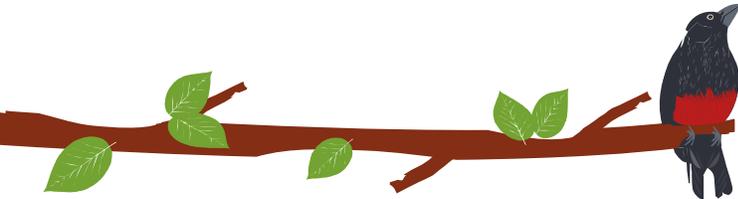
1.4.2 CARACTERIZACIÓN DE SERIES HIDROLÓGICAS EXISTENTES

El monitoreo hidrológico en la cuenca alta del RSA resulta insuficiente para caracterizar espacial y temporalmente la totalidad de la cuenca, sin embargo, el existente monitoreo hidrológico resulta de interés para la determinación de la oferta hídrica en la cuenca ya que son datos observados y que presentan un registro temporal superior a 20 años.

En este ítem abarca la caracterización temporal hidrológica de las series observadas de las estaciones que se presentan en la Figura 5 en la cuenca del Río Sucio Alto en un contexto regional, bajo un enfoque probabilístico lo cual implica el estudio de las variables como magnitudes aleatorias de acuerdo con la axiomática de Kolmogorov (Kolmogorov, 1931), en la cual es necesario demostrar la aleatoriedad de las variables en estudio: caudal medio, máximo y mínimo a escalas mensual y anual. A continuación, se presenta el ajuste a funciones de distribución de probabilidad, luego de aplicar los siguientes pasos metodológicos:

- *Aleatoriedad*: Se implementó la prueba de rachas, esta prueba permite identificar a conjuntos estadísticos, en este caso grupos mensuales (ene, feb, ..., dic), la no existencia de tendencia, ciclo, estacionalidad o algún tipo de estructura. Los conjuntos que aprueban el test son candidatos para la aplicación de enfoques estocásticos y, de esta forma obtener los momentos estadísticos que configuran la caracterización probabilística de una serie de tiempo. Si el conjunto estadístico resulta no aleatorio debe prestarse especial atención a dichas series en la aplicación de la prueba de ajuste. Ya que puede presentarse ajustes inconsistentes y en consecuencia no pueda ser hallado el valor esperado. Los resultados completos de esta prueba pueden ser consultados en el **Anexo 1 análisis de consistencia y tratamiento de la información**
- *Tendencia*: La prueba de tendencia se realizó mediante el test de Mann-Kendall, para determinar cambios en la estructura de la serie para todos los conjuntos estadísticos.
- *Ajuste Funciones de distribución de probabilidad*: La prueba de ajuste pretende confirmar o refutar si la distribución empírica, es decir de los datos observados, se ajusta a una distribución teórica. Esta prueba solo se aplica a conjuntos estadísticos aleatorios, por lo que la prueba de rachas es indispensable. Para aquellos conjuntos en donde la variable no tuvo un comportamiento aleatorio, se realiza de igual manera el ajuste, con especial cuidado en los desempeños de los ajustes obtenidos. En la hidroclimatología se consideran doce distribuciones teóricas, seleccionadas por su buen ajuste a este tipo de variables. De manera que cada conjunto estadístico pasa por 12 pruebas para seleccionar la distribución mejor ajustada. Se utiliza la prueba de hipótesis de Kolmogorov y los criterios de selección, error medio y máximo, de la distribución para el caso en el que varias distribuciones pasen la prueba.
- *Estimación de momentos estadísticos*: Una vez se determina la curva de mejor ajuste se calculan algunos puntos característicos (primer y segundo momento) de la curva para caracterizar el régimen y la oferta hídrica.





A continuación, se presentan los resultados del tratamiento para los caudales medios, mínimos y máximos.

1.4.2.1 Caudales Medios (QL 1¹)

Se presentan a continuación el tratamiento de la información como conjunto aleatorio para las diferentes series de datos de caudales medios.

1.4.2.1.1 Aleatoriedad

En la Figura 9 se presenta el mosaico del comportamiento temporal de la prueba de aleatoriedad, Para la mayoría de los casos se acepta la prueba, por lo que se puede seguir con la prueba de ajuste.

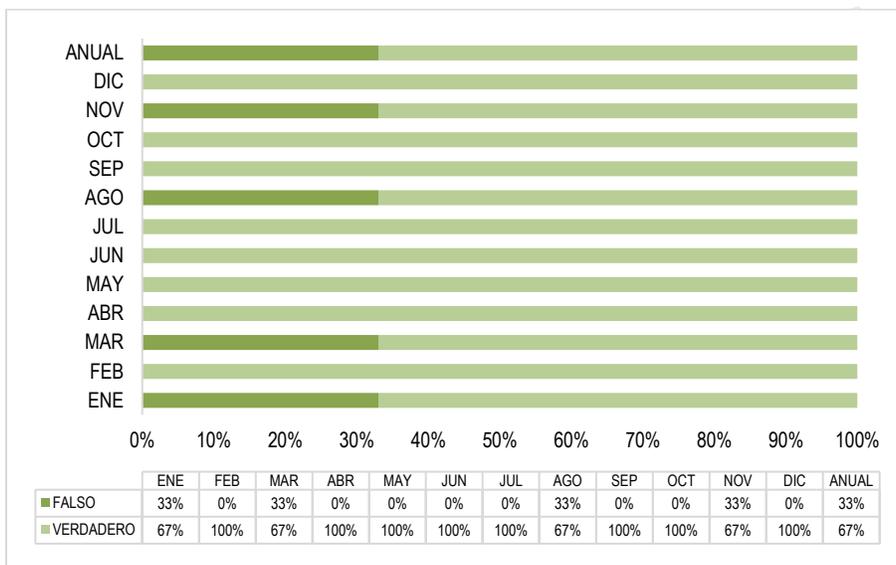


Figura 9 Prueba de aleatoriedad para los conjuntos estadísticos mensuales y anuales de la variable caudal medio. Elaboración propia.

En general, se observa que en la mayoría de los meses los conjuntos estadísticos pasan la prueba de aleatoriedad con excepción de algunos meses como enero, marzo, agosto y noviembre donde el 33 % de los datos no pasan la prueba.

1.4.2.1.2 Tendencia

Entre las estaciones de la variable caudal medio se pueden observar series de estaciones, sin tendencia, tendencia creciente y tendencia decreciente, en orden de ocurrencia. La Figura 10 presenta la cantidad de estaciones por tendencia, siendo la categoría sin tendencia o neutra la predominante, oscila entre 70 y 90% de las estaciones. la tendencia creciente registra valores en algunos casos que superan el 50%.

¹ La etiqueta numérica en la variable indica si el valor corresponde a un dato medio, máximo o mínimo de acuerdo con la configuración dada por el IDEAM.



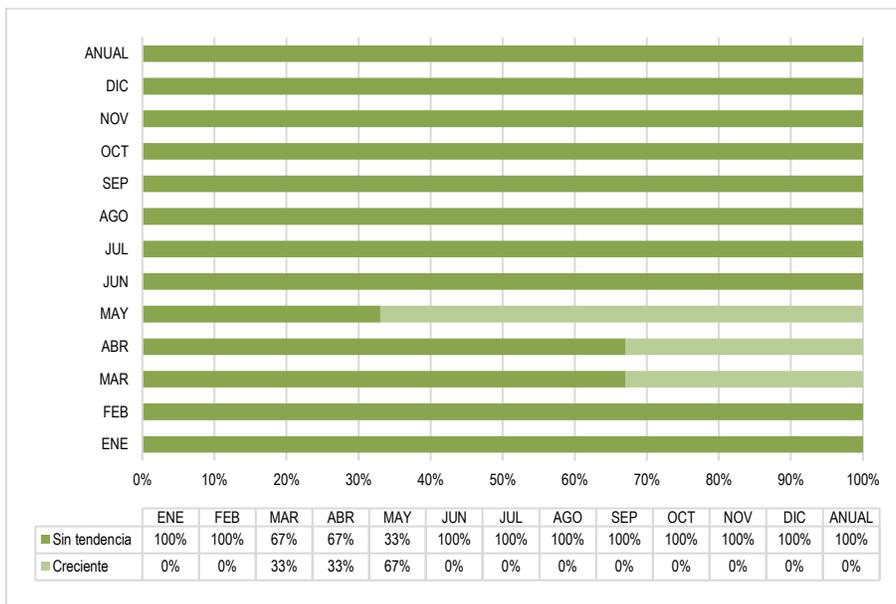


Figura 10 Prueba de tendencia Caudales Medios. Elaboración propia

se observa en general que la mayoría de los conjuntos estadísticos, no tienen ningún tipo de tendencia, en algunos casos la tendencia es creciente, a nivel anual predomina la no tendencia.

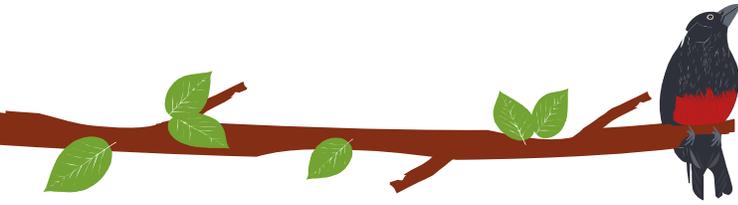
1.4.2.1.3 Ajuste a funciones de probabilidad

Los resultados de los ajustes de las funciones empíricas de distribución para la variable caudal medio de las estaciones priorizadas anteriormente en la SZH 1111 indican que en la escala mensual las funciones de mayor representatividad en la zona son la Gumbel con asimetría derecha, log-normal y gamma con cerca del 60% de los ajustes. En la escala anual, las funciones con mayor frecuencia son Gumbel con asimetría a la derecha y la distribución log normal.

Tabla 3 Resumen de los ajustes de la función de distribución teórica en los conjuntos mensuales y anuales. Caudal Medio.

PDF	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Mensual	Anual
weibull_min	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	2.8%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	2.8%	0.0%
gengamma	2.8%	0.0%	0.0%	2.8%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	5.6%	0.0%
lognorm	0.0%	2.8%	2.8%	0.0%	0.0%	0.0%	2.8%	0.0%	0.0%	0.0%	2.8%	0.0%	11.1%	33.3%
powerlaw	2.8%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	2.8%	0.0%
loggamma	0.0%	0.0%	0.0%	2.8%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	5.6%	0.0%	0.0%	8.3%	0.0%
expon	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
norm	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	2.8%	0.0%	2.8%	0.0%	5.6%	0.0%
gamma	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	2.8%	5.6%	0.0%	0.0%	2.8%	2.8%	0.0%	13.9%	0.0%
gumbel_l	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	2.8%	2.8%	0.0%
genextreme	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
gumbel_r	2.8%	2.8%	5.6%	2.8%	8.3%	2.8%	0.0%	5.6%	0.0%	0.0%	0.0%	5.6%	36.1%	66.7%
nakagami	0.0%	2.8%	0.0%	0.0%	0.0%	2.8%	0.0%	0.0%	2.8%	0.0%	0.0%	0.0%	8.3%	0.0%

Elaboración propia



1.4.2.2 Caudales Máximos (QL 2)

Se presentan a continuación el tratamiento de la información como conjunto aleatorio para las diferentes series de datos de caudales máximos

1.4.2.2.1 Aleatoriedad

En la Figura 11 se presenta el mosaico del comportamiento temporal de la prueba de aleatoriedad, Para la mayoría de los casos se acepta la prueba.

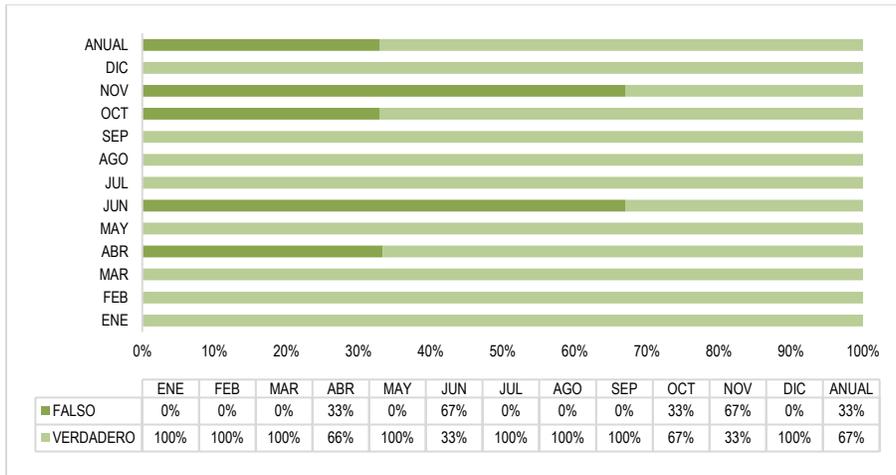


Figura 11 Prueba de aleatoriedad para los conjuntos estadísticos mensuales y anuales de la variable caudal máximo. Elaboración propia

En general, se observa que en la mayoría de los meses los conjuntos estadísticos pasan la prueba de aleatoriedad con excepción de algunos meses como abril, junio, octubre y noviembre donde más del 50 % de los datos no pasan la prueba.

1.4.2.2.2 Tendencia

Entre las estaciones de la variable caudal máximo se pueden observar series de estaciones, sin tendencia, tendencia creciente, en orden de ocurrencia. La Figura 12 presenta la cantidad de estaciones por tendencia, siendo la categoría sin tendencia o neutra la predominante, oscila entre 70 y 100% de las estaciones. la tendencia creciente registra valores en algunos casos que superan el 50%.

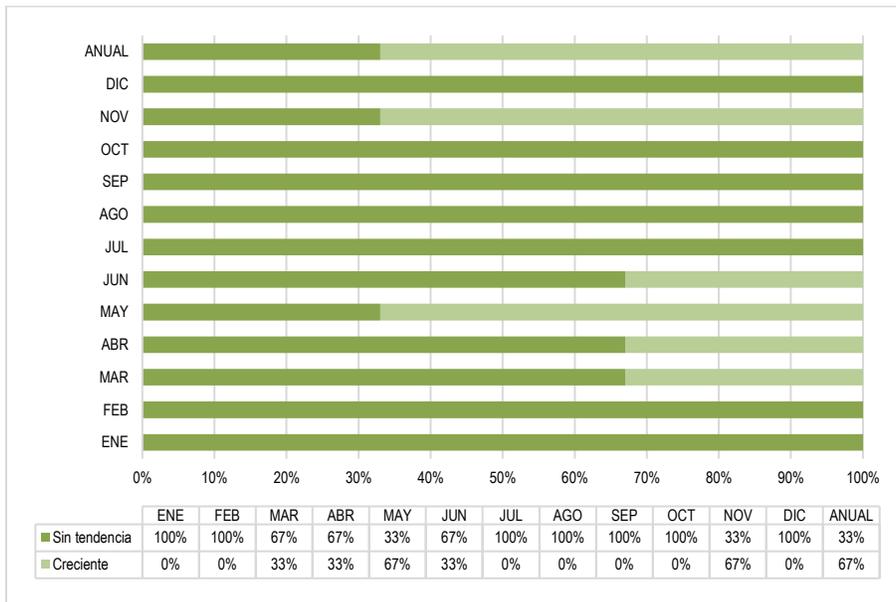


Figura 12 Prueba de tendencia Caudales Máximos. Elaboración propia

Se observa en general que la mayoría de los conjuntos estadísticos, no tienen ningún tipo de tendencia, en algunos casos la tendencia es creciente específicamente en los meses de mayo y noviembre, a nivel anual predomina la tendencia creciente con un 67%.

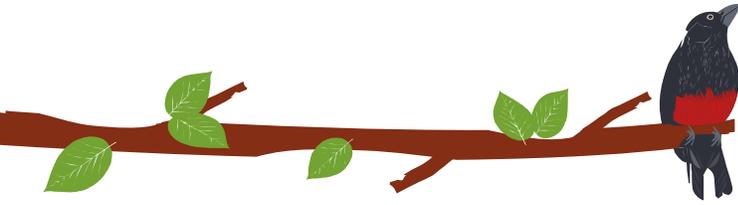
1.4.2.2.3 Ajuste a funciones de probabilidad

Los resultados de los ajustes de las funciones empíricas de distribución para la variable caudal máximo de las estaciones priorizadas anteriormente en la SZH 1111 indican que en la escala mensual las funciones de mayor representatividad en la zona son la Gumbel con asimetría derecha, función generalizada extrema y gamma con cerca del 70% de los ajustes. En la escala anual, las funciones con mayor frecuencia son Gumbel con asimetría a la derecha y la distribución log normal.

Tabla 4. Resumen de los ajustes de la función de distribución teórica en los conjuntos mensuales y anuales. Caudal Máximo

PDF	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Mensual	Anual
weibull_min	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	2.8%	2.8%	0.0%
gengamma	2.8%	2.8%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	5.6%	0.0%
lognorm	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	2.8%	0.0%	0.0%	2.8%	0.0%
pow erlaw	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	2.8%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	2.8%	0.0%
loggamma	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	2.8%	0.0%	0.0%	0.0%	2.8%	0.0%
ex pon	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
norm	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	2.8%	0.0%	0.0%	0.0%	2.8%	0.0%
gamma	0.0%	0.0%	0.0%	2.8%	0.0%	0.0%	0.0%	2.8%	0.0%	0.0%	2.8%	2.8%	11.1%	0.0%
gumbel_l	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
genextreme	2.8%	5.6%	5.6%	0.0%	2.8%	0.0%	2.8%	2.8%	0.0%	2.8%	2.8%	0.0%	27.8%	66.7%
gumbel_r	2.8%	0.0%	2.8%	5.6%	0.0%	2.8%	5.6%	0.0%	2.8%	0.0%	2.8%	2.8%	27.8%	0.0%
nakagami	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	2.8%	0.0%	2.8%	0.0%	2.8%	0.0%	0.0%	8.3%	0.0%

Fuente: Elaboración propia



1.4.2.3 Caudales Mínimos (QL 3)

Se presentan a continuación el tratamiento de la información como conjunto aleatorio para las diferentes series de datos de caudales mínimos.

1.4.2.3.1 Aleatoriedad

En la Figura 13 se presenta el mosaico del comportamiento temporal de la prueba de aleatoriedad, Para la mayoría de los casos se acepta la prueba, por lo que se puede seguir con la prueba de ajuste y se tiene especial cuidado donde no se cumple.

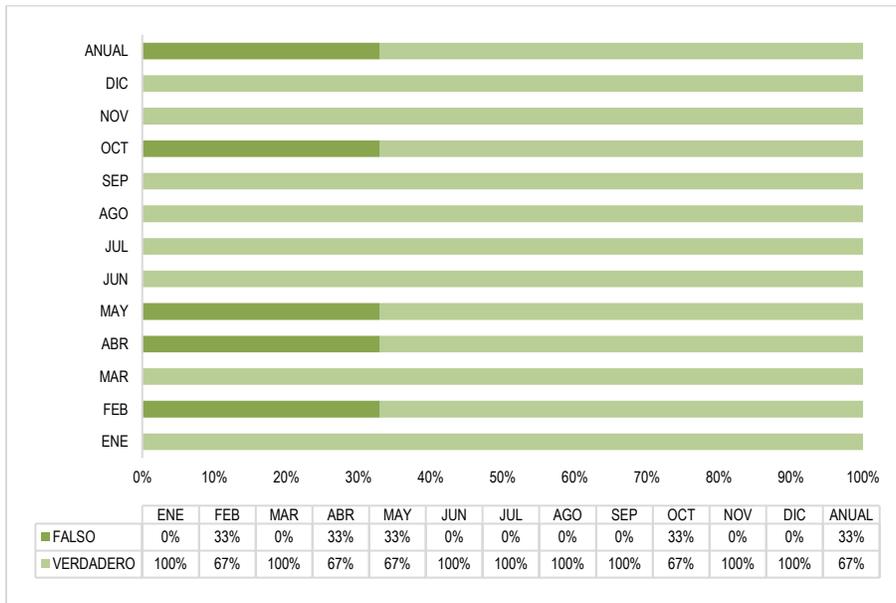


Figura 13 Prueba de aleatoriedad para los conjuntos estadísticos mensuales y anuales de la variable caudal mínimo. Elaboración propia.

En general, se observa que en la mayoría de los meses los conjuntos estadísticos pasan la prueba de aleatoriedad con excepción de algunos meses como febrero, abril, mayo y noviembre donde el 33 % de los datos no pasan la prueba.

1.4.2.3.2 Tendencia

Entre las estaciones de la variable caudal mínimo se pueden observar series de estaciones, sin tendencia, tendencia creciente y tendencia decreciente, en orden de ocurrencia. La Figura 14 presenta la cantidad de estaciones por tendencia, siendo la categoría sin tendencia o neutra la predominante, oscila entre 60 y 100% de las estaciones. la tendencia creciente registra valores en algunos casos que superan el 20%.

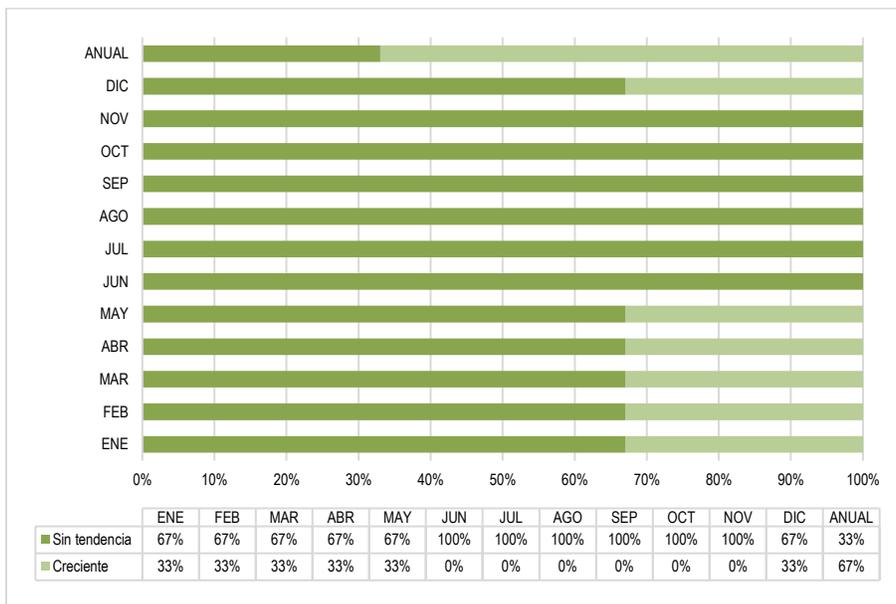
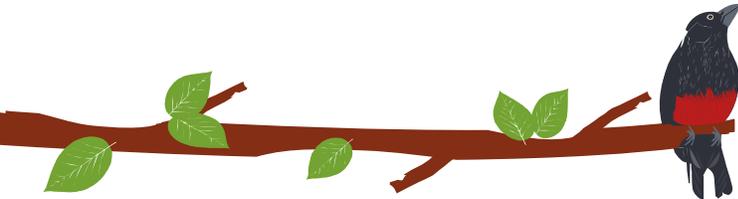


Figura 14 Prueba de tendencia Caudales Mínimo. Elaboración propia

Se observa en general que la mayoría de los conjuntos estadísticos, no tienen ningún tipo de tendencia, en seis de los meses la tendencia es creciente en un 33%, a nivel anual predomina la tendencia creciente con un 67%.

1.4.2.3.3 Ajuste a funciones de probabilidad

Los resultados de los ajustes de las funciones empíricas de distribución para la variable caudal mínimo de las estaciones priorizadas anteriormente en la SZH 1111 indican que en la escala mensual las funciones de mayor representatividad en la zona son la Gumbel con asimetría derecha, función generalizada extrema y gamma con cerca del 70% de los ajustes. En la escala anual, las funciones con mayor frecuencia son Gumbel con asimetría a la derecha y la distribución log normal

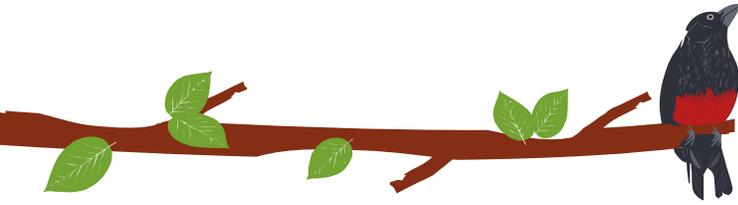


Tabla 5. Resumen de los ajustes de la función de distribución teórica en los conjuntos mensuales y anuales. Caudal Mínimo.

PDF	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Mensual	Anual
weibull_min	0.0%	0.0%	2.8%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	2.8%	0.0%
gengamma	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	2.8%	2.8%	0.0%
lognorm	2.8%	0.0%	0.0%	2.8%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	5.6%	0.0%
powerlaw	0.0%	2.8%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	2.8%	2.8%	0.0%	8.3%	0.0%
loggamma	0.0%	0.0%	0.0%	2.8%	0.0%	2.8%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	2.8%	8.3%	0.0%
expon	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
norm	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	2.8%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	2.8%	2.8%	0.0%	8.3%	0.0%
gamma	0.0%	2.8%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	5.6%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	8.3%	0.0%
gumbel_l	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
genextreme	0.0%	0.0%	2.8%	0.0%	2.8%	5.6%	0.0%	2.8%	5.6%	2.8%	2.8%	2.8%	27.8%	33.3%
gumbel_r	5.6%	2.8%	2.8%	2.8%	0.0%	0.0%	2.8%	2.8%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	19.4%	66.7%
nakagami	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%

Fuente: Elaboración propia

1.4.3 MODELO LLUVIA ESCORRENTIA

La red de monitoreo existente en RSA resulta insuficiente para caracterizar la totalidad del área de la cuenca objeto de estudio y, por lo tanto, se requiere el uso de técnicas de modelación matemática (modelación hidrológica) para estimar la oferta en todas las unidades análisis hidrológico (UAH) planteadas para la cuenca RSA dando alcance a los términos de referencia.

Para realizar la caracterización hidrológica a la diferentes UAH, fue necesario establecer una ventana de análisis espacial a través del software QGIS (Team QGIS Development, 2016), donde se abarcó gran parte de la región de la SZH 1111 para de esta forma incluir cuencas instrumentadas las cuales permitieran calibrar los diferentes modelos hidrológicos. Luego del análisis de consistencia se cuenta con un total de dos (2) estaciones al interior de la cuenca, las cuales se emplearon para el desarrollo del modelo lluvia escorrentía a resolución temporal diaria. Partiendo de los resultados presentados anteriormente en el análisis de información hidrológica se procedió a generar la caracterización hidrológica en las diferentes UAH (Nivel 1, Nivel 2 y Nivel 3 - cuencas abastecedoras). La metodología que se estableció para la caracterización hidrológica en las UAH se compone del tratamiento de datos, la preparación de las entradas al modelo, selección del modelo lluvia escorrentía, calibración y validación del modelo y generación de las series en cada una de las UAH. En la siguiente figura se presenta el esquema metodológico implementado.



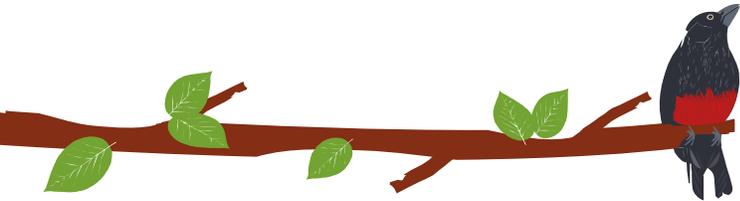


Figura 15 Esquema metodológico modelo lluvia escorrentía. Elaboración propia

A continuación, una breve descripción metodológica:

- *Obtención de campos de variables meteorológicas a escala diaria:* con el fin de obtener valores de precipitación, brillo solar y temperatura para cada una de las UHN se tendrán en cuenta los resultados de la caracterización climatológica presentada en el documento de **Componente Climatológico**, las estaciones que cumplieron con los criterios de consistencia fueron seleccionadas y posteriormente, se generaron campos espaciales diarios en una serie con tamaño temporal de 1980 a 2015.
- *Entradas al modelo:* a partir de los campos interpolados, se generaron series para cada una de las UHN por medio del software QGIS y la herramienta estadística zonal, determinando el valor medio de la variable en cada una de las áreas objeto de estudio.
- *Modelo Lluvia Escorrentía GR4J:* se empleó el modelo lluvia escorrentía GR4J, el modelo conceptual emplea la precipitación y evapotranspiración potencial a resolución diaria, e incluye cuatro parámetros, X_1 máxima capacidad de almacenamiento, X_2 coeficiente del intercambio de agua de captación, X_3 máxima capacidad diaria del depósito, X_4 "lag" del hidrograma.
- *Calibración y validación:* Teniendo en cuenta la información hidrológica en las cuencas instrumentadas se determinaron los parámetros óptimos para el modelo lluvia escorrentía, luego a partir de los resultados de la parametrización, se hizo un análisis espacial para determinar el mejor conjunto de parámetros en las UAH que no presentan monitoreo.
- *Generación de series en UHN:* Una vez el modelo calibrado y validado, se procedió a regionalizar los parámetros teniendo en cuenta la proximidad al área de estudio para luego simular las ofertas hídricas en la totalidad de la cuenca RSA y sus UAH.

• Campos de precipitación y Brillo Solar

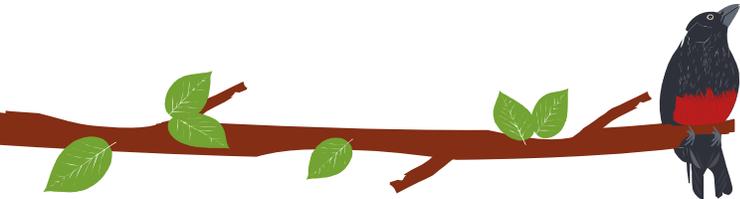
Para la generación de campos de la variable precipitación, fue necesario tener en cuenta los resultados presentados **Capítulo del Componente Climatológico** (caracterización espacial), donde se presentan las estaciones que pasaron los criterios de consistencia y completitud y los resultados de evaluación del error de interpolación a escala mensual.

En las variables precipitación y brillo solar se empleó el método IDW para la generación de campos a nivel diario desde 1980 a 2015. El proceso de validación de la interpolación se realizó al azar en los diferentes años estimando el Error medio Absoluto relativo (MARE) y el Error Máximo.

Para el caso de la temperatura, se generaron las regresiones lineales entre el valor correspondiente a cada día y la elevación extraída del modelo digital de terreno, las series fueron generadas tomando la mediana de elevación de todo el polígono correspondiente a las UAH Nivel 1, Nivel 2 y Nivel 3 cuencas abastecedoras.

• Entradas al modelo

Precipitación: A partir de los campos generados anteriormente se prosiguió a construir una serie en cada una de las áreas aferentes a las estaciones hidrológicas seleccionadas



y a las UHN. Se aclara que es necesario contar con entradas de precipitación en cada una de las áreas donde se cuenta con información hidrológica con el fin de lograr optimizar los parámetros en cada.

Evapotranspiración potencial: El modelo seleccionado incorpora la temperatura a través de la evapotranspiración potencial. Esta se estimó a partir de la metodología propuesta por McGuinness & Bordne en 1972 (McGuinness & Bordne, 1972) como resultado de los análisis de Oudin en 2005 (Oudin et al., 2005) luego de la evaluación de varios modelos de ETP para la evaluación de la escorrentía con el modelo GR4J.

- **Modelación hidrológica**

El estudio de la relación entre la precipitación que ocurren sobre una cuenca y la correspondiente escorrentía que genera, es uno de los aspectos básicos del análisis hidrológico. La evaluación de dicha relación ha sido objeto de numerosos estudios e investigaciones. Desde las primeras formulaciones desarrolladas por T. Mulvaney en 1851, citadas por K. Beven (2001), hasta los tiempos actuales se han desarrollado numerosos procedimientos y metodologías para su estudio. Dado que resulta inviable estudiar directamente el proceso físico de lluvia – escorrentía, se hace uso de los modelos que, dada su definición, son una representación aproximada de la “realidad” y ayudan a conocer, emular y pronosticar los procesos de un sistema, ahorrando costos y evitando el riesgo que trae consigo el estudio directo. Como ejemplo de sistema se puede hacer alusión a una cuenca hidrográfica (Figura 16), en donde la tarea es encontrar el operador que transforme la precipitación en caudal. Se puede aplicar un procedimiento tan sencillo como el método racional $Q = CIA$ (MULVANEY, 1850) o el hidrograma unitario (Sherman, 1932) hasta llegar a estructuras matemáticas avanzadas.

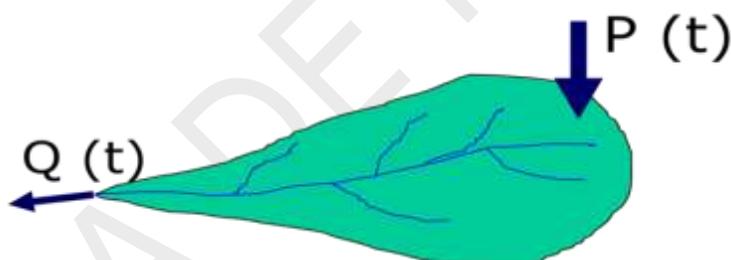


Figura 16. Esquema simplificado de una cuenca hidrográfica. Tomado de: Google imágenes 2018

Los sistemas hidrológicos son generalmente analizados mediante el uso de modelos matemáticos y por ende su clasificación se da basándose en tres criterios: la aleatoriedad de las variables, su variación en el espacio y su variación en el tiempo. Estos modelos pueden ser obtenidos mediante la experiencia, la estadística o en fundamentos de leyes físicas (Viessman & Lewis, 1996). Teniendo en cuenta lo anterior el operador matemático que se ajustó a las características del área de estudio y a la información disponible se describe a continuación.

1.4.3.1 Modelo GR4J

El modelo hidrológico GR4J es un modelo conceptual de precipitación pluvial concentrado con solo cuatro parámetros, que fue mejorado por Perrin en el 2003, basado en el modelo GR3J de Edijatno en 1999 (Edijatno, De Oliveira Nascimento, Yang, Makhlof, & Michel, 1999), que solo incluía tres parámetros libres (Ancil, Perrin, & Andréassian, 2003), El modelo GR4J es uno de los modelos más simples y se ha demostrado que tiene la capacidad de simular el proceso de lluvia-escorrentía a escala diaria. Este modelo ha sido ampliamente utilizado en la simulación dinámica de la humedad del suelo y de los flujos en modelos conceptuales obteniendo resultados muy satisfactorios. El modelo



GR4J tiene 4 parámetros para optimización durante la fase calibración del protocolo de modelación matemática:

- X1: máxima capacidad de almacenamiento tanque superior(mm),
- X2: coeficiente del intercambio de agua (mm/día),
- X3: máxima capacidad de almacenamiento tanque subsuperficial (mm),
- X4: tiempo de respuesta de la unidad hidrográfica entre el inicio de la precipitación y el pico del hidrograma (días).

En la Figura 17 se presenta el esquema conceptual del modelo GR4J con todas sus entradas y su modelo matemático y los parámetros necesarios para su desarrollo.

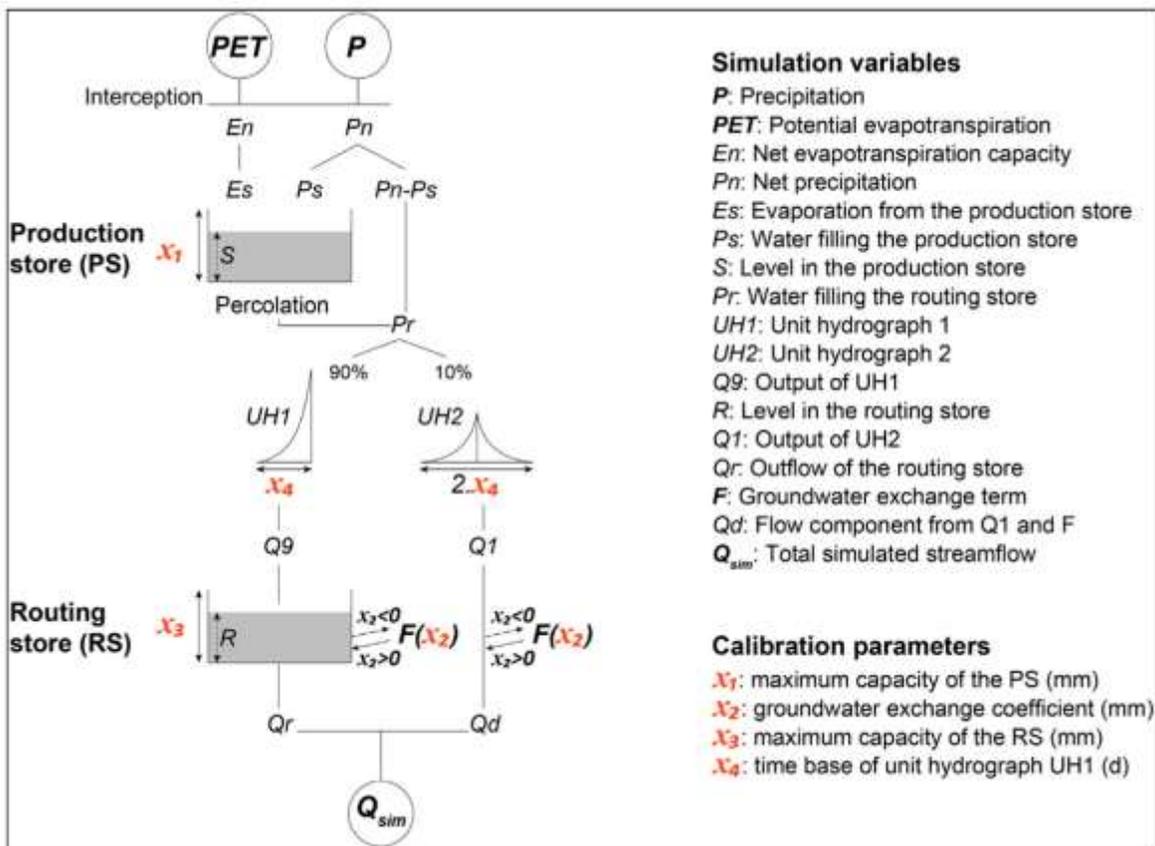
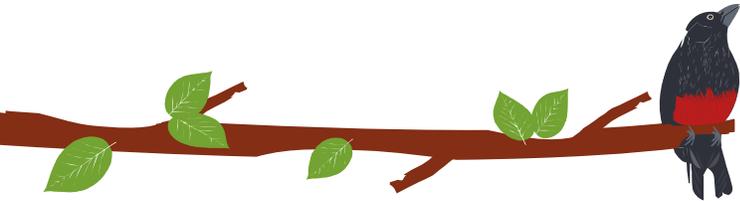


Figura 17. Esquema conceptual del modelo GR4J Tomado de: (Bodian et al., 2018)

Se denota por **P** (mm/día) la **cantidad de lluvia** y por **E** (mm/día) la **evapotranspiración potencial (PET)**. P es una estimación de la lluvia y E proviene de una curva de PET media-interanual o de estimaciones a escala diaria. A continuación, se presentan las ecuaciones del modelo, las cuales corresponden a las ecuaciones integradas en un paso de tiempo. La primera operación que se realiza es la neutralización de P por E para determinar una precipitación neta Pn y una evapotranspiración neta En, teniendo en cuenta:

$$\text{si } P > E, \text{ entonces } \rightarrow Pn = P - E \text{ y } En = 0$$

$$\text{si } P < E, \text{ entonces } \rightarrow Pn = 0 \text{ y } En = E - P$$



En caso de que **Pn** sea diferente de cero, una fracción de **Pn** va al depósito de producción y se calcula mediante la ecuación (1):

$$Ps = \frac{X1 * \left(1 - \left(\frac{S}{X1}\right)^S\right) * \tanh\left(\frac{Pn}{X1}\right)}{1 + \frac{S}{X1} * \tanh\left(\frac{Pn}{X1}\right)}$$

Ecuación 1

Donde **x1** (mm) y **S** son, la capacidad máxima y el nivel de producción de almacenamiento. De lo contrario, cuando **En** es diferente de cero, una parte de la evaporación **Es** se elimina del tanque de producción. Está dado por la ecuación (2):

$$Es = \frac{S * \left(2 - \frac{S}{X1}\right) * \tanh\left(\frac{En}{X1}\right)}{1 + \left(1 - \frac{S}{X1}\right) * \tanh\left(\frac{En}{X1}\right)}$$

Ecuación 2

El nivel de producción de almacenamiento se actualiza a través de la Ecuación 3:

$$S = S - Es + P$$

Ecuación 3

Luego se calcula la percolación (**Perc**) proveniente del almacenamiento de producción:

$$Perc = S * \left\{1 - \left[1 + \left(\frac{4}{9} * \frac{S}{X1}\right)^4\right]^{-\frac{1}{4}}\right\}$$

Ecuación 4

El nivel de almacenamiento de producción se actualiza nuevamente:

$$S = S - Perc$$

Ecuación 5

La cantidad de agua **Pr** que finalmente llega a la parte de enrutamiento del modelo es:

$$Pr = Perc + (Pn - p)$$

Ecuación 6

El **Pr** se divide en dos componentes de flujo, el 90% se enruta por un hidrograma unitario **UH1** y un almacén de enrutamiento y, el 10% por un hidrograma unitario único **UH2**. **UH1** y **UH2** dependen del mismo parámetro **X4**, la base de tiempo de **UH1** es expresada en días. Las ordenadas de los hidrogramas se calculan a partir de las curvas **S** (la acumulación de la proporción de unidades de lluvia tratadas por el hidrograma en función del tiempo), respectivamente denominadas **SH1** y **SH2**. **SH1** se define en función del tiempo por:

para $t = 0$

$$SH1(t) = 0$$

Ecuación 7

para $0 < t < X4$

$$SH1(t) = \left(\frac{t}{X4}\right)^{\frac{5}{2}}$$

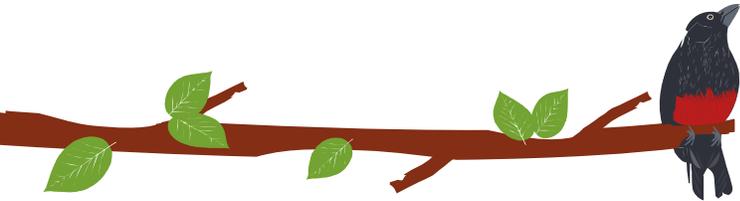
Ecuación 8

para $t > X4$

$$SH1(t) = 1$$

Ecuación 9

SH2 se define en función del tiempo por:



para $t = 0$

$$SH2(t) = 0$$

Ecuación 10

para $0 < t < X4$

$$SH2(t) = \frac{1}{2} * \left(\frac{t}{X4}\right)^{\frac{5}{2}}$$

Ecuación 11

Para $X4 < t < 2 * X4$

$$SH2(t) = 1 - \frac{1}{2} * \left(2 - \frac{t}{X4}\right)^{\frac{5}{2}}$$

Ecuación 12

Para $t > 2X4$

$$SH2(t) = 1$$

Ecuación 13

Las ordenadas de **UH1** y **UH2** se obtienen de:

$$UH1(j) = SH1(j) - SH1(j - 1)$$

$$UH2(j) = SH2(j) - SH2(j - 1)$$

Ecuación 14

donde **j** es un número entero. Para cada paso de tiempo **i**, las salidas **Q9** y **Q1** de los dos hidrogramas se calculan como:

$$Q9(i) = 0.9 * \sum_{k=1}^i UH1(k) * Pr(i - k + 1)$$

$$Q1(i) = 0.1 * \sum_{k=1}^i UH2(k) * Pr(i - k + 1)$$

Ecuación 15

Con $l = \text{int}(X4) + 1$ y $m = \text{int}(2 * X4) + 1$. Un término de intercambio de agua subterránea (pérdida o ganancia) se calcula como:

$$F = X2 \left(\frac{R}{X3}\right)^{\frac{7}{2}}$$

Ecuación 16

R es el nivel del almacén de rutas, **X3** la capacidad máxima de un día del almacén y **X2** el coeficiente de intercambio de agua, que es positivo en caso de una ganancia, y negativo en caso de pérdida, o nulo. El nivel en el depósito de enrutamiento se actualiza al agregar la salida **Q9** del hidrograma **HU1** y **F**:

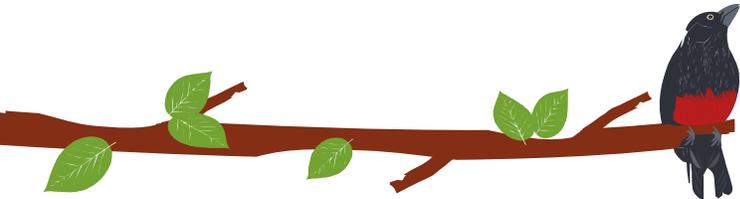
$$R = \max(0; R + Q9 + F)$$

Ecuación 17

Luego, se vacía en una salida **Qr** dada por:

$$Qr = R * \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{R}{X3}\right)^4 \right]^{-\frac{1}{4}} \right\}$$





Ecuación 18

El nivel en el depósito se convierte en:

$$R = R - Q_r$$

Ecuación 19

La salida **Q1** del hidrograma **UH2** pasa por las mismas centrales para proporcionar el componente de flujo **Qd**

$$Q_d = \max(0; Q_1 + F)$$

Ecuación 20

El flujo total de **Q** finalmente está dado por:

$$Q = Q_r + Q_d$$

Ecuación 21

1.4.3.2 Definición de entradas a los modelos hidrológicos

Teniendo en cuenta el modelo conceptual anterior, se procedió a identificar la información necesaria para la realización del modelo lluvia escorrentía GR4J, a continuación, se presenta la distribución espacial de las estaciones presentes en el área de estudio.

1.4.3.3 4.1.3 Calibración y validación

Para la implementación del modelo lluvia escorrentía GR4J se emplearon las dos estaciones hidrológicas que se encontraban al interior de la Cuenca Rio Sucio alto como elementos de calibración, fue necesario estimar sus respectivas áreas aferentes desanidadas con el fin de generar series sintéticas de precipitación, temperatura y brillo solar, estas dos últimas para la estimación y corrección de la evapotranspiración potencial. En la Figura 18 se presenta la ubicación espacial de las estaciones y su respectiva área aferente.



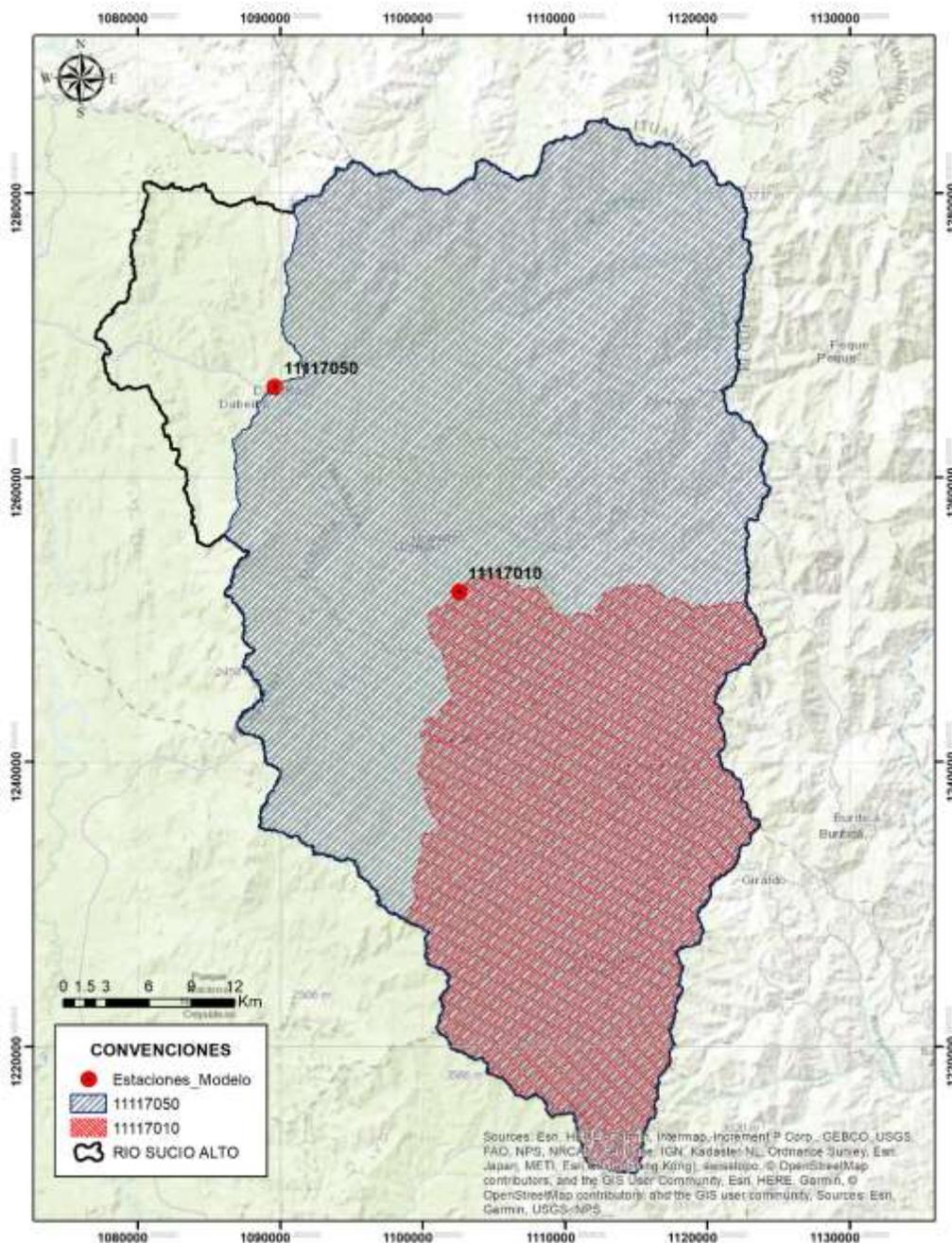
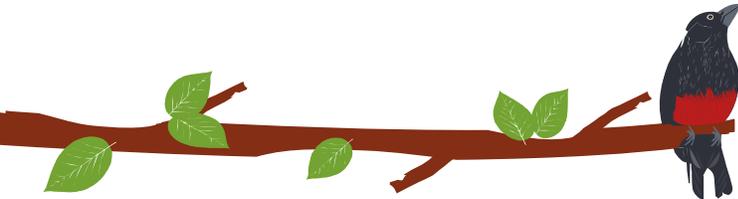
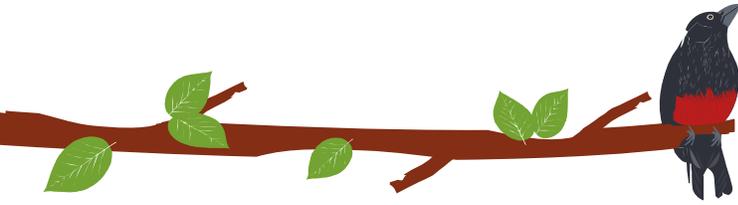


Figura 18. Ubicación espacial estaciones Hidrológicas para calibración. Elaboración propia

Teniendo en cuenta la información climatológica generada para las dos áreas aferentes que se presentó en la figura anterior, se procedió a la construcción de los modelos lluvia escorrentía. El proceso de calibración combinó dos elementos. En primer lugar, un proceso de optimización matemática mediante la minimización de la función objetivo la cual fue evaluada bajo distintas métricas de desempeño como Coeficiente de Eficiencia (NASH), Raíz del Error cuadrático Medio (RMSE), Raíz del error cuádruple medio (R4MS4E), Error Medio Absoluto Relativo (MARE) y el coeficiente de Sesgo (p-BIAS). En las Figura 19 y Figura 20, se observa la evolución del desempeño de los modelos con



relación a los valores observados de las dos estaciones hidrológicas en el proceso de calibración.

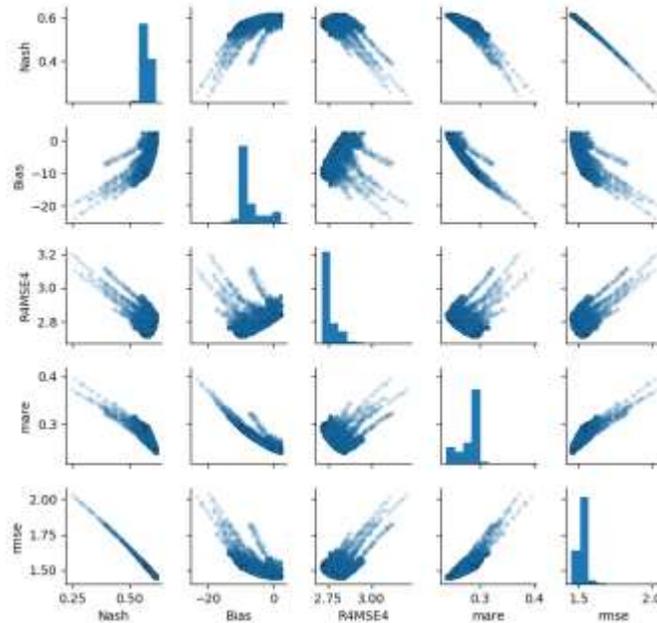
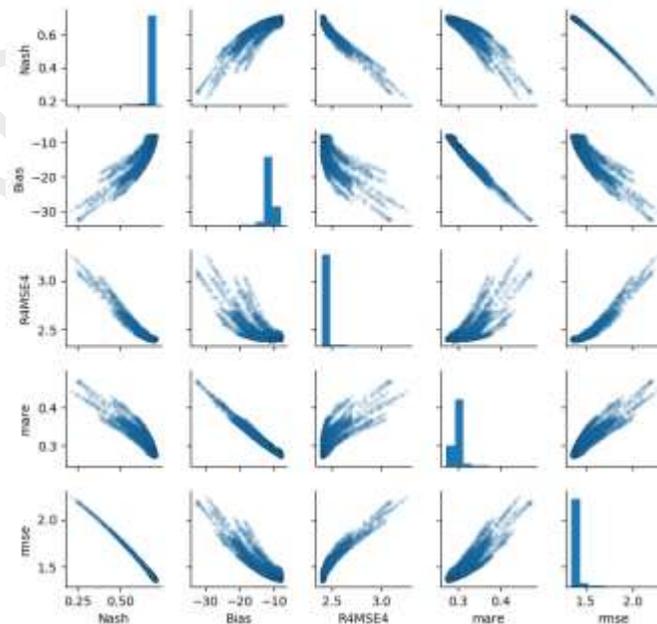


Figura 19. Diagrama de fase de las métricas de desempeño del Modelo lluvia escorrentía estación 11117050. Elaboración propia

se observa para el coeficiente de Nash valores que oscilan en un rango de 0.3 a 0.6 siendo este último el mejor resultado, el R4MS4 presentó resultados en un rango de 2.2 a 3.11, el RMSE registra valores en un rango de 1.1 y 1.9 y la métrica MARE valores de 0.2 a 0.3.



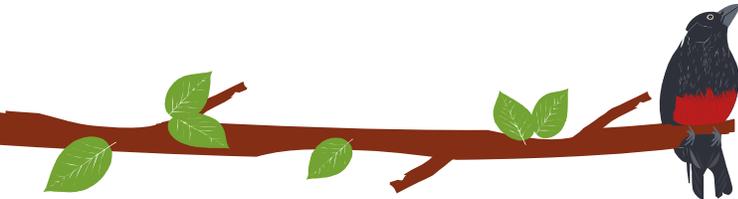


Figura 20. Diagrama de fase de las métricas de desempeño del Modelo lluvia escorrentía estación 11117010. Elaboración propia.

Se observa para el coeficiente de Nash valores que oscilan en un rango de 0.2 a 0.7 siendo este último el mejor resultado, el R4MS4 presento resultados en un rango de 2.3 a 3.21, el RMSE registra valores en un rango de 1.3 a 3.3 y la métrica MARE valores de 0.2 a 0.4.

En segundo lugar, se probaron más de 10.000 conjuntos de parámetros iniciales (*seeds*) en el proceso de optimización para evaluar la convergencia de los parámetros y descartar equifinalidad de estos. Las Figura 21 y Figura 22 muestran la convergencia del proceso de optimización de los parámetros y la función de desempeño NSE (Nash–Sutcliffe Model Efficiency Coefficient) para las dos estaciones.

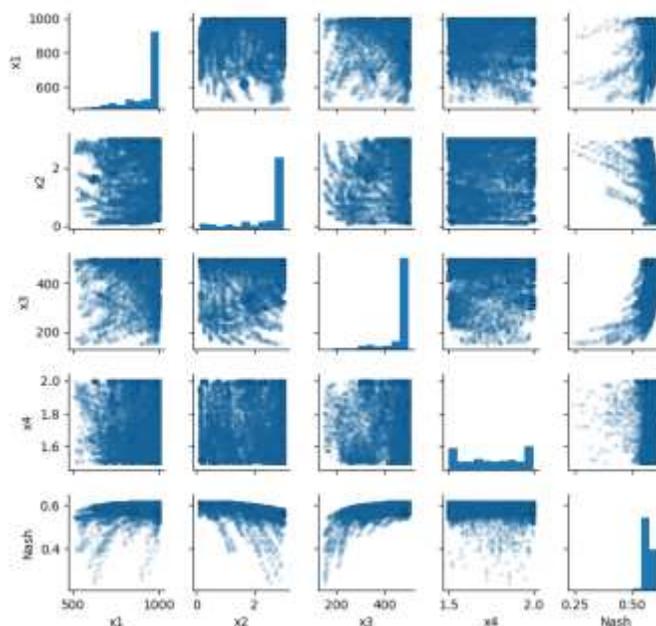


Figura 21. Evolución de los parámetros estación 11117050. Elaboración propia

Se observa para los parámetros x_1 , x_2 y x_3 la convergencia hacia valores aceptables, el coeficiente de Nash de igual forma presenta convergencia hacia valores aceptables.



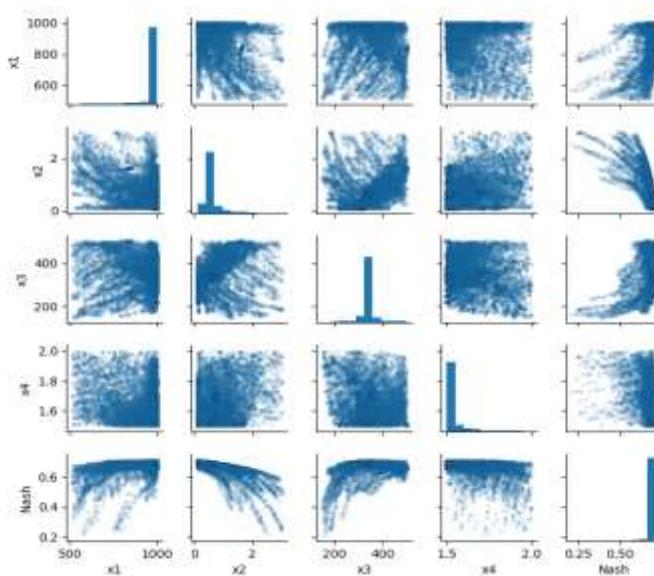
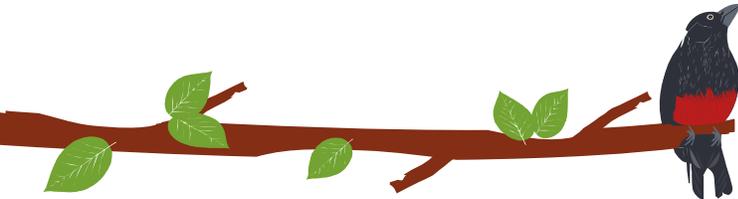


Figura 22. Evolución de los parámetros estación 11117010. Elaboración propia

Se observa para los parámetros x_1 , x_2 y x_3 la convergencia hacia valores aceptables, el coeficiente de Nash de igual forma presenta convergencia hacia valores aceptables.

Desde las Figura 21 y Figura 22 se puede inferir que para las dos estaciones todos los parámetros a excepción del parámetro x_4 , convergen hacia valores aceptables de desempeño. En el caso del parámetro x_4 algunos autores como Andreassin y Perrin (Anctil et al., 2003) han demostrado la viabilidad de aproximar este parámetro como el rezago (*lag*) del hidrograma unitario el cual puede ser estimado mediante la función de correlación cruzada entre la precipitación de la cuenca y sus caudales.

Partiendo de los análisis mencionados anteriormente se determina qué conjunto de parámetros arrojan el mejor desempeño en cada una de las dos estaciones en las cuales fueron calibrados. En la siguiente tabla se presenta los parámetros y sus respectivas métricas de desempeño.

Tabla 6 Parámetros modelo GR4J

Estación	BIAS	Nash	R4MSE4	MARE	RMSE	X1	X2	X3	X4
11117010	-8.2	0.7	2.4	0.3	1.4	955.8	0.1	400.9	1.6
11117050	0.6	0.6	2.8	0.2	1.5	998.8	0.5	492.5	1.7

Fuente: Elaboración propia

En las Figura 23 y Figura 25 se presentan los valores simulados versus los valores observados teniendo en cuenta los parámetros determinados, en color rojo se presentan los valores simulados y en color azul los observados.

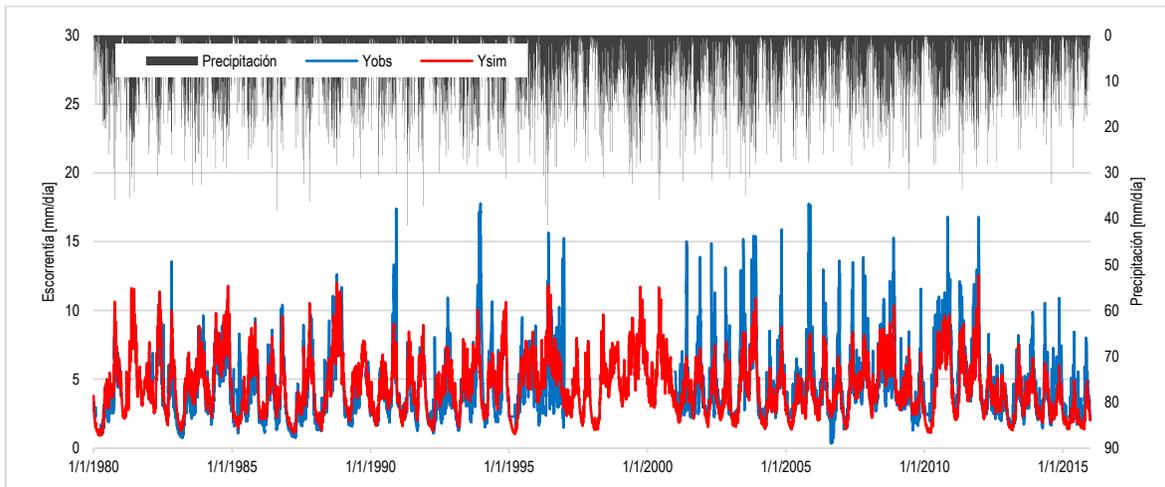
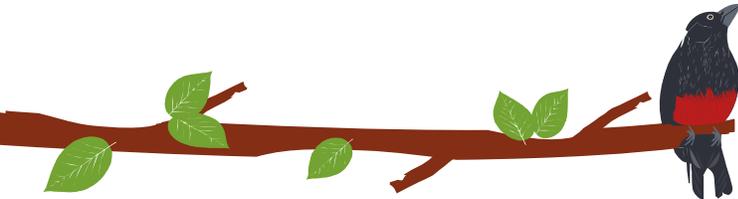


Figura 23. Modelo Lluvia Escorrentía Estación 11117050. Elaboración propia

Se observan los valores simulados en color rojo, de forma visual se ajustan en gran parte a los valores observados, aunque no tienen la capacidad de generar valores máximos de la misma magnitud que los valores observados. Lo anterior puede ser resultado de la baja densidad de estaciones al interior de la cuenca RSA y el efecto de suavizado de los procesos de interpolación de la precipitación.

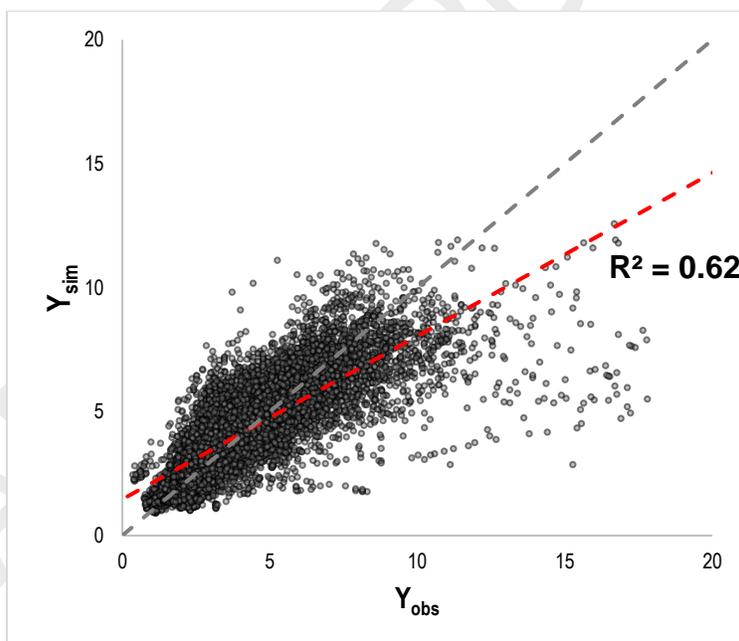


Figura 24. Grafica de dispersión modelo lluvia escorrentía estación 11117050. Elaboración propia

se observa un coeficiente de determinación de 0.62. El sesgo fue corregido en los valores finales de la serie simulada.



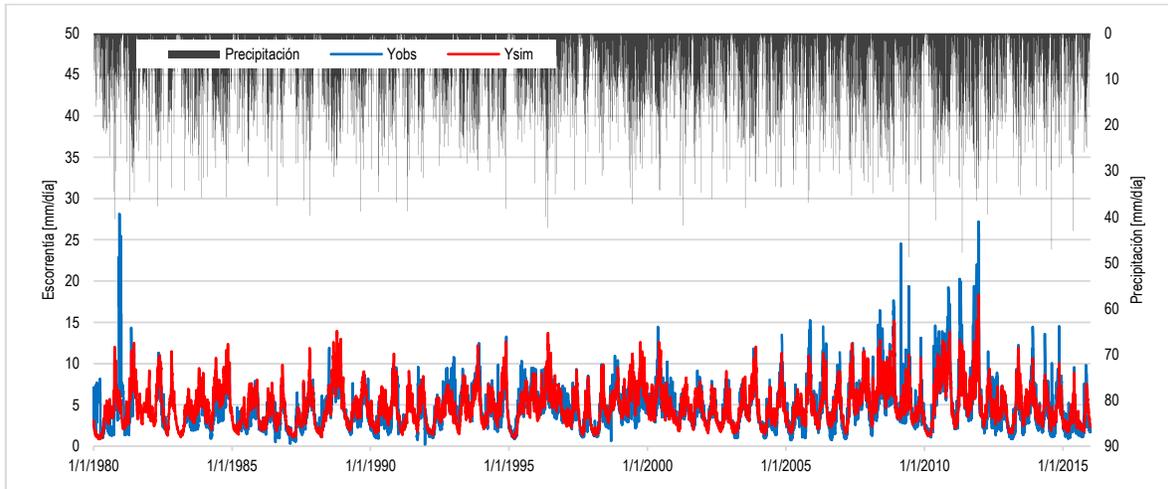
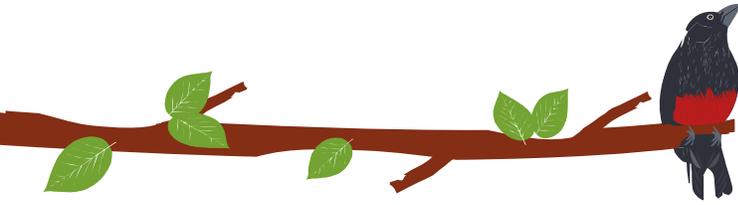


Figura 25. Modelo Lluvia Escorrentía Estación 11117070. Elaboración propia

Se observan los valores simulados en color rojo, de forma visual se ajustan en gran parte a los valores observados, aunque no tienen la capacidad de generar valores máximos de igual magnitud que en los registros históricos. Lo anterior puede ser resultado de la baja densidad de estaciones al interior de la cuenca RSA y el efecto de suavizado de los procesos de interpolación de la precipitación.

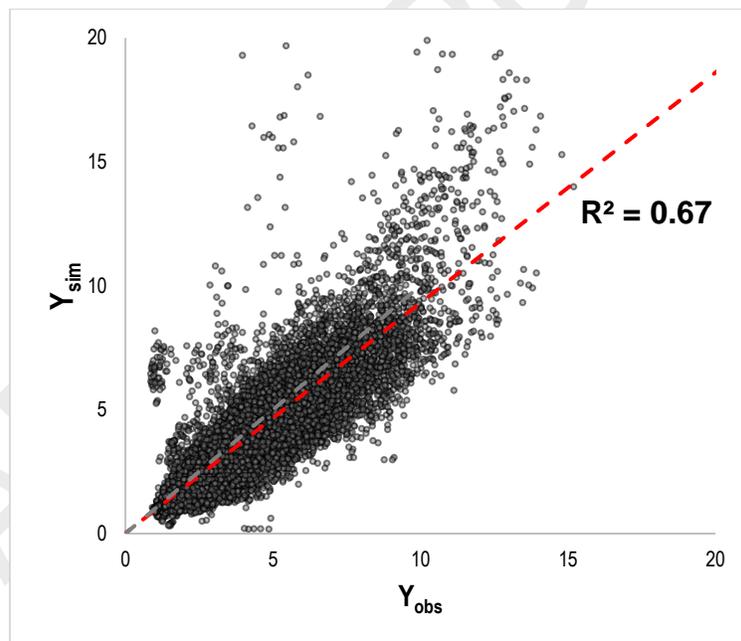


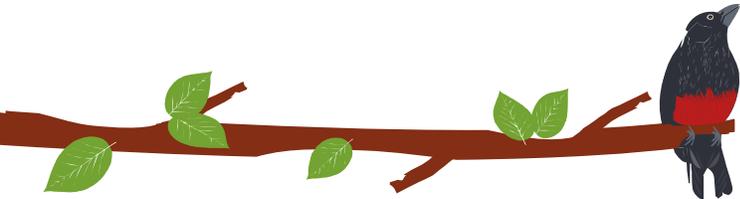
Figura 26. Grafica de dispersión modelo lluvia escorrentía estación 11117050. Elaboración propia

Se observa un coeficiente de determinación de 0.67. A diferencia del ejercicio anterior el sesgo en este modelo es insignificante.

1.4.4 PARAMETRIZACIÓN PARA LAS UAH DE LA CUENCA DEL RSA

Partiendo de los resultados presentados anteriormente donde se determinaron los parámetros óptimos para los modelos desarrollados en las estaciones de control se procede a regionalizar los parámetros, debido a la ubicación espacial de las estaciones





(ver Figura 18) y las áreas aferentes a los puntos de calibración, por tal motivo se asignan los parámetros que corresponda dependiendo su ubicación espacial.

A continuación, en las Tabla 7, Tabla 8 y Tabla 9 se presentan los parámetros para las diferentes unidades de análisis hidrológico

Tabla 7 Parámetros modelo Lluvia – Escorrentía UAH Nivel 1

UAH	x1	x2	x3	x4
1111010000	998.83	0.54	492.55	1.67

Fuente: Elaboración propia

Tabla 8 Parámetros modelo Lluvia – Escorrentía UAH Nivel 2

UAH	x1	x2	x3	x4
1111010100	998.83	0.54	492.55	1.67
1111010200	998.83	0.54	492.55	1.67
1111010300	998.83	0.54	492.55	1.67
1111010400	998.83	0.54	492.55	1.67
1111010500	998.83	0.54	492.55	1.67
1111010600	955.84	0.12	400.91	1.61
1111010700	955.84	0.12	400.91	1.61
1111010800	955.84	0.12	400.91	1.61
1111010900	955.84	0.12	400.91	1.61
1111011000	998.83	0.54	492.55	1.67
1111011100	998.83	0.54	492.55	1.67
1111011200	998.83	0.54	492.55	1.67
1111011300	998.83	0.54	492.55	1.67
1111011400	998.83	0.54	492.55	1.67
1111011500	998.83	0.54	492.55	1.67
1111011600	998.83	0.54	492.55	1.67
1111011700	998.83	0.54	492.55	1.67
1111011800	998.83	0.54	492.55	1.67
1111011900	998.83	0.54	492.55	1.67
1111012000	955.84	0.12	400.91	1.61
1111012100	998.83	0.54	492.55	1.67
1111012200	998.83	0.54	492.55	1.67
1111012300	998.83	0.54	492.55	1.67
1111012400	998.83	0.54	492.55	1.67
1111012500	998.83	0.54	492.55	1.67
1111012600	998.83	0.54	492.55	1.67

Fuente: Elaboración propia

Tabla 9 Parámetros modelo Lluvia – Escorrentía UAH Nivel 3 Cuencas Abastecedoras

UAH	x1	x2	x3	x4
1111010201	998.83	0.54	492.55	1.67
1111010401	998.83	0.54	492.55	1.67
1111010601	955.84	0.12	400.91	1.61
1111010602	955.84	0.12	400.91	1.61
1111010701	955.84	0.12	400.91	1.61
1111010702	955.84	0.12	400.91	1.61
1111010801	955.84	0.12	400.91	1.61
1111010802	955.84	0.12	400.91	1.61
1111010901	955.84	0.12	400.91	1.61
1111011601	998.83	0.54	492.55	1.67
1111012301	998.83	0.54	492.55	1.67

Fuente: Elaboración propia

A partir de los parámetros presentados se procede a construir las series para cada una de las UAH, mediante el proceso directo de simulación con los parámetros establecidos



y las entradas respectivas para cada UAH. Los resultados se presentan en el anexo series hidrológicas.

1.5 OFERTA HÍDRICA SUPERFICIAL TOTAL Y DISPONIBLE A ESCALA MENSUAL Y ANUAL.

El presente apartado comprende la metodología y resultados para la estimación de la oferta hídrica superficial total y disponible a escala mensual y anual tanto para años normales o promedio como para años secos.

A partir de las series generadas anteriormente se procede a realizar el ajuste a funciones de distribución teórica para cada uno de los conjuntos estadísticos, la metodología se describió en el numeral 1.1. Luego del ajuste y selección de la mejor función de distribución teórica, se estima el primer momento estadístico a los conjuntos para determinar la oferta, a continuación, se presenta el resumen de las distribuciones teóricas seleccionadas para cada una de las UAH.

Tabla 10 Resumen de los ajustes de la función de distribución teórica en los conjuntos mensuales y anuales. UAH Nivel 1

PDF	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Mensual	Anual
weibull_min	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
gengamma	0.0%	0.0%	0.0%	8.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	8.3%	0.0%
lognorm	8.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	8.3%	16.7%	0.0%
powerlaw	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
loggamma	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	8.3%	0.0%	0.0%	8.3%	0.0%
expon	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
norm	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	8.3%	8.3%	0.0%	0.0%	8.3%	0.0%	0.0%	0.0%	25.0%	0.0%
gamma	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	8.3%	0.0%	8.3%	100.0%
gumbel_l	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
genextreme	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
gumbel_r	0.0%	0.0%	8.3%	0.0%	0.0%	0.0%	8.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	16.7%	0.0%
nakagami	0.0%	8.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	8.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	16.7%	0.0%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 11 Resumen de los ajustes de la función de distribución teórica en los conjuntos mensuales y anuales. UAH Nivel 2

PDF	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Mensual	Anual
weibull_min	0.0%	2.2%	2.2%	0.0%	0.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.3%	0.3%	0.0%	0.3%	5.8%	0.0%
gengamma	0.6%	0.0%	0.0%	1.3%	1.9%	0.3%	0.0%	0.3%	1.0%	1.9%	0.3%	1.0%	8.7%	15.4%
lognorm	1.9%	2.6%	4.5%	1.3%	1.3%	1.6%	1.9%	2.2%	0.6%	0.0%	0.6%	1.6%	20.2%	11.5%
powerlaw	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.3%	0.0%	0.0%	0.3%	0.0%
loggamma	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.6%	2.6%	0.6%	0.0%	1.0%	2.9%	5.1%	3.2%	16.0%	15.4%
expon	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
norm	0.0%	0.0%	0.0%	0.6%	2.2%	1.3%	0.3%	0.0%	0.3%	0.0%	0.0%	0.6%	5.4%	0.0%
gamma	0.0%	0.3%	0.6%	0.3%	0.0%	0.0%	0.3%	1.0%	0.3%	0.0%	0.3%	0.3%	3.5%	0.0%
gumbel_l	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	2.2%	0.0%	0.0%	2.2%	0.0%
genextreme	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
gumbel_r	0.3%	1.9%	0.3%	0.0%	0.3%	1.3%	4.2%	2.2%	1.3%	0.0%	0.6%	0.6%	13.1%	23.1%
nakagami	1.3%	1.3%	0.3%	3.5%	1.0%	1.3%	0.6%	1.9%	2.9%	0.3%	0.3%	0.0%	14.7%	15.4%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 12 Resumen de los ajustes de la función de distribución teórica en los conjuntos mensuales y anuales. UAH Nivel 3

PDF	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Mensual	Anual
weibull_min	0.0%	0.8%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.8%	0.0%
gengamma	0.0%	0.0%	0.0%	0.8%	0.0%	0.8%	0.0%	0.0%	0.8%	0.8%	0.0%	0.0%	3.0%	0.0%
lognorm	1.5%	3.8%	3.0%	0.8%	2.3%	0.8%	1.5%	0.8%	0.8%	0.8%	2.3%	2.3%	20.5%	54.5%
powerlaw	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	2.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	2.3%	0.0%
loggamma	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	2.3%	2.3%	0.0%	0.0%	3.0%	3.8%	2.3%	1.5%	15.2%	0.0%
expon	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
norm	0.8%	0.0%	0.0%	2.3%	1.5%	0.0%	0.0%	0.0%	1.5%	0.0%	0.0%	2.3%	8.3%	9.1%
gamma	0.8%	1.5%	1.5%	0.8%	0.0%	0.0%	0.8%	0.8%	0.0%	0.8%	0.0%	0.0%	6.8%	27.3%
gumbel_l	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	1.5%	0.0%	0.0%	1.5%	0.0%
genextreme	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
gumbel_r	0.0%	0.8%	3.0%	0.0%	0.8%	1.5%	5.3%	2.3%	0.0%	0.0%	3.0%	1.5%	18.2%	9.1%
nakagami	4.5%	1.5%	0.0%	2.3%	1.5%	0.8%	0.8%	2.3%	0.8%	0.8%	0.8%	0.0%	15.9%	0.0%

Fuente: Elaboración propia

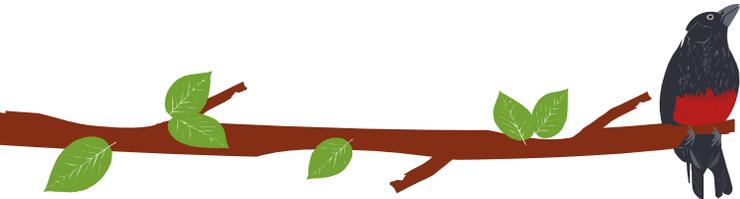
De acuerdo con el IDEAM (IDEAM, 2014) la condición hidrológica seca hace referencia a los caudales mínimos mensuales de la serie de caudales medios multianuales, asegurando que el periodo de análisis incluya eventos niño y niña.

A continuación, se presentan los resultados tanto de oferta hídrica (m^3/s) como de rendimiento hídrico en ($l/s/km^2$) a nivel temporal y espacial para las diferentes UAH.

1.5.1 UAH-1 Cuenca Rio Sucio Alto

Se presenta a continuación la oferta y rendimiento hídrico para las condiciones normales y secas de la Unidad de análisis hidrológico Cuenca Rio Sucio Alto.

En la Figura 27 se observa una distribución intra-anual de la escorrentía de dos máximos en los meses de mayo-junio y octubre-noviembre. A su vez, los periodos de mínima humedad se ubican sobre los meses de enero - abril y julio - septiembre, siendo consistente con la distribución de la precipitación.



1.5.1.1 Condición Hidrológica – Año Normal

Para condiciones normal se observa que la cuenca a nivel anual tiene como oferta hídrica 109.3 m³/s, a nivel mensual los meses que presentan un mayor valor corresponden a mayo, octubre y noviembre, el mes con la menor oferta hídrica total disponible corresponde a marzo con 59.5 m³/s.

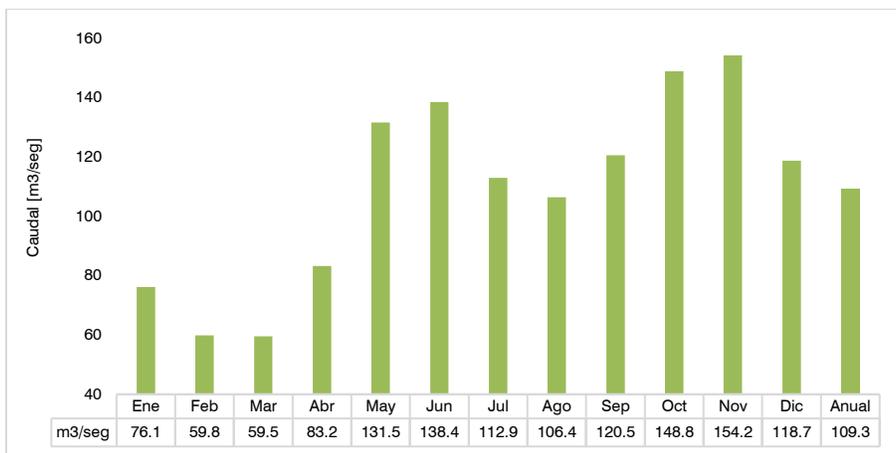


Figura 27. Distribución intra-anual de la escorrentía en la cuenca de RSA en condiciones hidrológicas de año normal. Elaboración propia.

Los valores de cantidad y rendimiento hídrico para las condiciones hidrológicas normales se describen a continuación para la Cuenca Alta de Río Sucio.

Tabla 13 Oferta Hídrica Mensual y Anual [m³/s] – Año normal - UHN - 1

UAH	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
1111010000	76.1	59.8	59.5	83.2	131.5	138.4	112.9	106.4	120.5	148.8	154.2	118.7	109.3

Fuente: Elaboración propia

Tabla 14 Rendimiento Hídrico Mensual y Anual [l/s Km²] – Año normal - UHN - 1

UAH	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
1111010000	35.0	27.5	27.3	38.2	60.5	63.7	51.9	48.9	55.4	68.4	70.9	54.6	50.3

Fuente: Elaboración propia

1.5.1.2

1.5.1.3 Condición Hidrológica – Año Seco

Para la condición hidrológica de año seco se observa en la escala anual que la cuenca presenta una oferta hídrica disponible de 51.01 m³/s. A nivel mensual los meses que presentan un mayor valor corresponden a mayo, junio, julio y noviembre, diciembre, el mes que presenta el menor valor de oferta hídrica corresponde a marzo con 25.15 m³/s.



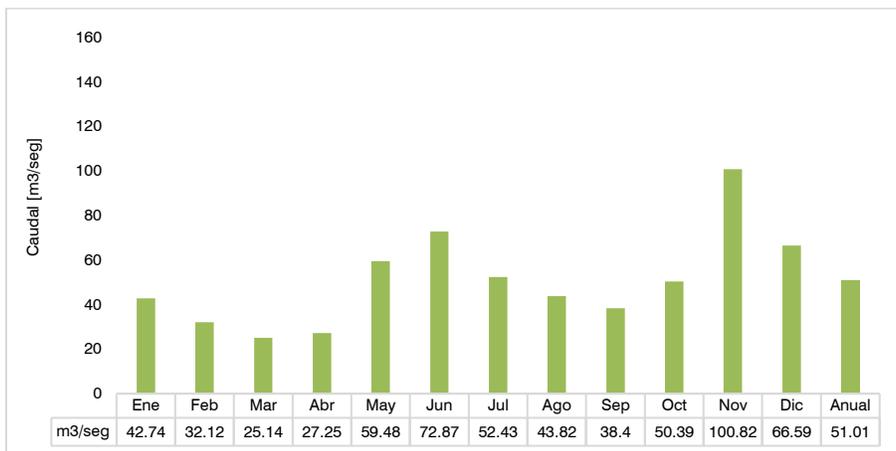
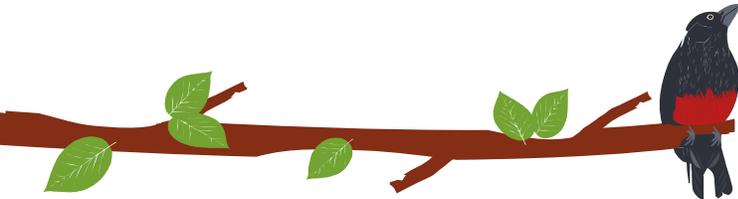


Figura 28. Distribución intra-anual de la escorrentía en la cuenca de RSA en condiciones hidrológicas de año seco. Elaboración propia.

La condición hidrológica en año seco representa una disminución del 53% en relación con la condición normal en la escala anual. A nivel mensual, las diferencias oscilan entre un 35% y hasta un 68% en el mes de septiembre.

Tabla 15 Oferta Hídrica Mensual y Anual [m³/s] – Año seco - UHN - 1.

UAH	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
1111010000	42.74	32.12	25.14	27.25	59.48	72.87	52.43	43.82	38.40	50.39	100.82	66.59	51.01

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 16 Rendimiento Hídrico Mensual y Anual [l/s Km²] – Año seco - UHN - 1

UAH	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
1111010000	19.65	14.77	11.56	12.53	27.35	33.51	24.11	20.15	17.66	23.17	46.36	30.62	23.45

Fuente: Elaboración propia.

1.5.2 UAH-2 Cuencas Nivel 02

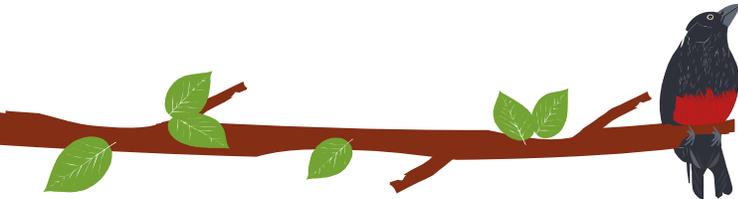
1.5.2.1 Condición Hidrológica – año normal

Para condiciones normales se observa que las UAH – 2 a nivel anual el máximo valor que se registra corresponde a 19.23 m³/s en la UAH río La Herradura en la parte más alta de la cuenca, a nivel mensual los meses que presentan un mayor valor en todas las UAH corresponden a mayo, junio, octubre y noviembre.

Tabla 17 Oferta Hídrica Mensual y Anual [m³/s] – Año normal - UHN - 2

UAH	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
1111010100	1.7	1.3	1.2	1.6	2.6	2.9	2.5	2.4	2.6	3.2	3.3	2.6	2.3
1111010200	2.1	1.5	1.5	1.9	3.1	3.6	3.2	2.9	3.2	4.0	4.0	3.2	2.8
1111010300	2.3	1.7	1.6	1.9	3.1	3.8	3.4	3.2	3.3	4.3	4.2	3.4	3.0
1111010400	2.2	1.7	1.7	2.3	3.6	3.9	3.3	3.1	3.4	4.2	4.3	3.4	3.1
1111010500	3.1	2.5	2.5	3.5	5.6	5.8	4.7	4.4	5.0	6.2	6.5	4.9	4.6
1111010600	3.2	2.7	2.8	4.2	6.8	6.8	5.2	5.1	5.8	7.3	7.7	5.4	5.2
1111010700	13.0	11.0	12.1	17.5	25.1	23.4	18.1	17.1	19.9	25.3	27.8	21.3	19.2



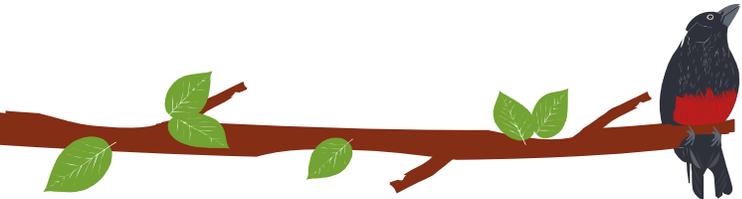


UAH	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
1111010800	4.8	3.8	4.0	5.8	8.8	8.6	6.5	6.3	7.5	9.5	10.4	8.0	7.0
1111010900	3.2	2.5	2.6	3.8	5.9	5.9	4.6	4.5	5.2	6.5	6.9	5.2	4.7
1111011000	1.6	1.3	1.3	1.8	2.9	3.0	2.5	2.4	2.7	3.3	3.4	2.6	2.4
1111011100	2.3	1.8	1.8	2.6	4.0	4.2	3.5	3.3	3.8	4.5	4.5	3.5	3.3
1111011200	6.5	5.1	5.1	7.3	11.4	12.0	10.0	9.6	10.7	12.9	12.8	9.8	9.4
1111011300	7.5	5.9	6.0	8.5	13.5	14.3	12.1	11.6	13.0	15.2	15.1	11.2	11.2
1111011400	1.6	1.3	1.3	1.8	2.8	3.1	2.6	2.5	2.8	3.3	3.3	2.5	2.4
1111011500	2.6	2.0	2.0	2.8	4.5	4.8	4.1	3.9	4.3	5.1	5.2	4.0	3.8
1111011600	1.5	1.2	1.1	1.5	2.5	2.7	2.3	2.2	2.4	2.9	3.0	2.3	2.2
1111011700	2.3	1.8	1.7	2.4	3.8	4.1	3.5	3.4	3.8	4.4	4.5	3.5	3.3
1111011800	0.6	0.4	0.4	0.5	0.8	1.0	0.9	0.8	0.8	1.1	1.1	0.8	0.8
1111011900	1.2	0.9	0.9	1.2	2.1	2.3	1.8	1.7	1.9	2.4	2.5	1.9	1.7
1111012000	2.2	1.7	1.7	2.5	4.0	4.3	3.4	3.2	3.7	4.6	4.8	3.6	3.3
1111012100	2.5	2.0	2.0	2.7	4.3	4.6	3.8	3.6	4.1	5.0	5.2	4.0	3.6
1111012200	1.0	0.8	0.8	1.1	1.7	1.8	1.5	1.4	1.6	2.0	2.0	1.6	1.5
1111012300	0.7	0.6	0.6	0.7	1.2	1.3	1.1	1.0	1.2	1.4	1.5	1.1	1.0
1111012400	1.3	1.0	1.0	1.2	2.0	2.3	2.0	1.9	2.0	2.5	2.6	2.0	1.8
1111012500	2.5	1.9	1.9	2.5	4.1	4.5	3.8	3.6	4.0	4.8	4.9	3.8	3.5
1111012600	1.0	0.8	0.7	1.0	1.6	1.8	1.5	1.4	1.6	1.9	2.0	1.5	1.4

Fuente: Elaboración propia

Tabla 18 Rendimiento Hídrico Mensual y Anual [L/s Km²] – Año normal - UHN – 2

UAH	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
1111010100	31.5	23.8	22.9	29.8	48.7	55.3	47.8	44.4	49.0	60.5	61.3	48.1	43.6
1111010200	30.5	22.5	21.8	27.9	45.8	52.8	46.1	42.5	46.9	58.1	58.8	46.3	41.7
1111010300	27.7	20.0	19.1	22.6	36.8	44.9	41.3	38.2	39.7	51.0	50.4	40.4	36.0
1111010400	34.3	26.6	26.7	35.6	57.0	61.8	51.5	48.2	53.3	66.4	68.0	53.0	48.6
1111010500	36.6	30.6	29.8	42.0	66.6	70.0	56.0	53.4	59.6	74.2	78.2	58.6	54.6
1111010600	36.1	30.7	31.6	47.2	77.8	76.9	59.1	58.1	65.9	82.5	87.4	60.9	59.4
1111010700	38.8	32.6	35.9	52.1	74.9	69.6	54.0	50.9	59.3	75.4	82.7	63.4	57.3
1111010800	35.2	27.8	29.6	42.7	64.6	63.2	48.0	46.6	55.1	70.1	76.7	58.9	51.7
1111010900	33.3	26.5	27.5	39.8	61.9	62.1	48.3	47.0	54.7	68.5	73.2	54.9	50.0
1111011000	33.4	26.4	26.4	37.1	58.2	61.6	50.4	48.0	54.5	66.5	68.8	52.5	48.7
1111011100	33.1	26.1	26.3	37.4	58.4	61.4	50.8	47.8	54.6	65.9	66.1	50.4	48.3
1111011200	33.1	26.0	25.8	37.5	58.4	61.4	51.2	48.9	54.6	66.3	65.7	50.1	48.3
1111011300	34.1	27.1	27.3	39.0	61.7	65.4	55.1	53.0	59.3	69.5	69.0	51.3	51.1
1111011400	34.0	26.6	26.6	36.9	59.0	63.9	53.9	51.7	57.4	67.9	69.0	52.5	50.1
1111011500	34.1	26.7	26.5	36.6	58.7	63.5	54.1	51.6	57.1	67.7	68.8	52.6	49.9
1111011600	33.3	25.8	25.2	34.3	55.4	60.8	51.9	49.1	54.3	64.9	66.5	51.3	47.8
1111011700	33.8	26.4	25.8	35.2	56.6	61.9	52.8	50.6	56.2	66.2	67.5	52.2	48.8
1111011800	29.4	21.8	20.9	25.8	42.1	49.8	44.2	40.8	43.4	55.1	55.6	44.1	39.3
1111011900	34.2	27.0	26.6	35.7	58.8	64.5	52.7	49.7	54.9	68.6	71.3	53.7	50.1



UAH	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
1111012000	32.1	25.1	25.6	36.5	59.8	63.1	49.7	47.7	54.1	68.0	71.3	52.5	49.1
1111012100	33.2	25.9	25.6	35.1	56.4	60.8	49.7	46.8	53.1	65.7	68.4	52.4	47.8
1111012200	33.2	26.0	25.5	35.2	56.6	61.1	50.6	47.7	53.5	66.0	67.7	51.7	48.0
1111012300	32.6	25.1	24.7	33.0	53.6	59.0	49.6	46.5	51.7	63.9	65.2	50.4	46.3
1111012400	30.9	23.2	22.7	28.9	47.5	54.2	46.7	43.7	47.9	59.4	60.4	47.2	42.6
1111012500	32.5	25.0	24.5	33.3	54.0	59.5	50.3	47.3	52.6	63.5	65.4	50.3	46.5
1111012600	32.2	24.6	24.1	31.7	51.6	57.7	49.1	46.5	51.4	61.9	63.8	49.6	45.4

Fuente: Elaboración propia

1.5.2.2 Condición Hidrológica – año seco

Para condiciones de año seco se observa que las UAH – 2 a nivel anual el máximo valor que se registra corresponde a 9.77 m³/s (río La Herradura), a nivel mensual los meses que presentan un mayor valor en todas las UAH corresponden a mayo, junio, octubre y noviembre.

Tabla 19 Oferta Hídrica Mensual y Anual [m³/s] – Año seco - UHN - 2

UAH	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
1111010100	0.88	0.64	0.55	0.57	0.92	1.02	0.79	0.64	0.56	0.72	1.55	1.16	0.83
1111010200	1.05	0.78	0.66	0.70	1.01	1.10	0.87	0.70	0.63	0.83	1.88	1.43	0.97
1111010300	0.83	0.68	0.57	0.57	0.57	0.54	0.46	0.37	0.37	0.53	1.34	1.14	0.66
1111010400	1.23	0.91	0.75	0.77	1.78	1.69	1.37	1.09	0.97	1.45	2.81	2.01	1.40
1111010500	1.69	1.31	0.99	1.06	2.77	2.68	2.69	1.84	1.77	2.91	3.56	3.07	2.20
1111010600	1.64	1.20	0.98	1.15	3.65	2.98	2.62	1.57	2.18	2.09	1.84	1.85	1.98
1111010700	7.48	5.33	4.15	5.52	12.28	12.14	10.86	6.57	8.93	12.76	18.97	12.29	9.77
1111010800	2.25	1.78	1.42	1.59	2.53	3.58	3.66	2.48	3.27	4.02	3.65	3.02	2.77
1111010900	1.59	1.25	0.96	1.03	2.20	3.12	2.52	1.79	1.99	2.71	3.48	2.69	2.11
1111011000	0.93	0.72	0.53	0.56	1.08	1.62	1.15	1.01	0.89	1.06	1.99	1.39	1.08
1111011100	1.18	0.86	0.78	0.89	1.41	1.58	1.21	1.06	0.92	1.01	1.72	1.36	1.16
1111011200	3.16	2.33	2.07	2.57	3.57	4.05	3.15	2.74	2.36	2.60	4.43	3.58	3.05
1111011300	3.90	2.94	2.55	2.99	4.99	5.81	4.43	3.94	3.42	3.78	6.28	4.81	4.15
1111011400	0.94	0.69	0.54	0.60	1.28	1.45	1.07	0.93	0.81	0.96	1.78	1.27	1.03
1111011500	1.47	1.09	0.87	0.95	2.03	2.29	1.68	1.44	1.26	1.52	2.87	2.02	1.62
1111011600	0.83	0.61	0.50	0.53	1.07	1.21	0.89	0.75	0.65	0.80	1.57	1.13	0.88
1111011700	1.23	0.93	0.77	0.84	1.64	1.86	1.36	1.15	1.00	1.19	2.29	1.66	1.33
1111011800	0.26	0.20	0.17	0.19	0.22	0.23	0.19	0.15	0.14	0.20	0.47	0.38	0.23
1111011900	0.66	0.51	0.40	0.40	1.04	0.95	0.89	0.69	0.59	0.96	1.59	1.14	0.82
1111012000	1.12	0.88	0.66	0.69	1.84	1.89	1.74	1.25	1.16	1.87	2.90	2.09	1.51
1111012100	1.39	1.07	0.82	0.83	1.76	2.32	1.74	1.45	1.24	1.63	3.39	2.29	1.66
1111012200	0.56	0.42	0.33	0.34	0.73	0.90	0.66	0.55	0.48	0.61	1.24	0.85	0.64
1111012300	0.41	0.30	0.25	0.25	0.53	0.57	0.43	0.35	0.31	0.42	0.89	0.62	0.44
1111012400	0.70	0.51	0.43	0.44	0.72	0.79	0.62	0.49	0.44	0.59	1.34	0.98	0.67
1111012500	1.37	0.99	0.82	0.84	1.73	1.93	1.44	1.20	1.05	1.30	2.64	1.89	1.43
1111012600	0.54	0.39	0.34	0.34	0.64	0.72	0.54	0.44	0.38	0.46	0.94	0.70	0.54



Fuente: Elaboración propia

Tabla 20 Rendimiento Hídrico Mensual y Anual [L/s Km²] – Año seco - UHN – 2

UAH	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
1111010100	16.64	11.97	10.30	10.80	17.39	19.22	14.81	11.97	10.54	13.51	29.09	21.79	15.67
1111010200	15.35	11.41	9.65	10.26	14.82	16.04	12.72	10.20	9.17	12.18	27.42	20.88	14.17
1111010300	9.89	8.11	6.81	6.87	6.87	6.49	5.57	4.44	4.38	6.32	16.05	13.70	7.96
1111010400	19.34	14.30	11.83	12.07	28.03	26.64	21.64	17.19	15.33	22.91	44.25	31.77	22.11
1111010500	20.31	15.73	11.90	12.77	33.25	32.17	32.31	22.11	21.26	34.89	42.74	36.85	26.36
1111010600	18.69	13.64	11.14	13.05	41.53	33.82	29.80	17.81	24.83	23.72	20.94	20.98	22.50
1111010700	22.27	15.88	12.36	16.45	36.56	36.13	32.33	19.56	26.58	37.98	56.47	36.60	29.10
1111010800	16.52	13.08	10.43	11.70	18.59	26.31	26.88	18.23	24.06	29.52	26.86	22.18	20.36
1111010900	16.74	13.22	10.15	10.91	23.26	32.89	26.62	18.90	21.00	28.56	36.69	28.44	22.28
1111011000	18.86	14.70	10.75	11.37	22.06	32.93	23.47	20.63	18.07	21.60	40.50	28.24	21.93
1111011100	17.15	12.56	11.31	12.90	20.43	22.92	17.52	15.44	13.40	14.71	24.94	19.73	16.92
1111011200	16.16	11.90	10.61	13.14	18.29	20.71	16.13	14.01	12.08	13.33	22.68	18.30	15.61
1111011300	17.83	13.45	11.66	13.70	22.84	26.59	20.27	18.04	15.64	17.30	28.72	22.02	19.00
1111011400	19.47	14.30	11.30	12.45	26.66	30.19	22.21	19.22	16.72	19.97	37.00	26.27	21.31
1111011500	19.29	14.38	11.39	12.49	26.62	30.03	22.05	18.95	16.54	19.99	37.65	26.52	21.33
1111011600	18.35	13.60	11.16	11.80	23.80	26.81	19.79	16.65	14.48	17.71	34.93	25.04	19.51
1111011700	18.43	13.90	11.48	12.52	24.55	27.85	20.37	17.23	14.87	17.79	34.27	24.72	19.83
1111011800	13.34	10.62	8.82	10.05	11.64	11.96	9.91	7.81	7.26	10.51	24.38	20.01	12.19
1111011900	19.03	14.73	11.52	11.60	29.74	27.08	25.51	19.86	16.97	27.58	45.67	32.66	23.50
1111012000	16.58	13.02	9.80	10.25	27.13	28.01	25.66	18.53	17.16	27.70	42.92	30.85	22.30
1111012100	18.16	14.06	10.73	10.87	23.02	30.36	22.78	18.99	16.30	21.37	44.42	29.98	21.75
1111012200	18.59	13.92	10.88	11.27	24.09	29.77	21.72	18.25	15.78	20.18	40.87	28.19	21.13
1111012300	18.23	13.35	11.01	11.07	23.45	25.53	19.17	15.74	13.88	18.58	39.70	27.35	19.75
1111012400	16.44	11.88	10.18	10.27	17.00	18.49	14.44	11.61	10.35	13.94	31.44	23.10	15.76
1111012500	18.15	13.16	10.84	11.13	22.93	25.61	19.05	15.91	13.85	17.27	34.91	25.05	18.99
1111012600	17.26	12.57	10.83	11.04	20.58	23.31	17.32	14.26	12.24	14.83	30.12	22.43	17.23

Fuente: Elaboración propia

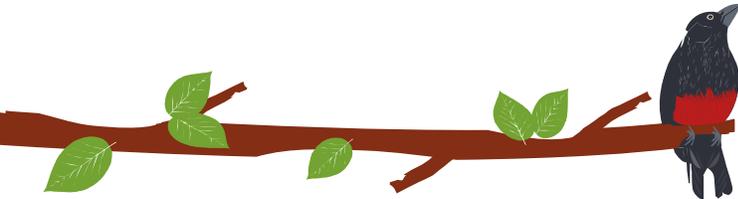
Los resultados indican una reducción en la oferta ambiental promedio del 59% en la escala mensual y del 60% en la escala anual, siendo las UAH río Choromando, Directos río Sucio, Qda. La Beiba y el Pital los más afectados con reducciones de hasta el 75% en su oferta.

1.5.3 UAH-3 Cuencas Nivel 03 Microcuencas Abastecedoras

1.5.3.1 Condición Hidrológica – año normal

Para condiciones normales se observa que las UAH – 3 a escala anual presentan una oferta hídrica disponible promedio de 0.244 m³/seg oscilando entre 0.02 y 1.72 m³/s, a nivel mensual los meses que presentan una mayor oferta en todas las UAH corresponden a mayo, junio, octubre y noviembre.

Tabla 21 Oferta Hídrica Mensual y Anual [m³/s] – Año normal - UHN – 3



UAH	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
1111010201	0.02	0.01	0.01	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02
1111010401	0.05	0.04	0.04	0.05	0.08	0.09	0.07	0.07	0.08	0.10	0.10	0.08	0.07
1111010601	0.05	0.04	0.05	0.07	0.10	0.10	0.08	0.07	0.09	0.11	0.11	0.08	0.08
1111010602	0.11	0.10	0.10	0.15	0.24	0.23	0.18	0.17	0.20	0.25	0.26	0.19	0.18
1111010701	0.03	0.03	0.03	0.04	0.06	0.06	0.04	0.04	0.05	0.06	0.07	0.05	0.05
1111010702	0.04	0.03	0.03	0.04	0.06	0.06	0.04	0.04	0.05	0.06	0.07	0.05	0.05
1111010801	0.11	0.09	0.10	0.14	0.21	0.20	0.15	0.14	0.17	0.22	0.24	0.19	0.16
1111010802	0.17	0.14	0.15	0.21	0.32	0.31	0.23	0.22	0.27	0.34	0.37	0.29	0.25
1111010901	0.02	0.01	0.01	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03	0.04	0.03	0.02
1111011601	1.18	0.93	0.91	1.25	2.01	2.19	1.85	1.77	1.96	2.33	2.38	1.83	1.72
1111012301	0.06	0.05	0.05	0.06	0.10	0.11	0.09	0.09	0.09	0.11	0.12	0.09	0.08

Fuente: Elaboración propia

Tabla 22 Rendimiento Hídrico Mensual y Anual [L/s Km²] – Año normal - UHN – 3

UAH	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
1111010201	32.6	25.0	25.4	32.2	52.2	58.2	49.9	46.7	51.5	63.3	64.1	49.9	45.9
1111010401	35.2	28.4	27.8	37.6	59.6	63.8	53.0	49.8	55.3	68.4	70.5	54.2	50.2
1111010601	37.7	32.1	34.3	50.6	75.8	73.1	56.1	54.6	62.8	78.7	84.1	62.4	58.4
1111010602	36.6	31.1	32.1	48.1	76.6	75.0	57.8	56.2	64.2	80.5	85.7	61.1	58.7
1111010701	37.9	32.6	35.9	50.9	73.7	66.5	49.5	48.1	56.1	72.1	79.2	62.3	55.5
1111010702	41.0	33.0	36.4	51.6	74.5	66.7	49.7	48.3	56.4	72.6	79.9	62.9	56.0
1111010801	37.6	30.1	32.5	46.7	69.9	65.9	49.9	47.8	57.4	73.8	82.3	63.2	54.8
1111010802	36.3	29.1	31.3	45.0	67.5	64.9	49.2	47.4	56.2	71.9	79.0	60.8	53.3
1111010901	33.0	26.2	27.0	39.5	61.5	62.1	49.1	47.6	55.2	68.4	71.5	53.7	49.6
1111011601	33.9	26.5	26.1	35.8	57.4	62.5	53.0	50.7	56.1	66.6	68.0	52.2	49.2
1111012301	33.2	25.7	25.4	34.3	55.1	60.2	50.8	47.9	52.9	64.4	66.4	51.1	47.3

Fuente: Elaboración propia

1.5.3.2 Condición Hidrológica – año seco

Para condiciones de año seco se observa que las UAH – 3 a escala anual presentan una oferta hídrica disponible promedio de 0.102 m³/seg oscilando entre 0.009 y 0.72 m³/s, a nivel mensual los meses que presentan un mayor valor en todas las UAH corresponden a mayo, junio, octubre y noviembre.

Tabla 23 Oferta Hídrica Mensual y Anual [m³/s] – Año seco - UHN – 3

UAH	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
1111010201	0.009	0.007	0.006	0.006	0.010	0.012	0.009	0.007	0.006	0.008	0.017	0.012	0.009
1111010401	0.028	0.021	0.017	0.018	0.043	0.041	0.033	0.026	0.024	0.035	0.066	0.046	0.033
1111010601	0.029	0.021	0.016	0.021	0.055	0.050	0.045	0.028	0.036	0.059	0.067	0.052	0.040
1111010602	0.060	0.045	0.035	0.042	0.129	0.107	0.096	0.058	0.078	0.094	0.095	0.095	0.078
1111010701	0.019	0.013	0.011	0.017	0.032	0.030	0.023	0.014	0.018	0.030	0.042	0.026	0.023
1111010702	0.020	0.013	0.012	0.019	0.033	0.031	0.024	0.014	0.019	0.032	0.044	0.027	0.024
1111010801	0.052	0.038	0.029	0.030	0.038	0.047	0.047	0.053	0.052	0.055	0.056	0.052	0.046

1111010802	0.083	0.063	0.051	0.061	0.093	0.128	0.128	0.089	0.118	0.141	0.131	0.110	0.100
1111010901	0.009	0.007	0.005	0.005	0.012	0.017	0.013	0.010	0.010	0.013	0.021	0.015	0.011
1111011601	0.661	0.495	0.400	0.434	0.892	1.002	0.736	0.626	0.547	0.668	1.290	0.911	0.722
1111012301	0.033	0.024	0.020	0.021	0.044	0.047	0.035	0.029	0.026	0.035	0.073	0.050	0.036

Fuente: Elaboración propia

Tabla 24 Rendimiento Hídrico Mensual y Anual [L/s Km²] – Año seco - UHN - 3

UAH	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
1111010201	17.97	12.91	11.21	11.45	20.67	22.89	17.32	14.23	12.58	16.10	33.69	24.25	17.94
1111010401	20.05	15.00	12.14	12.77	30.39	29.05	23.25	18.72	16.82	24.87	46.92	33.08	23.59
1111010601	21.27	15.20	12.01	15.34	40.13	36.51	32.97	20.57	26.24	43.22	49.24	37.94	29.22
1111010602	19.43	14.48	11.36	13.67	41.89	34.67	30.99	18.76	25.27	30.59	30.66	30.85	25.22
1111010701	23.10	15.37	13.77	20.83	38.11	36.22	27.53	16.72	21.99	35.98	50.94	31.50	27.67
1111010702	23.34	15.47	14.08	21.64	38.65	36.13	27.52	16.57	22.07	36.66	51.10	31.75	27.91
1111010801	17.34	12.91	9.73	10.07	12.64	15.75	15.92	17.91	17.45	18.53	18.86	17.52	15.39
1111010802	17.48	13.33	10.82	12.93	19.73	27.12	27.17	18.73	24.92	29.75	27.63	23.29	21.08
1111010901	17.22	13.08	9.98	10.99	23.66	34.04	25.61	19.85	20.21	26.57	41.90	29.37	22.71
1111011601	18.92	14.14	11.43	12.41	25.52	28.66	21.06	17.91	15.64	19.11	36.90	26.07	20.65
1111012301	18.75	13.80	11.25	11.57	24.57	26.67	20.01	16.59	14.74	19.67	41.19	28.05	20.57

Fuente: Elaboración propia

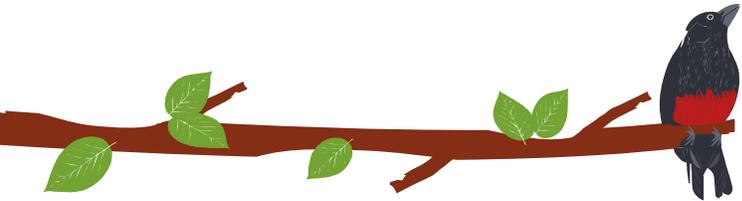
Las diferencias en la oferta año normal y año seco exhiben el mismo comportamiento presentado en las UAH Nivel 1 y 2. En este caso todas las UAH Nivel 3 presentan una reducción en la oferta superior al 50% (a excepción de la UAH Qda. Palmichal) lo cual pone en riesgo el abastecimiento del recurso hídrico en los periodos de sequía.

1.5.4 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL RENDIMIENTO HÍDRICO

A continuación, se presenta la distribución espacial a escala mensual y anual del rendimiento hídrico las UAH de la Cuenca Río Sucio Alto.

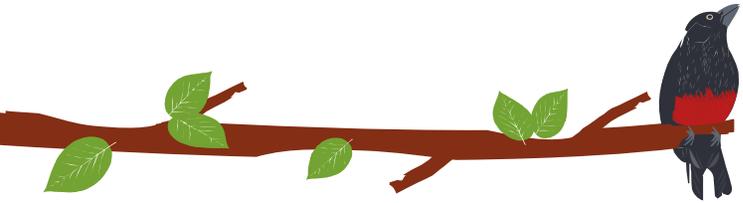
En la Figura 29 se presenta el rendimiento hídrico (l/s/km²) para la condición normal a nivel mensual y anual, se observan valores anuales en un rango de 19.14 a 82.74 (l/s/km²), los sectores que presentan mayor rendimiento corresponden a las partes altas de la cuenca en el sector sur-este de la cuenca río Sucio Alto. A nivel mensual se observa un cambio en el comportamiento espacial, en el primer trimestre del año el sector noreste de la cuenca presenta un mayor rendimiento y a medida que avanza hacia la mitad del año va cambiando este comportamiento hacia el sector sur este de la cuenca, entre los meses de julio y agosto se observa una disminución del rendimiento en el centro de la cuenca lo cual se mantiene hasta el segundo pico de precipitaciones altas en los meses de septiembre y octubre.

En la figura Figura 30 se presenta el rendimiento hídrico (l/s/km²) para la condición de año seco, se observa a nivel anual valores que oscilan en un rango de 4.38 a 56.47 (l/s/km²), el comportamiento espacial se asemeja a la condición de año normal, los sectores con mayor rendimiento se ubican en el sector sur este de la cuenca en la parte alta, con excepción de un sector en el cual baja el rendimiento, en la parte centro y baja de la cuenca se presenta el menor rendimiento hídrico, a nivel mensual se observa gran variabilidad en el sector centro de la cuenca, los sectores que se mantiene en todo el año corresponden a las partes altas con valores altos y el sector de la noroccidental.

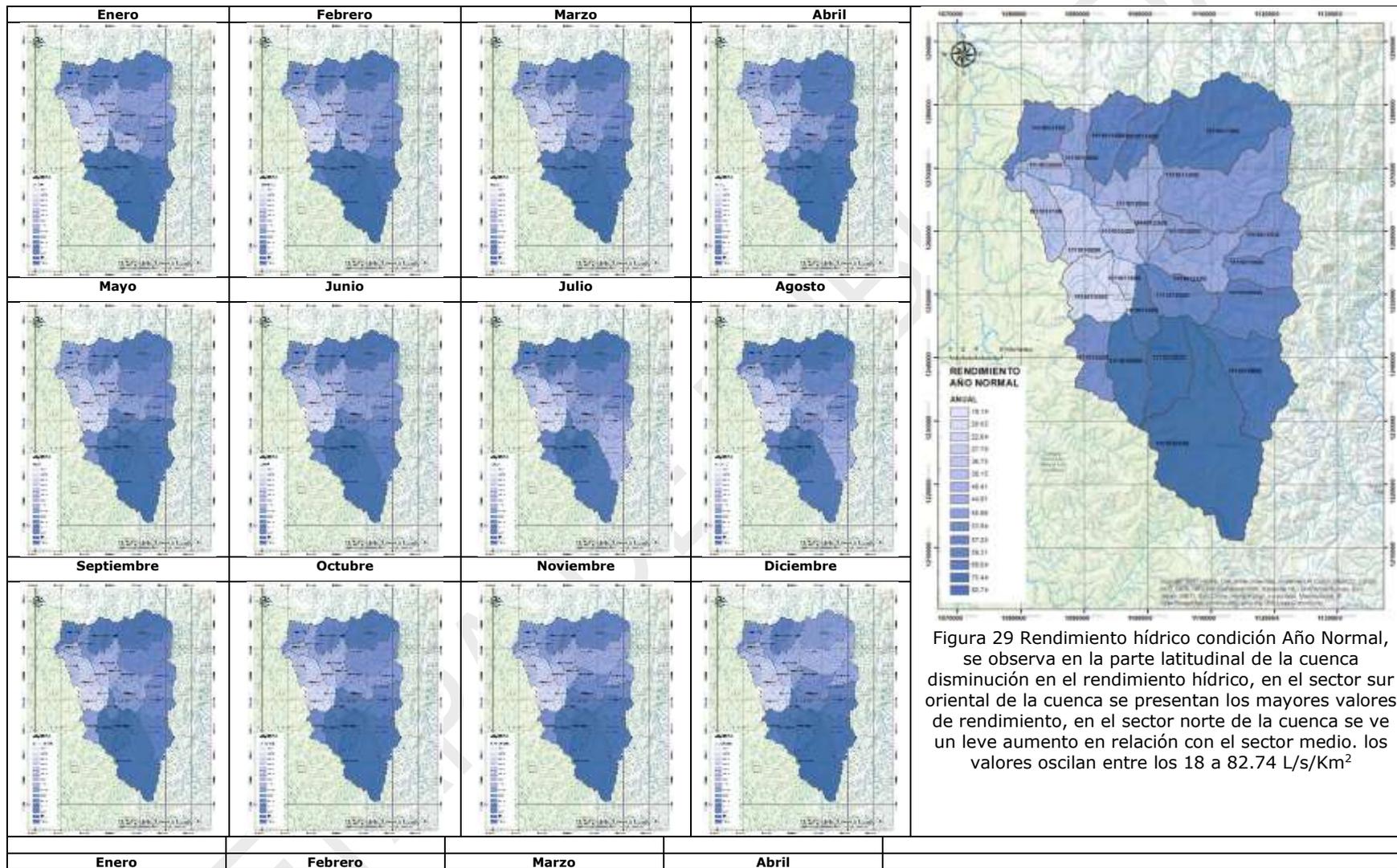


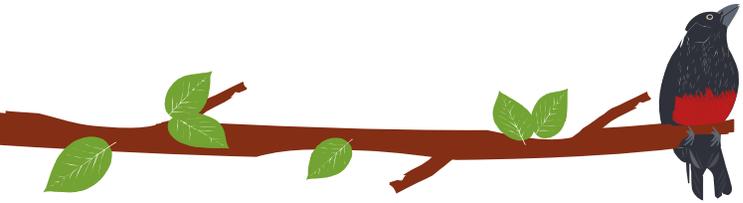
EN ETAPA DE PUBLICIDAD





PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA RÍO SUCIO ALTO
FASE DE DIAGNÓSTICO





PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA RÍO SUCIO ALTO
FASE DE DIAGNÓSTICO

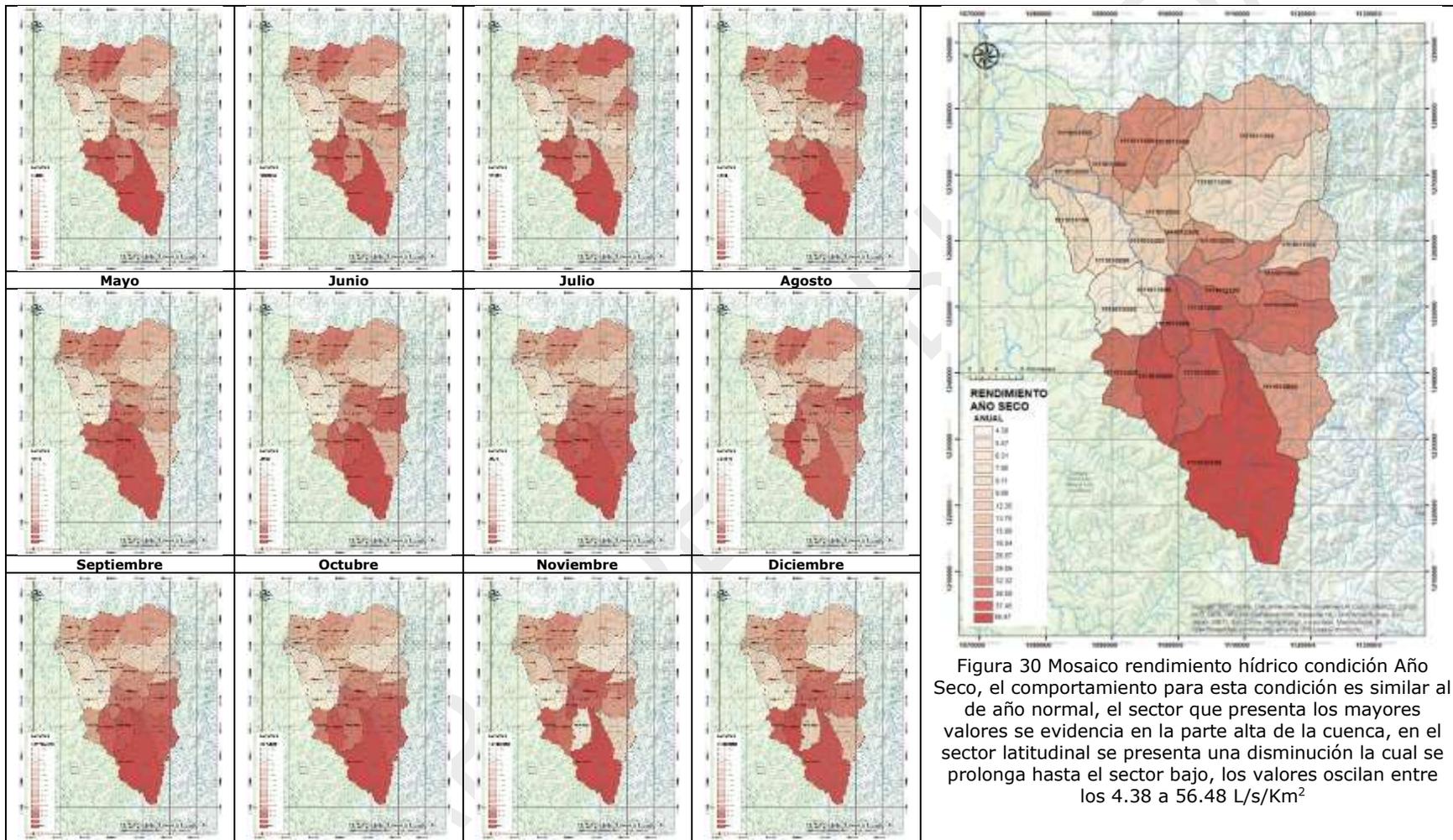


Figura 30 Mosaico rendimiento hídrico condición Año Seco, el comportamiento para esta condición es similar al de año normal, el sector que presenta los mayores valores se evidencia en la parte alta de la cuenca, en el sector latitudinal se presenta una disminución la cual se prolonga hasta el sector bajo, los valores oscilan entre los 4.38 a 56.48 L/s/Km²

1.6 CAUDALES MÁXIMOS PARA DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO Y EVENTOS EXTREMOS

El presente capítulo comprende la estimación de caudales máximos para diferentes periodos de retorno (2.33, 5, 25, 50 y 100 años), con el fin de establecer el comportamiento de los eventos extremos. Este se realiza mediante la extracción de los valores propios de los percentiles equivalentes a cada periodo de retorno. Para obtener los percentiles correspondientes se busca el inverso del tiempo de retorno de esta forma:

$$\text{Percentil} = \frac{1}{\text{Tiempo de retorno}}$$

Una vez obtenidos los percentiles, se procede a obtener los valores de cada una de las estaciones utilizando la función de distribución de cada una de las series.

De tal manera, a partir de las distribuciones teóricas de cada conjunto estadístico se procede a obtener los valores respectivos a dichos periodos de retorno. A continuación, se presentan los caudales para cada periodo de retorno en m³/s mencionados anteriormente. En la Tabla 25 se presentan los periodos de retorno para UAH nivel 1, los resultados para las UAH-2 y UAH -3 se presenta en los **anexos Caudales Periodos de retorno para caudales máximos y caudales mínimos.**

Tabla 25 Caudales máximos para distintos periodos de retorno en la UAH-1

Tr (Años)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
2.33	101.6	72.7	78.6	127.2	173.9	191.0	152.7	143.8	167.1	203.7	204.0	165.4	239.0
5	125.6	95.4	106.2	155.5	212.5	225.0	187.3	179.0	203.2	239.4	233.8	202.7	271.8
25	169.6	149.5	165.1	194.4	278.1	271.3	250.9	233.1	252.3	282.1	275.7	271.4	319.1
50	187.8	177.7	192.9	207.3	303.3	286.6	277.3	252.7	268.5	293.8	289.1	299.9	335.5
100	205.7	209.8	222.7	219.0	327.3	300.4	303.4	271.0	283.1	302.9	300.6	328.1	350.5

Fuente: Elaboración propia

1.7 REGIMEN DE SEDIMENTOS

Teniendo en cuenta las estaciones seleccionadas anteriormente, ubicadas en el área de influencia de la UAH nivel 1 cuenca río Sucio Alto (Figura 5). Se presenta a continuación el comportamiento temporal de los sedimentos para la estación 11117010 EL ANIL.

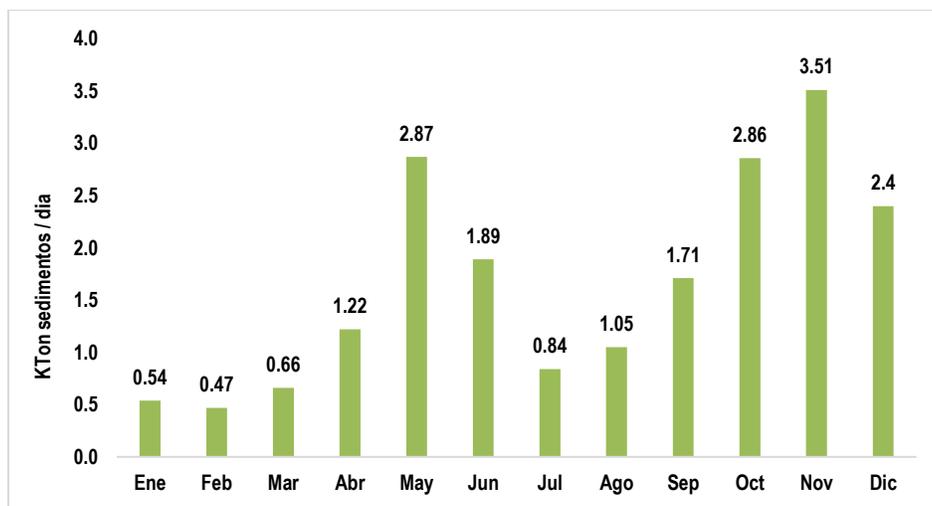
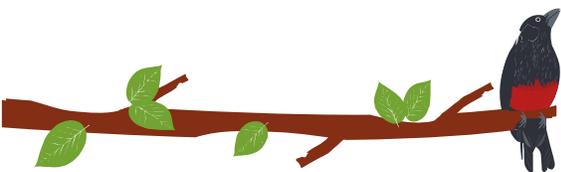


Figura 31 Carga media mensual de sedimentos estación Limnimétrica 11117010 EL ANIL. Elaboración propia

La Figura 31 presenta el comportamiento promedio de carga de sedimentos en la estación 11117010, se evidencian dos épocas de alta carga de sedimentos, el primero en el mes de mayo con 2.87 KTon/día y el segundo en el mes de noviembre alcanzando las 3.5 kTon/día siendo consistente con el régimen de caudales presentado.

1.8 CAUDALES AMBIENTALES

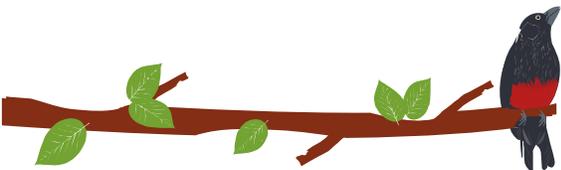
El caudal ambiental se define como el volumen de agua necesario, desde aspectos de calidad, cantidad, duración y estacionalidad, para el sostenimiento de ecosistemas acuáticos y los sistemas productivos que dependen de estos (IDEAM & MinAmbiente, 2015). A partir de las curvas de duración de los caudales medios diarios se pueden identificar dos grupos para la definición del caudal ambiental. El primer grupo corresponde a las cuencas con poca variabilidad en los caudales diarios y alta autorregulación, en donde se considera como representativo el caudal igualado o superado el 85% (Q_{85}). Este valor se aplica a aquellas estaciones cuyo IRH es superior o igual a 0,70, lo cual representa un nivel alto de retención y regulación hídrica. El segundo grupo corresponde a las cuencas con menor autorregulación, en donde el valor representativo es Q_{75} y se aplica a estaciones con un IRH inferior a 0,70 (IDEAM, 2010; IDEAM & MinAmbiente, 2015).

El caudal ambiental para año seco se obtuvo de una proporción entre el caudal ambiental del año normal y el caudal medio estimado (IDEAM, 2014), en la Tabla 26 se presenta el porcentaje de caudal ambiental en condiciones normales con el cual se determinó el caudal ambiental para las condiciones secas en función de la oferta disponible para esa misma condición en las diferentes UAH nivel 1, nivel 2 y nivel 3.

Tabla 26 Porcentaje de caudal Ambiental para condición Seca

Nivel 1		Nivel 2		Nivel 3	
UAH	Caudal Ambiental (%)	UAH	Caudal Ambiental (%)	UAH	Caudal Ambiental (%)
1111010000	52%	1111010100	49%		





PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA RÍO SUCIO ALTO
FASE DE DIAGNÓSTICO

		1111010200	48%	1111010201	50%
		1111010300	42%		
		1111010400	51%	1111010401	51%
		1111010500	51%		
		1111010600	44%	1111010601	50%
				1111010602	47%
		1111010700	51%	1111010701	52%
				1111010702	52%
		1111010800	49%	1111010801	46%
				1111010802	49%
		1111010900	50%	1111010901	50%
		1111011000	52%		
		1111011100	49%		
		1111011200	47%		
		1111011300	49%		
		1111011400	51%		
		1111011500	51%		
		1111011600	50%	1111011601	50%
		1111011700	50%		
		1111011800	46%		
		1111011900	49%		
		1111012000	48%		
		1111012100	51%		
		1111012200	51%		
		1111012300	50%	1111012301	51%
		1111012400	49%		
		1111012500	50%		
		1111012600	49%		

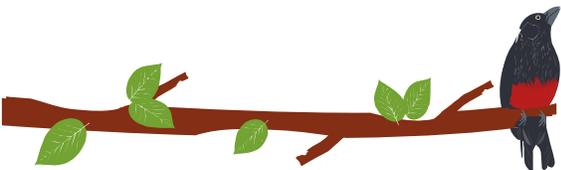
Fuente: Elaboración propia

A continuación, se presenta el caudal ambiental para las dos condiciones (año normal y año seco).

Tabla 27 Caudal ambiental Año normal UAH nivel 1, nivel 2 y nivel 3

Nivel 1		Nivel 2		Nivel 3	
UAH	Caudal Ambiental	UAH	Caudal Ambiental	UAH	Caudal Ambiental
	(m ³ /s)		(m ³ /s)		(m ³ /s)
1111010000	56.4416	1111010100	1.128		
		1111010200	1.366	1111010201	0.011
		1111010300	1.262		





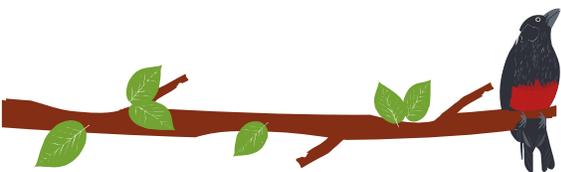
PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA RÍO SUCIO ALTO
FASE DE DIAGNÓSTICO

Nivel 1		Nivel 2		Nivel 3	
UAH	Caudal Ambiental	UAH	Caudal Ambiental	UAH	Caudal Ambiental
	(m ³ /s)		(m ³ /s)		(m ³ /s)
		1111010400	1.560	1111010401	0.036
		1111010500	2.300		
		1111010600	2.318	1111010601	0.040
				1111010602	0.085
		1111010700	9.844	1111010701	0.024
				1111010702	0.025
		1111010800	3.423	1111010801	0.075
				1111010802	0.124
		1111010900	2.354	1111010901	0.012
		1111011000	1.237		
		1111011100	1.617		
		1111011200	4.432		
		1111011300	5.482		
		1111011400	1.225		
		1111011500	1.926		
		1111011600	1.074	1111011601	0.866
		1111011700	1.627		
		1111011800	0.346		
		1111011900	0.858		
		1111012000	1.588		
		1111012100	1.849		
		1111012200	0.734		
		1111012300	0.524	1111012301	0.043
		1111012400	0.884		
		1111012500	1.764		
		1111012600	0.691		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 28 Caudal ambiental Año Seco UAH nivel 1, nivel 2 y nivel 3

Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
---------	---------	---------

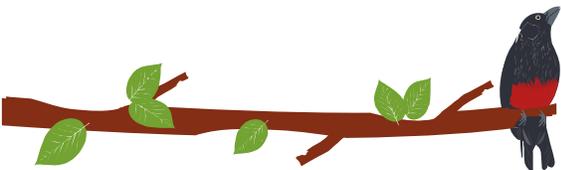


UAH	Caudal Ambiental	UAH	Caudal Ambiental	UAH	Caudal Ambiental
	(m ³ /s)		(m ³ /s)		(m ³ /s)
1111010000	26.34	1111010100	0.405		
		1111010200	0.465	1111010201	0.004
		1111010300	0.279		
		1111010400	0.710	1111010401	0.017
		1111010500	1.110		
		1111010600	0.878	1111010601	0.020
				1111010602	0.037
		1111010700	9.774	1111010701	0.012
				1111010702	0.012
		1111010800	2.770	1111010801	0.021
				1111010802	0.049
		1111010900	2.111	1111010901	0.006
		1111011000	1.077		
		1111011100	1.165		
		1111011200	3.050		
		1111011300	4.155		
		1111011400	1.026		
		1111011500	1.623		
		1111011600	0.878	1111011601	0.364
		1111011700	1.328		
		1111011800	0.234		
		1111011900	0.820		
		1111012000	1.508		
		1111012100	1.661		
		1111012200	0.639		
		1111012300	0.445	1111012301	0.018
1111012400	0.671				
1111012500	1.434				
1111012600	0.535				

Fuente: Elaboración propia

1.9 ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA HÍDRICA

En este capítulo se presenta la estimación de la demanda para los diferentes sectores, se presentan los casos que aplican para las unidades de análisis hidrológico que componen la cuenca del río Sucio Alto relacionados con consumo humano, uso agrícola, pecuario e industrial.



En la determinación de la demanda se integran las actividades que hacen uso del recurso hídrico, con el fin de conocer cómo y en qué medida se está utilizando el recurso; dejando en evidencia su distribución en el tiempo para planificar su uso sostenible.

La determinación de la demanda hídrica de la cuenca del río Sucio Alto es importante debido a que su cuantificación es un insumo indispensable como herramienta de diagnóstico, ya que permite entrever el estado de la cuenca y su nivel de conservación; contribuyendo como elemento importante en la planificación y manejo integral del recurso hídrico.

La demanda hídrica corresponde a la cantidad o volumen de agua usado por los sectores económicos y la población. Considera el volumen de agua extraído o almacenado de los sistemas hídricos y que limita otros usos; contempla el volumen utilizado como materia prima, como insumo y el retornado a los sistemas hídricos.

Para la estimación de la demanda hídrica de la cuenca del Río Sucio Alto, fueron seleccionados los siguientes sectores: consumo humano o doméstico, actividades agrícolas y actividades pecuarias.

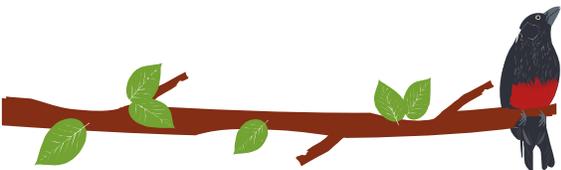
El consumo documentado en la cuenca de río Sucio Alto en relación con actividades de uso industrial se refieren exclusivamente al aprovechamiento para la generación de hidroenergía mediante pequeñas centrales (PCH), las cuales fueron descritas en el capítulo de infraestructura hidráulica. Para efectos de la estimación de la demanda, si bien es un uso que se le da al recurso, las PCH no hacen una extracción de los volúmenes de agua al sistema en periodos y/o transectos significativos que impliquen la disminución o alteración de la oferta hídrica aguas abajo del punto donde se da la generación de energía. En total, las 3 pequeñas centrales (La vuelta, La Herradura y la Gema) hacen uso de 27 m³/seg, que rápidamente son reintegrados a las corrientes principales.

En la **iError! No se encuentra el origen de la referencia.** se resumen las expresiones utilizadas para el cálculo de las distintas demandas de uso del recurso hídrico. Así mismo se presenta la ecuación para la Demanda de Uso Total de la cuenca del Río Sucio Alto.

Tabla 29 Expresiones matemáticas usadas en la determinación de la demanda hídrica

TIPO	EXPRESIÓN	EXPLICACIÓN
DUD	$DUD = \sum(D_m * Hab_{cm}) * 365$ $H_s = \sum Hab_{cm}$ $Hab_{cm} = \sum(P_m * Hab_m)$	DUD → Demanda de uso doméstico. (m ³ /año) D _m → Demanda bruta del recurso por municipio. ($\frac{m^3}{hab}$ /dia) H _s → Número de habitantes por sector de la cuenca. Hab _{cm} → Número total de habitantes con cobertura de acueducto por municipio. P _m → Porcentaje de cobertura de acueducto por municipio. Hab _m → Número de habitantes por municipio (2016).
DUP	$DUP = \sum(N_e * M_e * 365)$	DUP → Demanda de uso pecuario. (m ³ /año) N _e → Número de animales por especie. M _e → Módulo de consumo por especie. m ³ /Cabeza/dia
DUA	$DUA = (K_c * ET_p) * A * 10$	DUA → Requerimiento de agua de cultivo (m ³ /año) K _c → Coeficiente del Cultivo (adimensional) ET _p → Evapotranspiración de referencia potencial (mm/año)





TIPO	EXPRESIÓN	EXPLICACIÓN
		A → Área sembrada (Ha)
DUT	$DUT = DUD + DUP + DUA + DUI$	DUT → Demanda de uso total. DUP → Demanda de uso pecuario. DUA → Demanda de uso agrícola. DUD → Demanda de uso doméstico. DUI → Demanda de uso industrial.

Fuente: Elaboración propia

1.9.1 DEMANDA DE USO PARA CONSUMO HUMANO Y DOMÉSTICO (DUD)

Se entiende por uso para consumo humano y doméstico aquel destinado para actividades como: bebida directa y preparación de alimentos para consumo inmediato; satisfacción de necesidades domésticas, individuales o colectivas, tales como higiene personal y limpieza de elementos, materiales o utensilios; preparación de alimentos en general y en especial los destinados a su comercialización o distribución, que no requieran elaboración².

En la siguiente figura se observa la evolución de la población, se evidencia que las proyecciones indican una disminución en la población rural y se mantiene la población urbana en los últimos años.

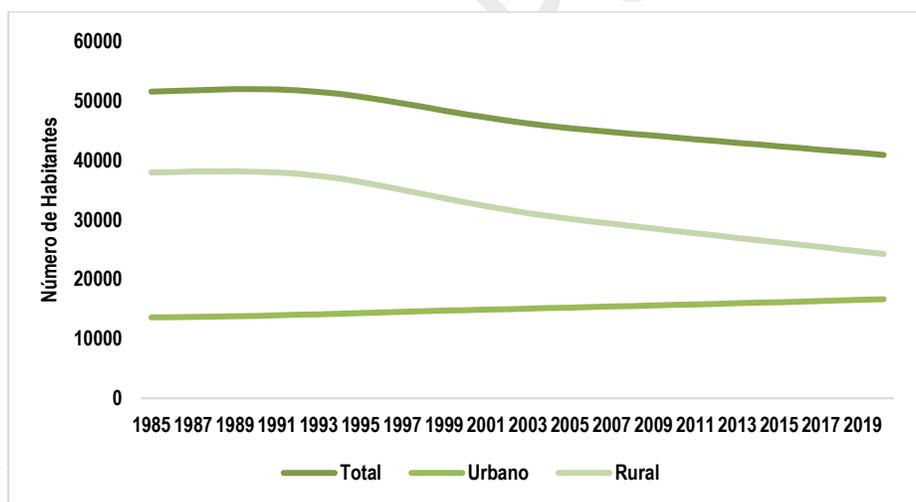
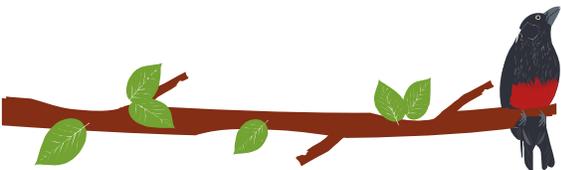


Figura 32. Evolución de la población en la cuenca de RSA en el periodo 1985 – 2020 (proyección).
Elaboración propia

Para el cálculo de la demanda en este componente fue necesario, en primera instancia, realizar una estimación de la población para el año 2018 con la información disponible de censos anteriores.

Tabla 30 Porcentajes de cobertura y población total con cobertura de acueducto

² Decreto 3930 de 2010.



PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA RÍO SUCIO ALTO
FASE DE DIAGNÓSTICO

MUNICIPIO	HABITANTES 2018
Abriaquí	1,971
Cañas Gordas	16,737
Dabeiba	23,068
Frontino	15,703
Uramita	8,212

Fuente: Elaboración propia

El cálculo de la demanda de este sector está basado en la dotación de agua para consumo humano establecida en la Reglamentación Técnica del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS), la cual clasifica los municipios de acuerdo con el nivel de complejidad del sistema.

Tabla 31 Niveles de complejidad en sistemas de acueducto

NIVEL DE COMPLEJIDAD DEL SISTEMA	POBLACIÓN EN LA ZONA URBANA (HABITANTES)
Bajo	< 2,500
Medio	2,501 a 12,500
Medio Alto	12,501 a 60,000
Alto	> 60,000

Fuente: Elaboración propia

La dotación bruta se obtuvo de información secundaria del diagnóstico técnico de los municipios y el estado de los acueductos para el departamento de Antioquia.

Tabla 32 Dotación Bruta por municipio

MUNICIPIO	DOTACIÓN BRUTA (m ³ /hab/día)
Abriaquí	0.14
Cañas Gordas	0.18
Dabeiba	0.20
Frontino	0.18
Uramita	0.18

Fuente: Elaboración propia

Esta demanda de uso doméstico es calculada a partir de la dotación bruta por municipio y el número de habitantes con cobertura de acueducto por municipio.

Tabla 33 Demanda de uso doméstico por Municipio

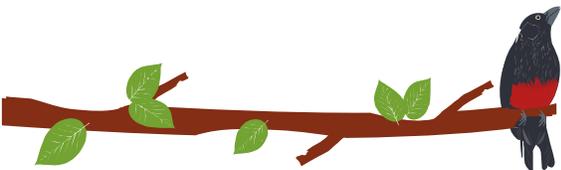
MUNICIPIO	DEMANDA DE USO DOMÉSTICO (m ³ /año)
Abriaquí	100,718.10
Cañas Gordas	1,099,620.90
Dabeiba	1,683,964.00
Frontino	1,031,687.10
Uramita	539,528.40

Fuente: Elaboración propia

Teniendo en cuenta el área de influencia de cada UAH en relación con los municipios mencionados anteriormente se estima la demanda para cada UAH nivel 1, nivel 2 y nivel 3.

Tabla 34. Demanda de uso Doméstico en las UAH - Nivel 1, Nivel 2 y nivel 3 (L/s)





PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA RÍO SUCIO ALTO
FASE DE DIAGNÓSTICO

Nivel 1		Nivel 2		Nivel 3		
UAH	DUD	UAH	DUD	UAH	DUD	
	(L/s)		(L/s)		(L/s)	
1111010000	141.16	1111-01-0100	3.11			
		1111-01-0200	4.01	1111-01-02-01	0.0290	
		1111-01-0300	6.18			
		1111-01-0400	6.58	1111-01-04-01	0.1460	
		1111-01-0500	8.56			
		1111-01-0600	8.91		1111-01-06-01	0.0004
					1111-01-06-02	0.0010
		1111-01-0700	7.54		1111-01-07-01	0.0080
					1111-01-07-02	0.0080
		1111-01-0800	12.36		1111-01-08-01	0.0001
					1111-01-08-02	0.0002
		1111-01-0900	8.76	1111-01-09-01	0.0460	
		1111-01-1000	4.48			
		1111-01-1100	5.29			
		1111-01-1200	11.19			
		1111-01-1300	12.68			
		1111-01-1400	2.82			
		1111-01-1500	4.45			
		1111-01-1600	2.63	1111-01-16-01	2.0460	
		1111-01-1700	3.92			
		1111-01-1800	1.20			
		1111-01-1900	3.04			
		1111-01-2000	5.42			
		1111-01-2100	5.58			
		1111-01-2200	2.10			
		1111-01-2300	1.44	1111-01-23-01	0.1140	
1111-01-2400	2.64					
1111-01-2500	4.44					
1111-01-2600	1.82					

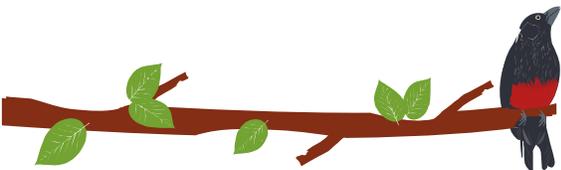
Fuente: Elaboración propia

1.9.2 DEMANDA DE USO SECTOR PECUARIO (DUP)

Para determinar la demanda del recurso hídrico en el sector pecuario, se tomó como base la información levantada en campo, en relación con las principales especies pecuarias explotadas en la región de la cuenca del río Sucio Alto. En la siguiente tabla se presenta las principales actividades dentro del sector pecuario, siendo la principal la cría de Bovinos con un total de **79,005 cabezas**.

Tabla 35 Inventario pecuario de la cuenca río Sucio Alto.





PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA RÍO SUCIO ALTO
FASE DE DIAGNÓSTICO

MUNICIPIO	BOVINOS	BÚFALOS	OVEJOS	CABRAS	COLMENAS	ÉQUIDOS
Abriaquí	8,605	0	25	32	24	309
Cañas Gordas	13,251	4	44	58	30	1,321
Frontino	22,258	118	90	46	0	2,276
Uramita	11,480	0	0	0	0	0
Dabeiba	23,411	0	0	0	0	1,503
TOTAL ANIMALES	79,005	122	159	136	54	5,409

Fuente: Elaboración propia

Este parámetro varía de una especie a otra y según la climatología de la región.

Tabla 36 Módulos de consumo del sector pecuario

BOVINOS	BÚFALOS	OVEJOS	CABRAS	COLMENAS	ÉQUIDOS
l/cabeza/día	l/cabeza/día	l/cabeza/día	l/cabeza/día	l/cabeza/día	l/100unid/día
100.0	25.0	25.0	25.0	0.20	30.0

Fuente: Elaboración propia

Teniendo en cuenta los módulos de consumo de las distintas especies animales y el inventario pecuario, se procedió a calcular la demanda total del recurso hídrico de este sector económico en cada municipio ubicado dentro de la cuenca del río Sucio Alto.

Tabla 37 Demanda de uso pecuario por municipio en la cuenca de RSA

MUNICIPIO	DUP MUNICIPAL (m³/año)
Abriaquí	314,638.2
Cañas Gordas	484,775.6
Frontino	814,984.0
Uramita	419,020.0
Dabeiba	854,666.1

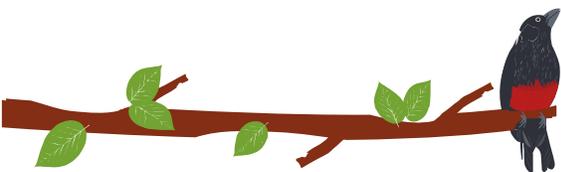
Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se presenta la demanda de uso pecuario para las diferentes unidades de análisis hidrológico de la cuenca río Sucio Alto Nivel 1, nivel 2 y Nivel 3.

Tabla 38 Demanda de uso Pecuario UAH - Nivel 1, Nivel 2 y nivel 3

Nivel 1		Nivel 2		Nivel 3	
UAH	DUP (L/s)	UAH	DUP (L/s)	UAH	DUP (L/s)
1111010000	91.51	1111-01-0100	1.58		
		1111-01-0200	2.04	1111-01-02-01	0.0150
		1111-01-0300	4.17		
		1111-01-0400	5.20	1111-01-04-01	0.1150
		1111-01-0500	6.79		
		1111-01-0600	7.10	1111-01-06-01	0.0013
				1111-01-06-02	0.0030
		1111-01-0700	12.81	1111-01-07-01	0.0243
		1111-01-07-02	0.0254		





Nivel 1		Nivel 2		Nivel 3	
UAH	DUP	UAH	DUP	UAH	DUP
	(L/s)		(L/s)		(L/s)
		1111-01-0800	5.46	1111-01-08-01	0.0004
				1111-01-08-02	0.0006
		1111-01-0900	3.86	1111-01-09-01	0.0203
		1111-01-1000	1.98		
		1111-01-1100	2.98		
		1111-01-1200	5.83		
		1111-01-1300	6.43		
		1111-01-1400	1.43		
		1111-01-1500	2.26		
		1111-01-1600	1.34	1111-01-16-01	1.039
		1111-01-1700	1.99		
		1111-01-1800	0.93		
		1111-01-1900	2.39		
		1111-01-2000	3.41		
		1111-01-2100	3.65		
		1111-01-2200	1.63		
		1111-01-2300	1.12	1111-01-23-01	0.088
		1111-01-2400	1.89		
		1111-01-2500	2.30		
		1111-01-2600	0.92		

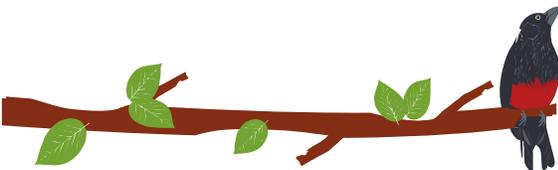
Fuente: Elaboración propia

1.9.3 DEMANDA DE USO SECTOR AGRÍCOLA (DUA)

El cálculo de la demanda hídrica agrícola está relacionado directamente con el tipo de producción que se adelanta en la zona, ya que las necesidades de riego de los diferentes cultivos son quienes dictaminan los volúmenes de agua requeridos de acuerdo con el contexto hidroclimático donde se desenvuelven, de igual forma se debe tener en cuenta que las necesidades hídricas de las producciones agrícolas incluyen consumos del recurso en actividades de postcosecha, tales como lavado y adecuación del producto. (EAAB, 2013), el uso del agua en producción agrícola está ligado a las necesidades de riego suplementario de los diferentes cultivos dado que parte de las necesidades hídrica son suplidas por la oferta ambiental. De esta forma, se debe de tener como base la cantidad de agua que deber ser aplicada a cada uno de los cultivos dependiendo de su etapa de desarrollo, ya que dependiendo de la etapa fenológica en que se encuentre el cultivo su consumo de agua podrá ser mayor o menor; esto es realizado con el fin de lograr una estabilidad entre el agua requerida por la planta y la perdida por evapotranspiración. Un primer cálculo realizado para la estimación de la demanda hídrica agrícola es el uso consuntivo del cultivo.

La extensión de los cultivos se determinó mediante levantamientos de coberturas en el área de estudio a una escala 1:25.000 en la cual se evidencian las principales coberturas.





PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA RÍO SUCIO ALTO
FASE DE DIAGNÓSTICO

Tabla 39 Áreas [Ha] por tipo de producción para UAH-1.

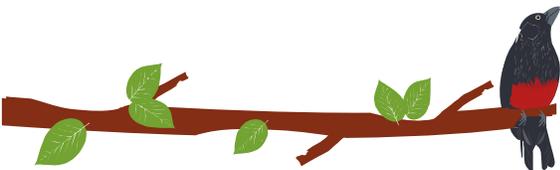
UAH - 1	Cultivo	Áreas (Hectárea)
1111-010000	Área Pastos	114,634.43
	Área cultivos transitorios	397.6
	Área cultivos transitorios (maíz)	6.2
	Área cultivos transitorios (frijol)	19.8
	Herbáceos (caña)	4,559.14
	Herbáceos (banano)	137.6
	Herbáceos (otros)	134.6
	Arbustivos (café)	3,165.83
	Arbóreos (aguacate)	38.9
	Arbóreos(citricos)	35.2
	Heterogénea	7,198.37

Fuente: Elaboración propia

Tabla 40 Áreas [Ha] por tipo de producción para UAH-2

UAH-2	Pastos	transitorios	Maiz	Frijol	Caña	Banano	herbáceos	arbustivos	Café	Arbóreos	arbóreos (aguacate)	arbóreos(citricos)	Heterogénea
1111-01-0100	415.0							21.3					305.9
1111-01-0200	5205	10.0		1.7	47.9		40.4	53.9	26.9			23.0	417.8
1111-01-0300	5445	33.3		3.4	623.1			2.7	31.0		23.6		193.6
1111-01-0400	2884	11.2	4.1		421.5	1.7	2.3	3.1	34.1				115.1
1111-01-0500	3317	12.2			441.5	4.6			25.2				66.1
1111-01-0600	6660	6.0			273.7	6.0			58.4		1.7		143.2
1111-01-0700	14620	22.9			274.7	11.8	3.2	11.2					212.1
1111-01-0800	7167.5				60.4	6.7		6.0	706.3	4.8			358.4
1111-01-0900	5736.7	3.4	2.1		103.6	31.2		5.0	305.4				747.2
1111-01-1000	2996.2				5.2	2.7			31.7				27.1
1111-01-1100	3071.3	30.5			223.3				184.4				267.9
1111-01-1200	7082.8	64.1			1247.1	17.1			1010.9				901.4
1111-01-1300	4247.4	111.0			98.6			22.5					372.0
1111-01-1400	1776.0	33.1			3.7	4.2							89.1
1111-01-1500	3112.4	18.3					31.9	9.0	49.3				313.2
1111-01-1600	2471.1	15.8					24.9	11.9					497.6
1111-01-1700	1240.9							165.8					511.8
1111-01-1800	2852.9	1.8			193.9	2.4			12.7				33.4
1111-01-1900	2775.6	2.5			37.6		2.3		66.7				63.3
1111-01-2000	6396.3	3.2			165.9	11.7			29.0		3.7		247.4
1111-01-2100	8602.0	2.8			8.0	13.1			76.5		3.0		112.3





PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA RÍO SUCIO ALTO
FASE DE DIAGNÓSTICO

UAH-2	Pastos	transitorios	Maíz	Frijol	Caña	Banano	herbáceos	arbustivos	Café	Árboreos	arbóreos (aguacate)	arbóreos(citricos)	Heterogénea
1111-01-2200	2122.1	3.7			116.9	1.7			78.7				63.9
1111-01-2300	2619.4				68.4				13.3				26.7
1111-01-2400	4190.5				66.4	11.8	29.7		8.4		2.0		114.5
1111-01-2500	6027.4	9.0		14.7	77.8	10.9			53.0			12.2	296.0
1111-01-2600	1597.7	2.9						51.6					701.5

Fuente: Elaboración propia

Tabla 41 Áreas [Ha] por tipo de producción para UAH-3

UAH-3	Pastos	Transitorios	Café	Heterogénea
1111-01-02-01	336.2			
1111-01-04-01	316.2			
1111-01-06-01	1261.2			
1111-01-06-02	1406.8			
1111-01-07-01	120.7			
1111-01-07-02	189.0			
1111-01-08-01	297.9		24.6	
1111-01-08-02	394.0		27.9	
1111-01-09-01	24.6		2.3	16.7
1111-01-16-01	2424.5	15.8	11.9	484.4
1111-01-23-01	295.5			

El K_c Aplicado hace referencia al valor utilizado en el cálculo. Este fue estimado como el valor de K_c máximo en su etapa de desarrollo fenológico.

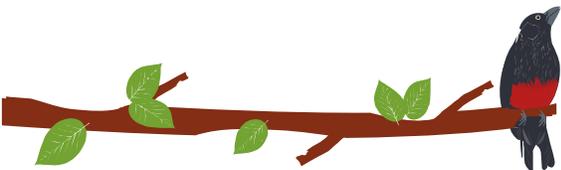
Tabla 42 Coeficiente de cultivo (K_c) para las coberturas identificadas en la cuenca RSA

Cultivo	K_c Inicial	K_c Medio	K_c Desarrollo	K_c Final	K_c Aplicado
Pastos	0.40	0.85	0.85	0.85	0.85
Cultivos (Café)	0.90	0.95	0.95	0.95	0.95
Agrícola Heterogénea	0.59	1.06	0.90	0.77	0.90
Frijol	0.40	1.15		0.35	0.63
Maíz		1.20		0.50	0.85
Caña	0.40	2.25		0.75	1.13
Plátano	0.50	1.10		1.00	0.87
Café	0.90	0.95		0.95	0.93
Aguacate	0.60	0.85		0.75	0.73
Cítricos	0.80	0.80		0.80	0.80

Fuente: Elaboración propia a partir de (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006)

Tabla 43 Valores de Evapotranspiración Potencial UAH - Nivel 1, Nivel 2 y nivel 3





PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA RÍO SUCIO ALTO
FASE DE DIAGNÓSTICO

Nivel 1		Nivel 2		Nivel 3	
UAH	ETP (mm/año)	UAH	ETP (mm/año)	UAH	ETP (mm/año)
1111010000	313.7	1111-01-0100	435.7		
		1111-01-0200	414.7	1111-01-02-01	349.3
		1111-01-0300	347.7		
		1111-01-0400	291.6	1111-01-04-01	259.2
		1111-01-0500	299.0		
		1111-01-0600	313.7	1111-01-06-01	248.8
				1111-01-06-02	289.0
		1111-01-0700	259.8	1111-01-07-01	244.9
				1111-01-07-02	242.4
		1111-01-0800	294.1	1111-01-08-01	283.6
				1111-01-08-02	275.5
		1111-01-0900	301.7	1111-01-09-01	278.5
		1111-01-1000	293.2		
		1111-01-1100	275.7		
		1111-01-1200	284.6		
		1111-01-1300	263.8		
		1111-01-1400	295.5		
		1111-01-1500	308.2		
		1111-01-1600	363.0	1111-01-16-01	326.4
		1111-01-1700	376.8		
		1111-01-1800	383.9		
		1111-01-1900	324.3		
		1111-01-2000	383.2		
		1111-01-2100	362.4		
		1111-01-2200	329.8		
		1111-01-2300	332.6	1111-01-23-01	295.8
1111-01-2400	396.0				
1111-01-2500	364.7				
1111-01-2600	471.5				

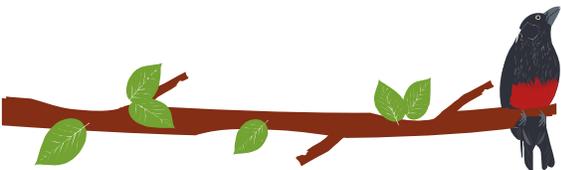
Fuente: Elaboración propia

A continuación, se presenta la demanda agrícola del cultivo para cada unidad de análisis hidrológico Nivel 1, Nivel 2 y Nivel 3.

Tabla 44 Demanda de uso agrícola UAH - Nivel 1, Nivel 2 y nivel 3

Nivel 1		Nivel 2		Nivel 3	
UAH	DUA (L/s)	UAH	DUA (L/s)	UAH	DUA (L/s)
1111010000	11215.93	1111-01-0100	90		
		1111-01-0200	660	1111-01-02-01	31.70
		1111-01-0300	620		
		1111-01-0400	290	1111-01-04-01	22.10
		1111-01-0500	320		
		1111-01-0600	610	1111-01-06-01	84.60
				1111-01-06-02	109.60
		1111-01-0700	1070	1111-01-07-01	8.00
				1111-01-07-02	12.30
		1111-01-0800	670	1111-01-08-01	24.80
				1111-01-08-02	31.50
		1111-01-0900	570	1111-01-09-01	3.40
		1111-01-1000	240		
		1111-01-1100	290		
		1111-01-1200	840		
		1111-01-1300	350		





Nivel 1		Nivel 2		Nivel 3	
UAH	DUA (L/s)	UAH	DUA (L/s)	UAH	DUA (L/s)
		1111-01-1400	150		
		1111-01-1500	300		
		1111-01-1600	300	1111-01-16-01	261.10
		1111-01-1700	200		
		1111-01-1800	330		
		1111-01-1900	260		
		1111-01-2000	720		
		1111-01-2100	860		
		1111-01-2200	220		
		1111-01-2300	250	1111-01-23-01	23.60
		1111-01-2400	480		
		1111-01-2500	640		
		1111-01-2600	310		

Fuente: Elaboración propia

Sin embargo, esta demanda es considerada ambiental y es suplida en gran parte por la oferta ambiental (precipitación). El riego suplementario es aquel que suple la demanda ambiental que no es satisfecha por la precipitación y, por lo tanto, se requiere eliminar los déficits causados por esta condición. En el capítulo de clima, se estimaron los balances hídricos hidroclimáticos de largo plazo para la cuenca RSA. Uno de los componentes del balance hídrico es el relacionado con el déficit, el cual determina que tanta cantidad de agua es necesaria para alcanzar la demanda ambiental, en otras palabras, la cantidad de agua que debe ser aplicada mediante riego suplementario. Teniendo en cuenta el capítulo de climatología en el cual se presenta el balance hídrico para las diferentes UAH no se presenta déficit en todo el territorio que comprende la cuenca del río Sucio Alto, esto debido a los altos volúmenes de precipitación y los bajos valores de evapotranspiración potencial.

De acuerdo con los resultados, la demanda por uso agrícola es insignificante dado que la oferta ambiental supera los requerimientos de los cultivos, es decir, no es necesario el riego suplementario.

1.9.4 DEMANDA TOTAL

A continuación, se presenta los resultados de la demanda total en la cuenca río Sucio Alto y las UAH nivel 2 y nivel 3.

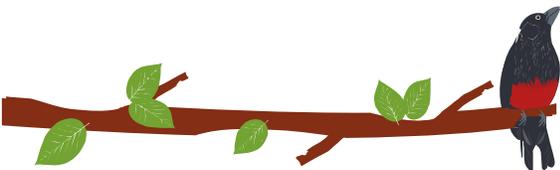
Como se comentó, la demanda a las corrientes principales en las UAH de la cuenca RSA para uso agrícola es insignificante y, por lo tanto, no se incluye en este componente ya que de otra forma los indicadores del recurso hídrico que tienen que ver con el uso del agua resultarían doblemente afectados.

Es necesario resaltar el alto valor de la demanda pecuaria debido a las aproximadamente 79,005 cabezas de bovinos que se explotan en la cuenca. La estimación de la demanda total solo tuvo en cuenta la demanda asociada al sector doméstico y pecuario. La no inclusión de las demandas agrícolas e industriales ya fueron justificadas. En las siguientes tablas se presenta la estimación de la demanda total.

Tabla 45 Demanda de uso total UAH Nivel 1, Nivel 2 y nivel 3.

Nivel 1		Nivel 2		Nivel 3	
UAH	DUT (L/s)	UAH	DUT (L/s)	UAH	DUT (L/s)
1111010000	232.67	1111-01-0100	4.69		



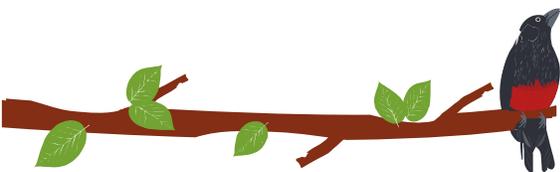


Nivel 1		Nivel 2		Nivel 3	
UAH	DUT	UAH	DUT	UAH	DUT
	(L/s)		(L/s)		(L/s)
		1111-01-0200	6.04	1111-01-02-01	0.0440
		1111-01-0300	10.36		
		1111-01-0400	11.78	1111-01-04-01	0.2610
		1111-01-0500	15.35		
		1111-01-0600	16.01	1111-01-06-01	0.0017
				1111-01-06-02	0.0040
		1111-01-0700	20.35	1111-01-07-01	0.0323
				1111-01-07-02	0.0334
		1111-01-0800	17.82	1111-01-08-01	0.0005
				1111-01-08-02	0.0008
		1111-01-0900	12.63	1111-01-09-01	0.0663
		1111-01-1000	6.46		
		1111-01-1100	8.27		
		1111-01-1200	17.03		
		1111-01-1300	19.11		
		1111-01-1400	4.25		
		1111-01-1500	6.71		
		1111-01-1600	3.97	1111-01-16-01	3.0850
		1111-01-1700	5.91		
		1111-01-1800	2.13		
		1111-01-1900	5.42		
		1111-01-2000	8.83		
		1111-01-2100	9.23		
		1111-01-2200	3.73		
		1111-01-2300	2.57	1111-01-23-01	0.2020
		1111-01-2400	4.53		
		1111-01-2500	6.74		
		1111-01-2600	2.74		

Fuente: Elaboración propia

1.10 INDICADORES DE SOSTENIBILIDAD DEL RECURSO HIDRICO

Teniendo en cuenta la información generada relacionada con la oferta hídrica y la demanda en cada uno de los sectores de interés para las UAH nivel 1, Nivel 2 y nivel 3 cuencas abastecedoras. A continuación, se presentan los resultados relacionados con los indicadores de sostenibilidad del recurso hídrico.



1.10.1 ÍNDICE DE RETENCIÓN Y REGULACIÓN HÍDRICA (IRH)

El índice de regulación hídrica (en adelante IRH) se utiliza para medir la capacidad de una cuenca para mantener un régimen de caudales, teniendo en cuenta su capacidad de retención de humedad y la interacción entre los factores bióticos y abióticos presentes, principalmente entre el sistema suelo-vegetación y el clima y las características morfométricas (IDEAM, 2010; MinAmbiente, 2014). Para su cálculo se tienen en cuenta la distribución de las frecuencias acumuladas para los caudales diarios, las cuales representan la probabilidad de excedencia de un valor determinado de caudal. El análisis de estas frecuencias se puede realizar por medio de la construcción de una curva de duración de caudales, la cual refleja el porcentaje de tiempo en el que un caudal es igualado o excedido (IDEAM & MinAmbiente, 2015). Los valores de este índice oscilan entre 0 y 1, donde los valores cercanos a 0 significan menor capacidad de retención. El índice se calcula mediante la siguiente relación:

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

Donde, V_p , volumen representado por el área bajo la curva que se encuentra debajo de la línea correspondiente al caudal 50% del tiempo de Excedencia. V_t , Volumen total representado por el área bajo la curva de duración de caudales. La Tabla 46 presenta las categorías propias de este índice y sus rangos para el índice.

Tabla 46 Clasificación para los valores del IRH UHN-1

Rango del valor	Categoría
0.00 – 0.50	Muy baja
0.50 – 0.65	Baja
0.65 – 0.75	Media
0.75 – 0.85	Alta
0.85 – 1.00	Muy alta

Fuente: Elaboración propia a partir de MinAmbiente (2014)

Las curvas de duración de caudales fueron estimadas a partir de las series generadas para cada una de las UAH pertenecientes a la cuenca del río Sucio Alto, a continuación, se presenta la curva de duración de caudales para la UAH nivel 1.



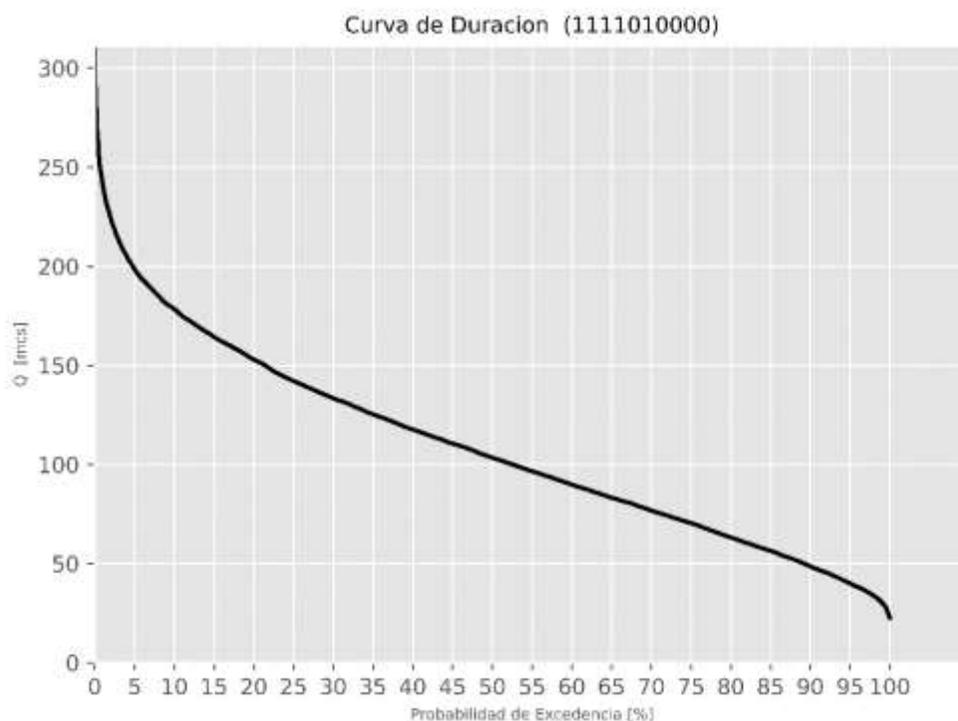
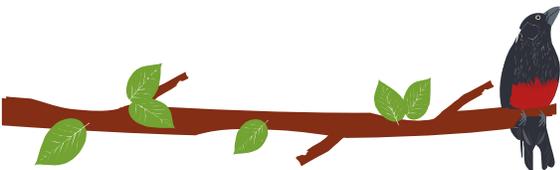


Figura 33 Curva de duración de caudales UAH nivel 1. Elaboración propia

Finalmente, mediante las curvas de duración de caudales y la ecuación descrita anteriormente se calculó el índice de regulación hídrica para las diferentes UAH Nivel 1, Nivel 2 y Nivel 3.

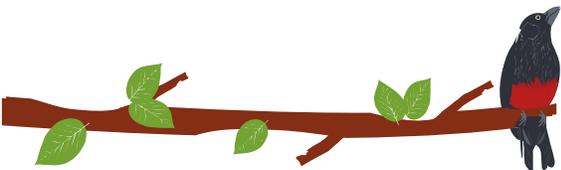
A continuación, se presenta el índice de regulación hídrica para las dos condiciones hidrológicas evaluadas anteriormente para año seco y normal.

1.10.1.1 Condición Hidrológica – año normal

A continuación, se presenta los resultados del índice para cada una de las Unidades de análisis hidrológico de la cuenca Rio Sucio alto.

Tabla 47 Índice de retención y regulación hídrica UAH Nivel 1

Nivel 1			Nivel 2			Nivel 3		
UAH	DUT		UAH	DUT		UAH	DUT	
	IRH	Clasificación		IRH	Clasificación		IRH	Clasificación
1111010000	0.81	Alta	1111-01-0100	0.80	Alta			
			1111-01-0200	0.80	Alta	1111-01-02-01	0.81	Alta
			1111-01-0300	0.77	Alta			
			1111-01-0400	0.81	Alta	1111-01-04-01	0.81	Alta
			1111-01-0500	0.81	Alta			
			1111-01-0600	0.78	Alta	1111-01-06-01	0.81	Alta
			1111-01-0700	0.81	Alta	1111-01-06-02	0.79	Alta
					1111-01-07-01	0.81	Alta	



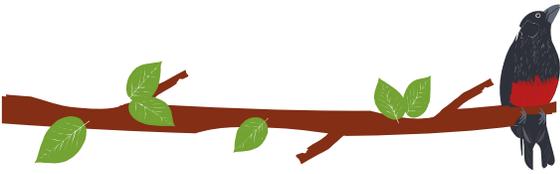
PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA RÍO SUCIO ALTO
FASE DE DIAGNÓSTICO

Nivel 1			Nivel 2			Nivel 3		
UAH	DUT		UAH	DUT		UAH	DUT	
	IRH	Clasificación		IRH	Clasificación		IRH	Clasificación
						1111-01-07-02	0.81	Alta
			1111-01-0800	0.79	Alta	1111-01-08-01	0.79	Alta
			1111-01-0900	0.80	Alta	1111-01-08-02	0.8	Alta
			1111-01-0900	0.80	Alta	1111-01-09-01	0.81	Alta
			1111-01-1000	0.81	Alta			
			1111-01-1100	0.79	Alta			
			1111-01-1200	0.79	Alta			
			1111-01-1300	0.80	Alta			
			1111-01-1400	0.81	Alta			
			1111-01-1500	0.81	Alta			
			1111-01-1600	0.81	Alta	1111-01-16-01	0.81	Alta
			1111-01-1700	0.81	Alta			
			1111-01-1800	0.79	Alta			
			1111-01-1900	0.80	Alta			
			1111-01-2000	0.80	Alta			
			1111-01-2100	0.81	Alta			
			1111-01-2200	0.81	Alta			
			1111-01-2300	0.81	Alta	1111-01-23-01	0.81	Alta
			1111-01-2400	0.80	Alta			
			1111-01-2500	0.81	Alta			
			1111-01-2600	0.80	Alta			

Fuente: Elaboración propia

En general, la totalidad la cuenca del Rio Sucio Alto presenta un índice de regulación **alto el cual se mantiene sobre las subunidades nivel 1 y nivel 2**, en la condición hidrológica de año normal, el índice significa que las unidades alta regulación de los caudales que escurren en ellas.

A continuación, en la siguiente figura se observa la distribución espacial del índice de retención y regulación hídrica para las UAH nivel 2.



PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA RÍO SUCIO ALTO
FASE DE DIAGNÓSTICO

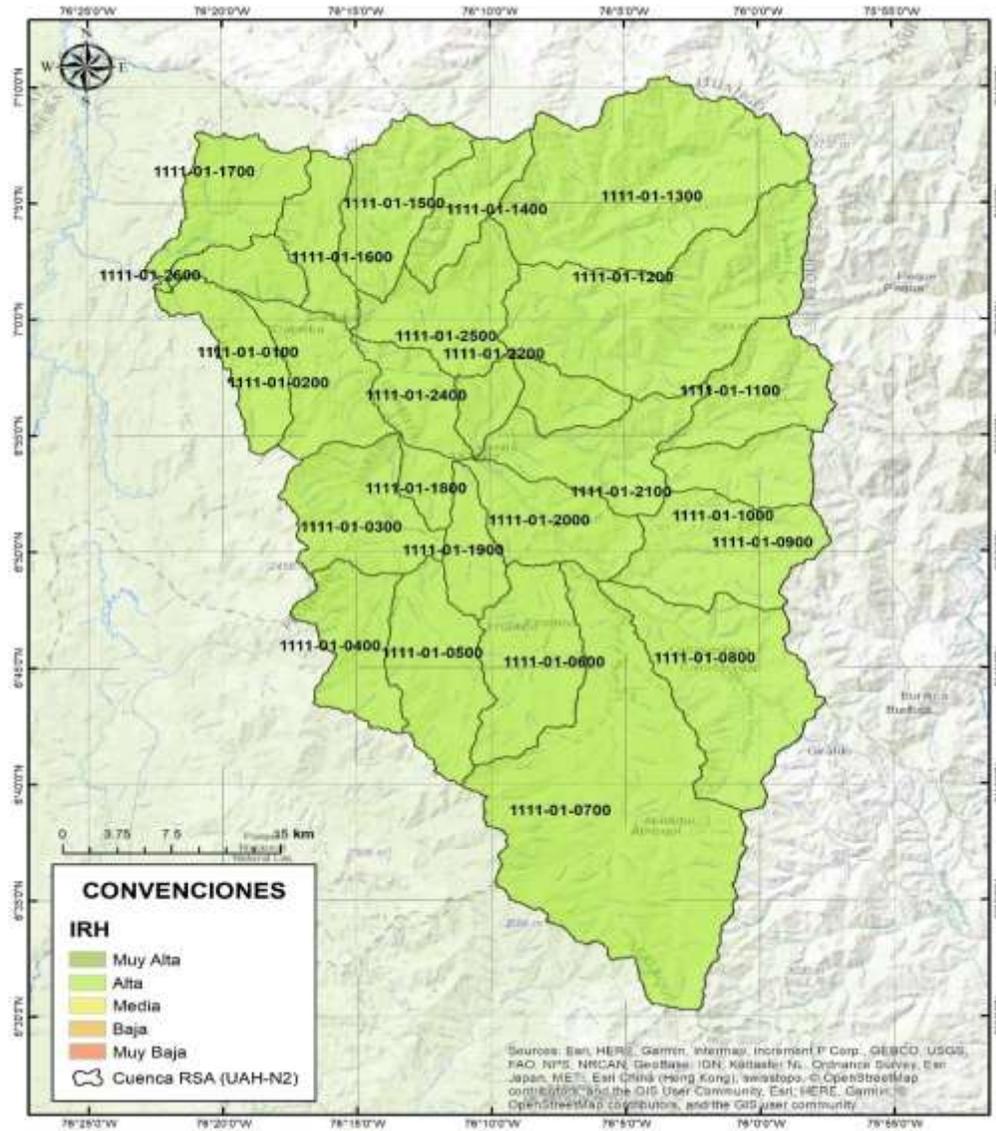
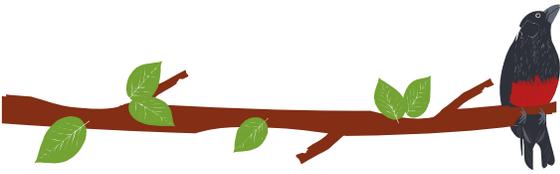


Figura 34 Distribución espacial del índice de retención y regulación hídrica UAH – nivel 2, Año normal.
Elaboración propia





PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA RÍO SUCIO ALTO
FASE DE DIAGNÓSTICO

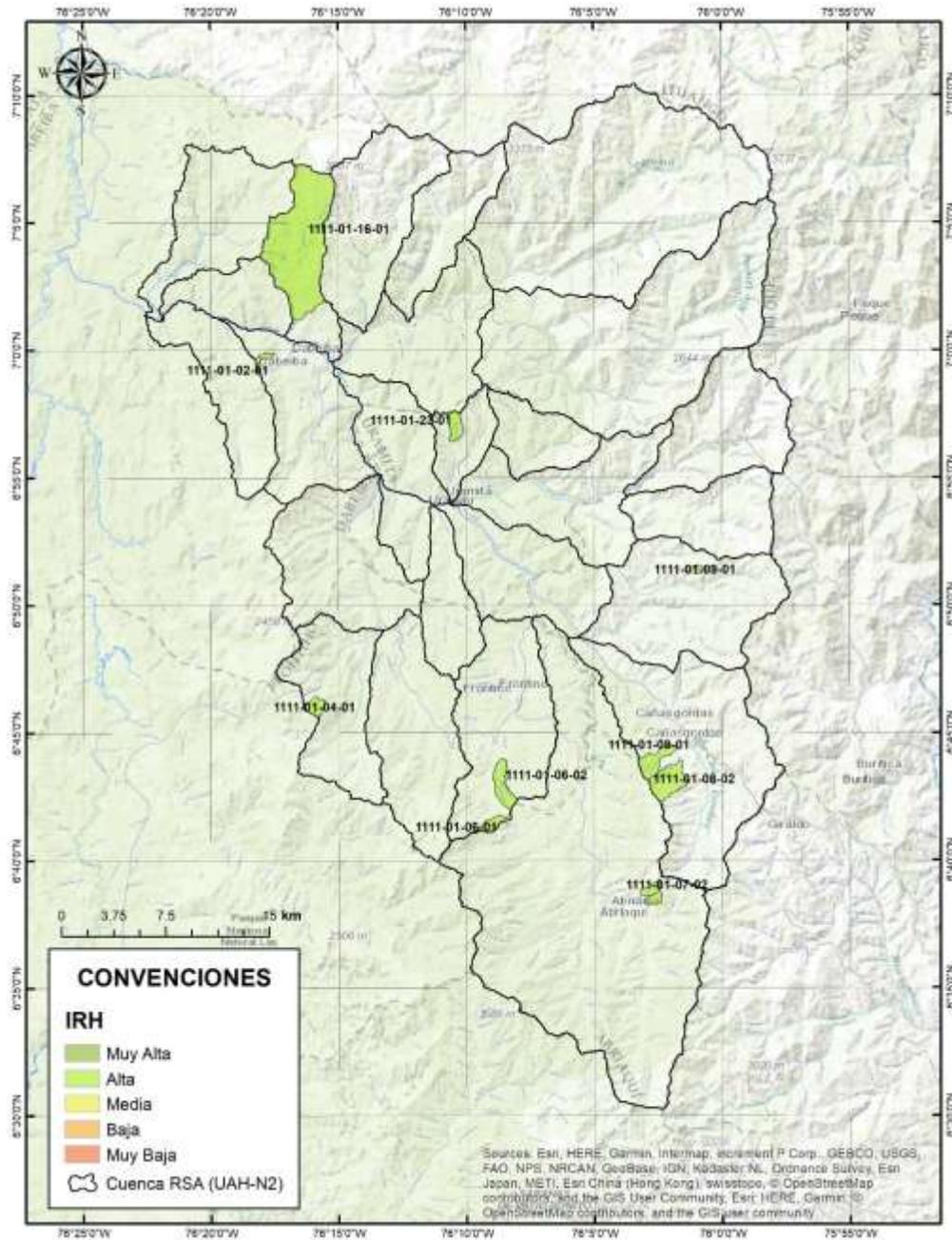
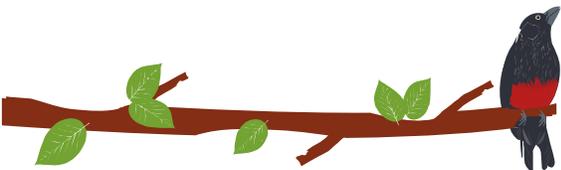


Figura 35 Distribución espacial del índice de retención y regulación hídrica UAH – nivel 3 Año normal.
Elaboración propia

1.10.1.2 Condición Hidrológica – Año seco

El indicador para la condición de análisis hidrológico fue determinado a partir de los caudales mínimos mensuales generados del modelo lluvia escorrentía presentado en los numerales anteriores.

Tabla 48 Índice de retención y regulación hídrica UAH Nivel 1

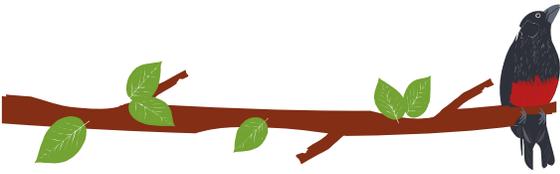


PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA RÍO SUCIO ALTO
FASE DE DIAGNÓSTICO

Nivel 1			Nivel 2			Nivel 3					
UAH	DUT		UAH	DUT		UAH	DUT				
	IRH	Clasificación		IRH	Clasificación		IRH	Clasificación			
1111010000	0.82	Alta	1111-01-0100	0.810	Alta						
			1111-01-0200	0.808	Alta	1111-01-02-01	0.81	Alta			
			1111-01-0300	0.789	Alta						
			1111-01-0400	0.822	Alta	1111-01-04-01	0.83	Alta			
			1111-01-0500	0.823	Alta						
			1111-01-0600	0.81	Alta				1111-01-06-01	0.82	Alta
									1111-01-06-02	0.83	Alta
			1111-01-0700	0.83	Alta				1111-01-07-01	0.83	Alta
									1111-01-07-02	0.82	Alta
			1111-01-0800	0.82	Alta				1111-01-08-01	0.82	Alta
									1111-01-08-02	0.82	Alta
			1111-01-0900	0.82	Alta				1111-01-09-01	0.82	Alta
			1111-01-1000	0.82	Alta						
			1111-01-1100	0.81	Alta						
			1111-01-1200	0.80	Alta						
			1111-01-1300	0.81	Alta						
			1111-01-1400	0.82	Alta						
			1111-01-1500	0.82	Alta						
			1111-01-1600	0.82	Alta				1111-01-16-01	0.82	Alta
			1111-01-1700	0.81	Alta						
			1111-01-1800	0.80	Alta						
			1111-01-1900	0.82	Alta						
			1111-01-2000	0.81	Alta						
			1111-01-2100	0.82	Alta						
			1111-01-2200	0.82	Alta						
			1111-01-2300	0.82	Alta				1111-01-23-01	0.82	Alta
1111-01-2400	0.81	Alta									
1111-01-2500	0.82	Alta									
1111-01-2600	0.81	Alta									

Fuente: Elaboración propia

En general, la totalidad de la cuenca del Río Sucio Alto presenta un índice de regulación **alto, el cual se mantiene sobre las subunidades nivel 1 y nivel 2**, en la condición hidrológica de año seco, el índice significa que las unidades presentan alta regulación de los caudales que escurren en ellas. Para el índice de regulación hídrica en relación con



PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA RÍO SUCIO ALTO
FASE DE DIAGNÓSTICO

la condición hidrológica de año normal, el índice no cambia se mantiene la categoría de Alta.

A continuación, en la siguiente figura se observa la distribución espacial del índice de retención y regulación hídrica para las UAH nivel 2.

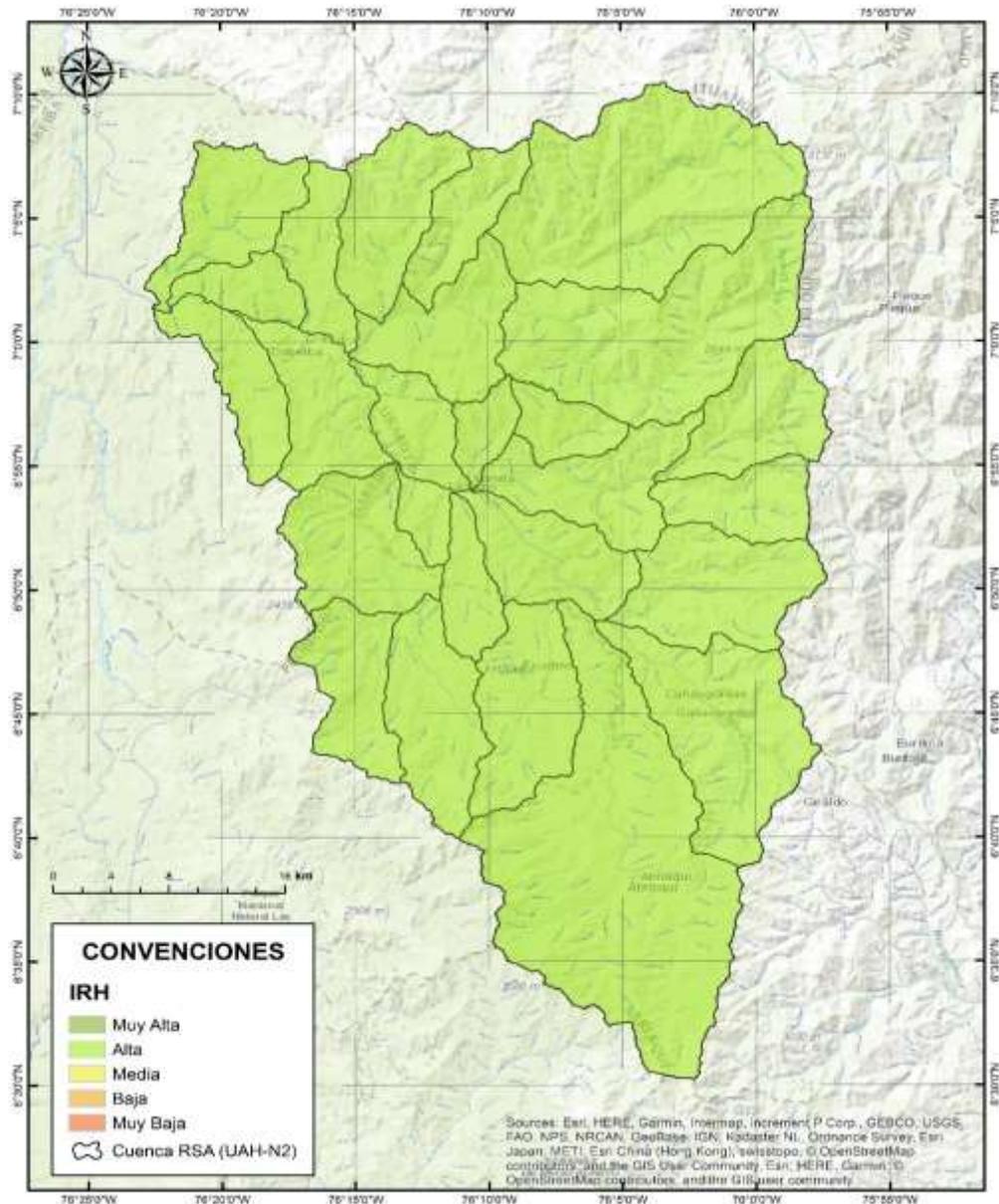
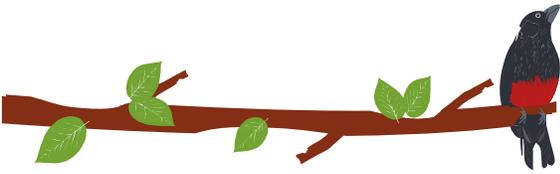


Figura 36 Distribución espacial del índice de retención y regulación hídrica UAH – nivel 2 Año seco.
Elaboración propia





PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA RÍO SUCIO ALTO
FASE DE DIAGNÓSTICO

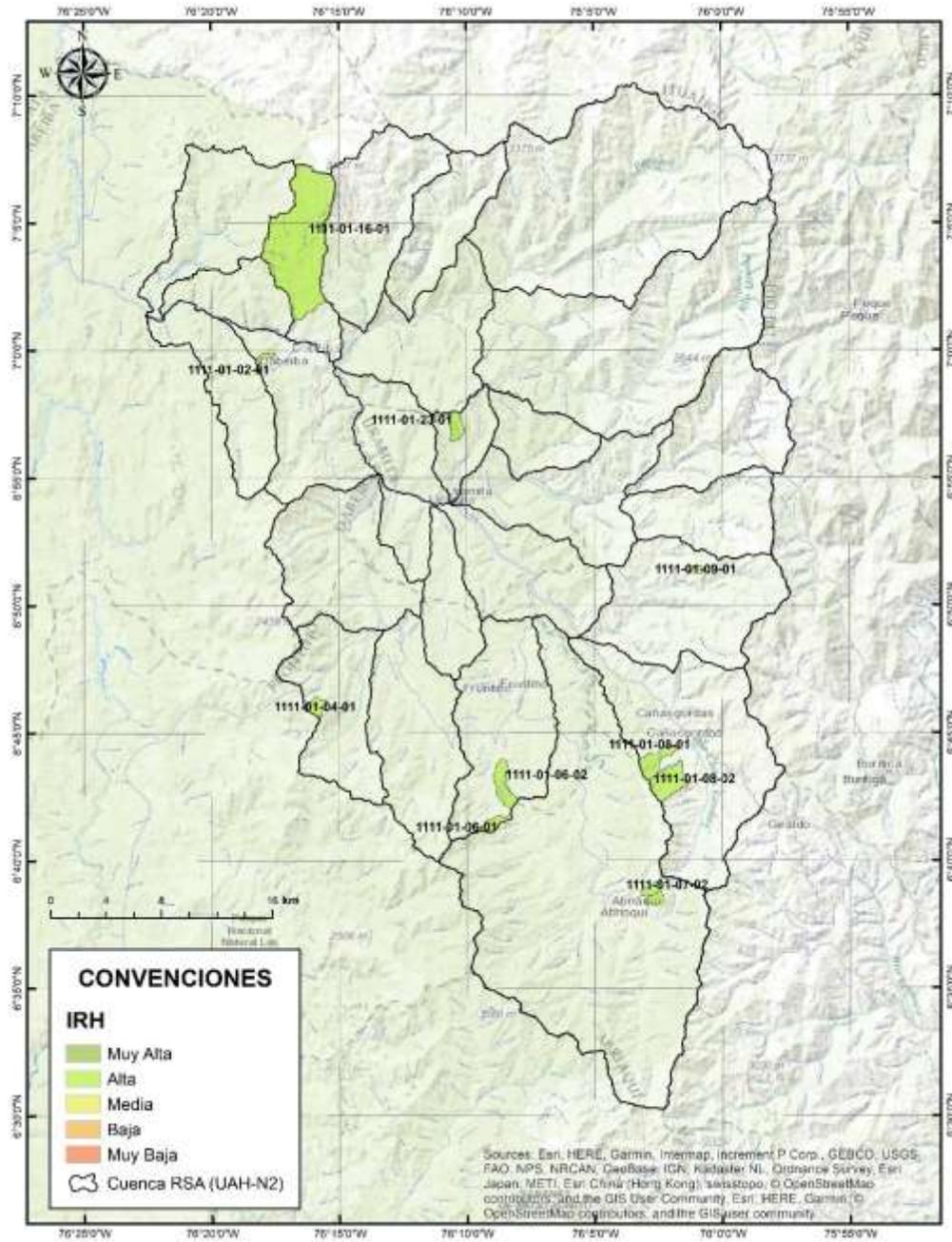
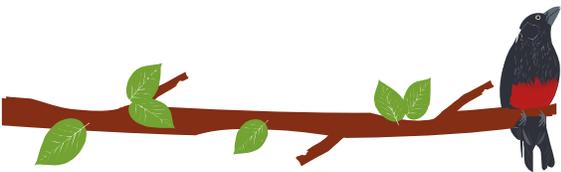


Figura 37 Distribución espacial del índice de retención y regulación hídrica UAH – nivel 3 año seco.
Elaboración propia





1.10.2 ÍNDICE DE USO DEL AGUA (IUA)

El IUA permite determinar la cantidad de agua que utilizan los diferentes sectores usuarios en un periodo de tiempo y una unidad espacial específicos frente a la oferta hídrica disponible neta a la misma escala. De esta manera se establece la presión que ejerce la demanda sobre la oferta disponible (IDEAM & MinAmbiente, 2015; MinAmbiente, 2014). Para calcular el IUA se utiliza la siguiente ecuación:

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

Donde:

Dh , demanda hídrica sectorial (m^3/s)

Oh , oferta hídrica superficial disponible (m^3/s)

La metodología de cálculo para la demanda hídrica sectorial se presenta en el Capítulo 9 y la oferta hídrica superficial disponible se calcula como:

$$Oh = O_{htotal} - O_{qamb}$$

Donde:

O_{htotal} = Volumen total de agua superficial (m^3/s)

O_{qamb} = Volumen de agua correspondiente al caudal ambiental (m^3/s)

El caudal ambiental se utiliza para estimar la oferta hídrica disponible, teniendo en cuenta que esta es el resultado de la sustracción a la oferta hídrica total, y por lo tanto es importante para la determinación del IUA y el IVH (IDEAM, 2010). Finalmente, los valores del índice se clasifican según lo descrito en la Tabla 49 a continuación.

Tabla 49 Clasificación para los valores del IUA

Rango	Categoría	Significado
0.0 – 1.0	Muy bajo	La presión de la demanda no es significativa con respecto a la oferta
1.0 – 10.0	Bajo	La presión de la demanda es baja con respecto a la oferta
10.01 – 20.0	Moderado	La presión de la demanda es moderada con respecto a la oferta
20.01 – 50.0	Alto	La presión de la demanda es alta con respecto a la oferta
50.01 – 100.0	Muy alto	La presión demanda es muy alta con respecto a la oferta
> 100.0	Crítico	La presión de la demanda es más alta que la oferta

Fuente: Elaboración propia a partir de (IDEAM & MinAmbiente, 2015)

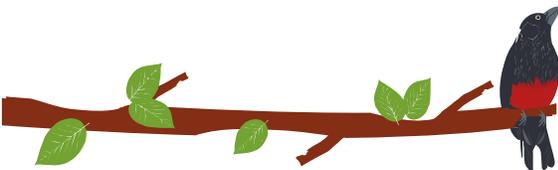
Se presentan los resultados para las dos condiciones hidrológicas determinadas anteriormente, año normal y año seco

1.10.2.1 Condición Hidrológica - Año Normal

En las Tabla 50, Tabla 51 y Tabla 52 se presenta la oferta total, el caudal ambiental, la oferta neta, la demanda total y el valor corresponde del índice de uso de agua para cada UAH de la cuenca RSA en la condición hidrológica de año normal.

Tabla 50 Cálculo del IUA UAH-nivel 1 Año normal





PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA RÍO SUCIO ALTO
FASE DE DIAGNÓSTICO

UAH-1	Oferta Total (m³/s)	Caudal Ambiental (m³/s)	Oferta Neta (m³/s)	DUT (m³/s)	IUA	
					Valor	Clasificación
1111010000	109.3	56.4	52.8	0.23	0.44	Muy Bajo

Fuente: Elaboración propia

Tabla 51 Cálculo del IUA UAH-nivel 2 Año normal

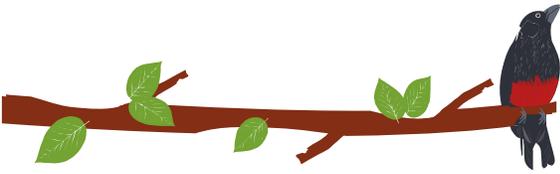
UAH-2	Oferta Total (m³/s)	Caudal Ambiental (m³/s)	Oferta Neta (m³/s)	DUT (m³/s)	IUA	
					Valor	Clasificación
1111010100	2.319	1.128	1.191	0.00469	0.39	Muy Bajo
1111010200	2.849	1.366	1.483	0.00605	0.41	Muy Bajo
1111010300	3.006	1.262	1.744	0.01035	0.59	Muy Bajo
1111010400	3.081	1.560	1.521	0.01178	0.77	Muy Bajo
1111010500	4.552	2.300	2.252	0.01535	0.68	Muy Bajo
1111010600	5.226	2.318	2.909	0.01601	0.55	Muy Bajo
1111010700	19.231	9.844	9.387	0.02035	0.22	Muy Bajo
1111010800	7.030	3.423	3.607	0.01782	0.49	Muy Bajo
1111010900	4.741	2.354	2.386	0.01262	0.53	Muy Bajo
1111011000	2.390	1.237	1.153	0.00646	0.56	Muy Bajo
1111011100	3.328	1.617	1.711	0.00827	0.48	Muy Bajo
1111011200	9.436	4.432	5.004	0.01702	0.34	Muy Bajo
1111011300	11.179	5.482	5.696	0.01911	0.34	Muy Bajo
1111011400	2.411	1.225	1.185	0.00425	0.36	Muy Bajo
1111011500	3.798	1.926	1.872	0.00671	0.36	Muy Bajo
1111011600	2.151	1.074	1.076	0.00397	0.37	Muy Bajo
1111011700	3.270	1.627	1.643	0.00591	0.36	Muy Bajo
1111011800	0.757	0.346	0.410	0.00213	0.52	Muy Bajo
1111011900	1.748	0.858	0.890	0.00543	0.61	Muy Bajo
1111012000	3.320	1.588	1.732	0.00883	0.51	Muy Bajo
1111012100	3.647	1.849	1.798	0.00923	0.51	Muy Bajo
1111012200	1.450	0.734	0.716	0.00373	0.52	Muy Bajo
1111012300	1.042	0.524	0.518	0.00256	0.49	Muy Bajo
1111012400	1.814	0.884	0.930	0.00453	0.49	Muy Bajo
1111012500	3.515	1.764	1.752	0.00674	0.38	Muy Bajo
1111012600	1.412	0.691	0.721	0.00274	0.38	Muy Bajo

Fuente: Elaboración propia

Tabla 52 Cálculo del IUA UAH-nivel 3 Año normal

UAH-3	Oferta Total (m³/s)	Caudal Ambiental (m³/s)	Oferta Neta (m³/s)	DUT (m³/s)	IUA	
					Valor	Clasificación
1111010201	0.023	0.011	0.012	0.001	0.380	Muy Bajo
1111010401	0.070	0.036	0.034	0.002	0.759	Muy Bajo
1111010601	0.079	0.040	0.040	0.005	0.004	Muy Bajo
1111010602	0.181	0.085	0.096	0.002	0.004	Muy Bajo
1111010701	0.046	0.024	0.022	0.001	0.144	Muy Bajo
1111010702	0.049	0.025	0.024	0.002	0.142	Muy Bajo
1111010801	0.163	0.075	0.088	0.004	0.001	Muy Bajo
1111010802	0.252	0.124	0.128	0.014	0.001	Muy Bajo
1111010901	0.025	0.012	0.012	0.001	0.541	Muy Bajo
1111011601	1.719	0.866	0.853	0.043	0.362	Muy Bajo
1111012301	0.084	0.043	0.041	0.003	0.488	Muy Bajo

Fuente: Elaboración propia



PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA RÍO SUCIO ALTO
FASE DE DIAGNÓSTICO

Finalmente, la Figura 38 y Figura 39 presentan espacialmente el índice de uso del agua para la cuenca del RSA UHN-2 y UHN-3 respectivamente.

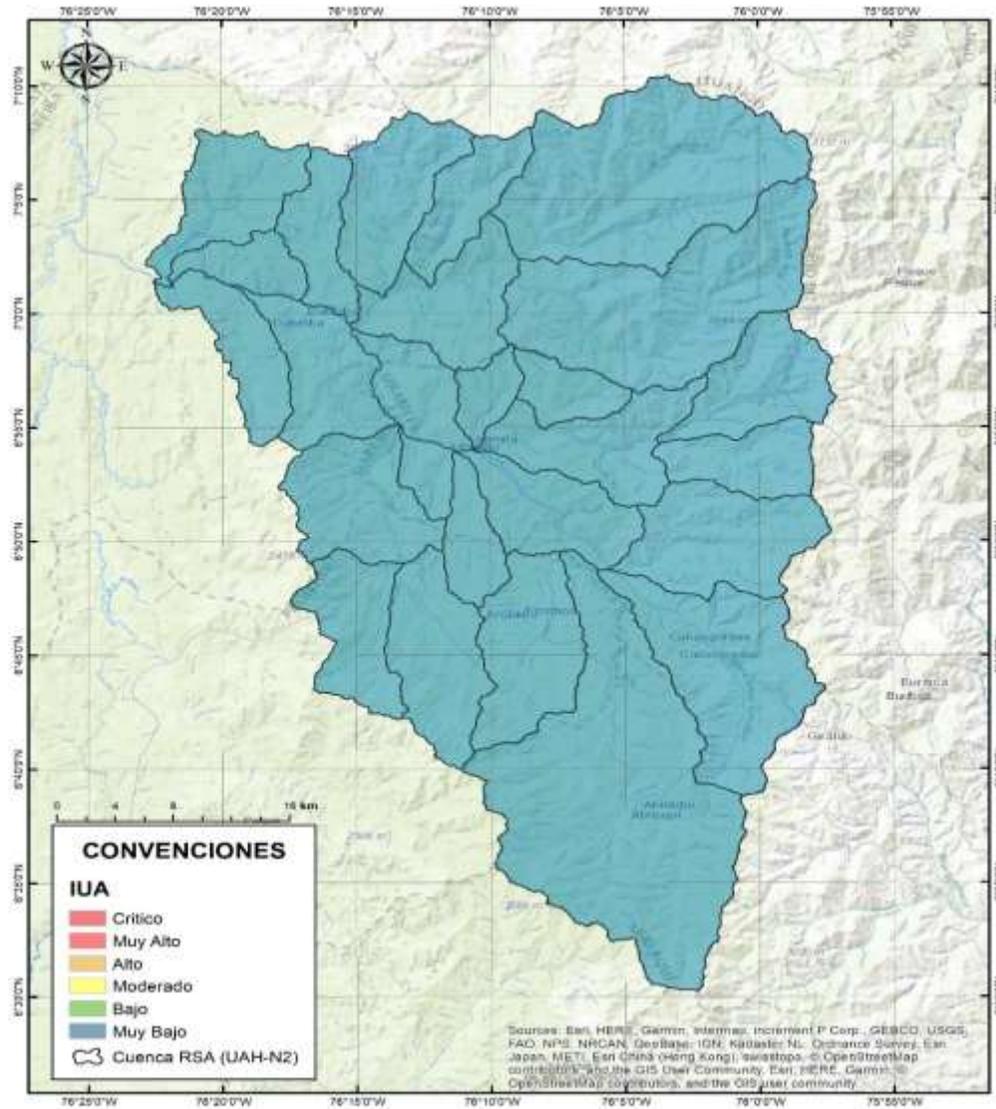
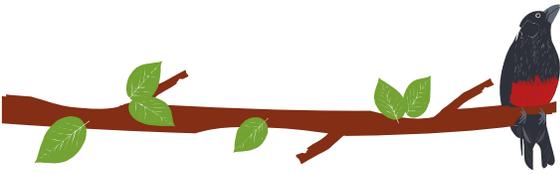


Figura 38 Índice de uso del agua (IUA) por UHN-2 Año normal. Elaboración propia





PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA RÍO SUCIO ALTO
FASE DE DIAGNÓSTICO

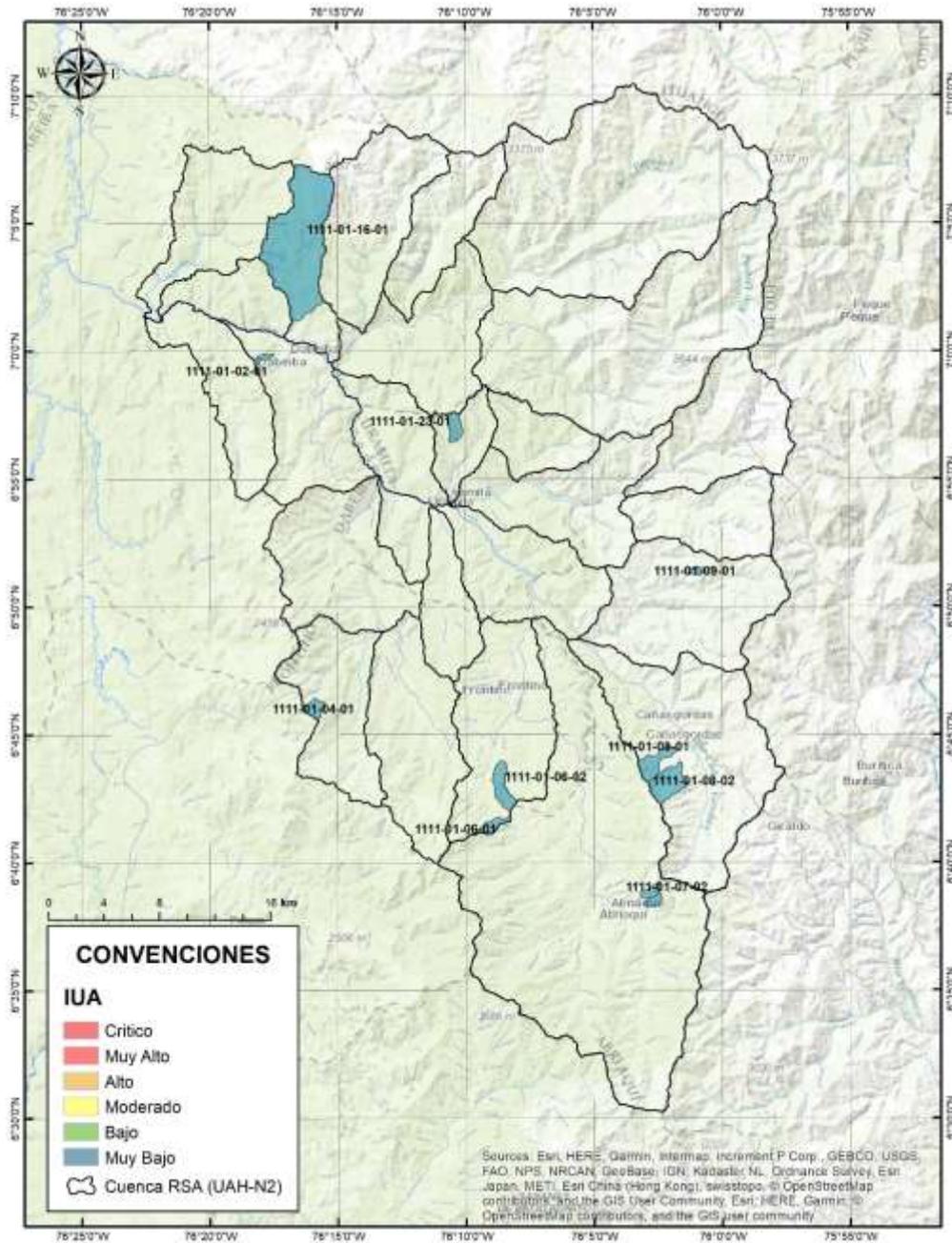
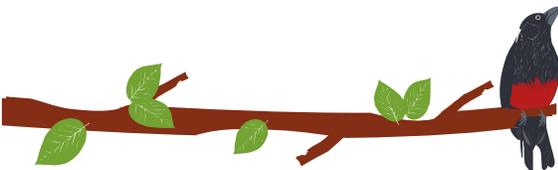


Figura 39 Índice de uso del agua (IUA) por UHN-3 Año normal. Elaboración propia

1.10.2.2 Condición Hidrología - Año Seco

En las Tabla 53, Tabla 54 y Tabla 55 se presenta la oferta total, el caudal ambiental, la oferta neta, la demanda total y el valor correspondiente del índice de uso de agua para cada UAH de la cuenca RSA en la condición hidrológica de año seco.





PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA RÍO SUCIO ALTO
FASE DE DIAGNÓSTICO

Tabla 53 Cálculo del IUA UAH-nivel 1 Año seco

UAH-1	Oferta Total (m ³ /s)	Caudal Ambiental (m ³ /s)	Oferta Neta (m ³ /s)	DUT (m ³ /s)	IUA	
					Valor	Clasificación
1111010000	51	26.34	24.6	0.23	0.9	Muy Bajo

Fuente: Elaboración propia

Tabla 54 Cálculo del IUA UAH-nivel 2 Año seco

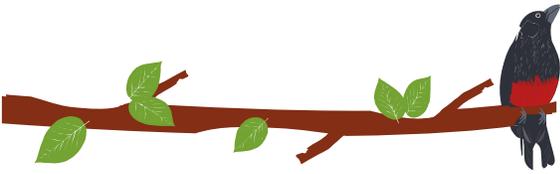
UAH-2	Oferta Total (m ³ /s)	Caudal Ambiental (m ³ /s)	Oferta Neta (m ³ /s)	DUT (m ³ /s)	IUA	
					Valor	Clasificación
1111010100	0.833	0.405	0.428	0.00469	1.1	Bajo
1111010200	0.970	0.465	0.505	0.00605	1.2	Bajo
1111010300	0.664	0.279	0.385	0.01035	2.7	Bajo
1111010400	1.402	0.710	0.692	0.01178	1.7	Bajo
1111010500	2.197	1.110	1.087	0.01535	1.4	Bajo
1111010600	1.980	0.878	1.102	0.01601	1.5	Bajo
1111010700	9.774	5.003	4.771	0.02035	0.4	Muy bajo
1111010800	2.770	1.349	1.421	0.01782	1.3	Bajo
1111010900	2.111	1.049	1.063	0.01262	1.2	Bajo
1111011000	1.077	0.557	0.519	0.00646	1.2	Bajo
1111011100	1.165	0.566	0.599	0.00827	1.4	Bajo
1111011200	3.050	1.433	1.617	0.01702	1.1	Bajo
1111011300	4.155	2.038	2.117	0.01911	0.9	Muy bajo
1111011400	1.026	0.522	0.505	0.00425	0.8	Muy bajo
1111011500	1.623	0.823	0.800	0.00671	0.8	Muy bajo
1111011600	0.878	0.438	0.439	0.00397	0.9	Muy bajo
1111011700	1.328	0.660	0.667	0.00591	0.9	Muy bajo
1111011800	0.234	0.107	0.127	0.00213	1.7	Bajo
1111011900	0.820	0.402	0.417	0.00543	1.3	Bajo
1111012000	1.508	0.721	0.787	0.00883	1.1	Bajo
1111012100	1.661	0.842	0.819	0.00923	1.1	Bajo
1111012200	0.639	0.323	0.315	0.00373	1.2	Bajo
1111012300	0.445	0.224	0.221	0.00256	1.2	Bajo
1111012400	0.671	0.327	0.344	0.00453	1.3	Bajo
1111012500	1.434	0.720	0.715	0.00674	0.9	Muy bajo
1111012600	0.535	0.262	0.273	0.00274	1.0	Muy bajo

Fuente: Elaboración propia

Tabla 55 Cálculo del IUA UAH-nivel 3 Año seco

UAH-3	Oferta Total (m ³ /s)	Caudal Ambiental (m ³ /s)	Oferta Neta (m ³ /s)	DUT (m ³ /s)	IUA	
					Valor	Clasificación
1111010201	0.009	0.004	0.005	0.001	0.972	Muy bajo
1111010401	0.033	0.017	0.016	0.002	1.617	Bajo
1111010601	0.040	0.020	0.020	0.005	0.009	Muy bajo
1111010602	0.078	0.037	0.041	0.002	0.010	Muy bajo
1111010701	0.023	0.012	0.011	0.001	0.288	Muy bajo
1111010702	0.024	0.012	0.012	0.002	0.286	Muy bajo
1111010801	0.046	0.021	0.025	0.004	0.002	Muy bajo
1111010802	0.100	0.049	0.051	0.014	0.002	Muy bajo
1111010901	0.011	0.006	0.006	0.001	1.182	Bajo
1111011601	0.722	0.364	0.358	0.043	0.862	Muy bajo





PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA RÍO SUCIO ALTO
FASE DE DIAGNÓSTICO

UAH-3	Oferta Total (m ³ /s)	Caudal Ambiental (m ³ /s)	Oferta Neta (m ³ /s)	DUT (m ³ /s)	IUA	
					Valor	Clasificación
1111012301	0.036	0.018	0.018	0.003	1.123	Bajo

Fuente: Elaboración propia

. A diferencia de la condición hidrológica año normal, se presenta un cambio en las UAH nivel 2 en el sector centro de la cuenca pasando a la categoría bajo, la oferta disminuye de tal forma que la demanda ejerce mayor presión en el recurso hídrico.

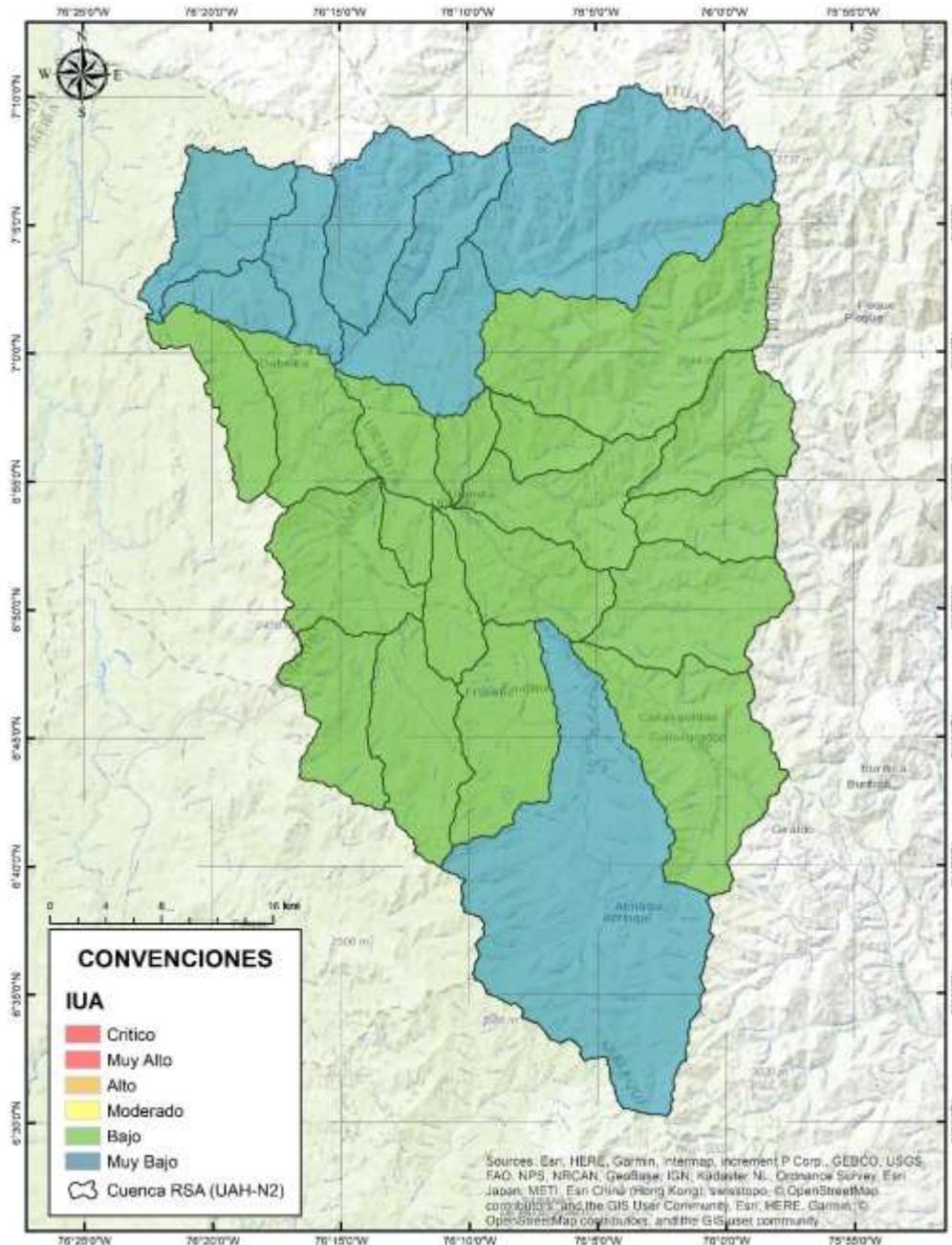
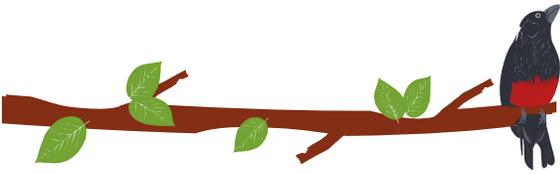


Figura 40 Índice de uso del agua (IUA) por UHN-2 Año seco. Elaboración propia





PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA RÍO SUCIO ALTO
FASE DE DIAGNÓSTICO

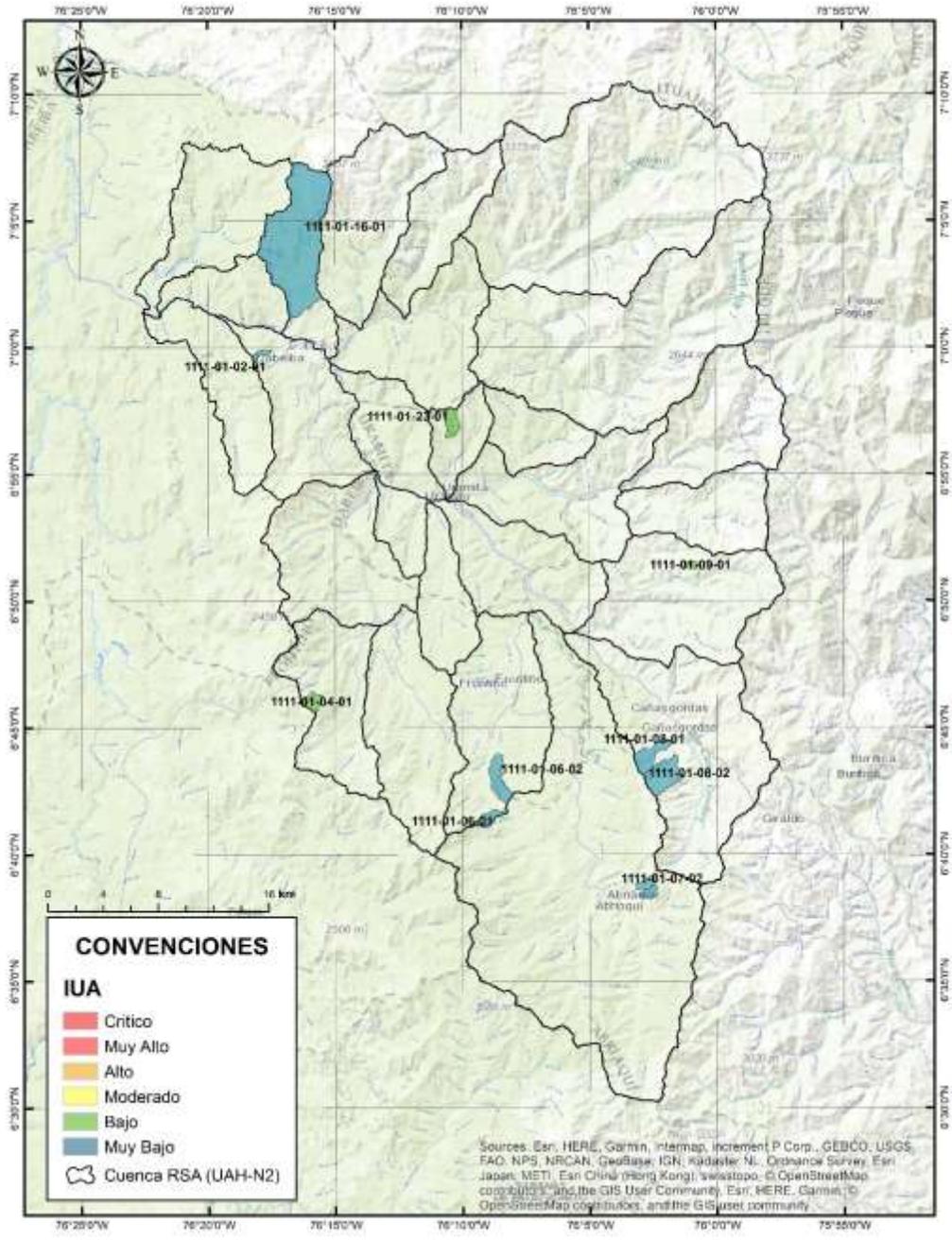
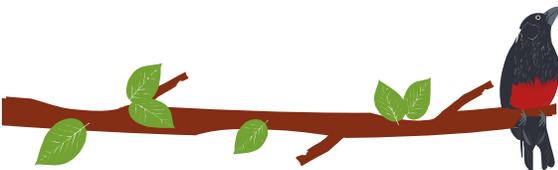


Figura 41 Índice de uso del agua (IUA) por UHN-3 Año seco. Elaboración propia





1.10.3 Índice de vulnerabilidad por desabastecimiento hídrico (IVH)

El IVH mide el grado de fragilidad del sistema ante eventos que puedan amenazar su capacidad para mantener la oferta hídrica. Se determina a partir de una matriz de decisión entre la relación de rangos entre los resultados del IRH y el IUA (IDEAM & MinAmbiente, 2015; MinAmbiente, 2014).

Tabla 56 Matriz de relación entre el IRH y el IUA para determinar el IVH UHN-1

Vulnerabilidad del Recurso Hídrico, relación IRH – IUA					
IUA Extremo = Porcentaje (Oferta/demanda)		Índice de regulación			
Rango	Categoría	Alta	Moderado	Baja	Muy Baja
<1	Muy bajo	Muy Baja	Baja	Media	Media
1-10	Bajo	Baja	Baja	Media	Media
10-20	Moderado	Media	Media	Alta	Alta
20-50	Alto	Media	Alta	Alta	Muy Alta
50-100	Muy Alto	Media	Alta	Alta	Muy Alta
>100	Critico	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta

Fuente: Elaboración propia a partir de (IDEAM & MinAmbiente, 2015)

1.10.3.1 Condición Hidrológica - Año Normal

En las Tabla 57, Tabla 58 y Tabla 59, se presenta el índice de vulnerabilidad por desabastecimiento hídrico para las diferentes unidades de análisis hidrológico nivel 1, nivel 2 y nivel 3, para la condición hidrológica – año normal en la Figura 42y Figura 43 se presenta la distribución espacial del indicador.

Tabla 57 Índice de vulnerabilidad por desabastecimiento hídrico UAH Nivel 1 año normal

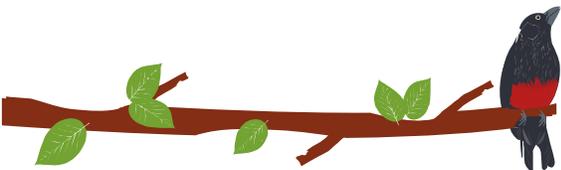
UAH	IRH	IUA	IVH
1111-010000	Alta	Muy bajo	Muy bajo

Fuente: Elaboración propia

Tabla 58 Índice de vulnerabilidad por desabastecimiento hídrico UAH Nivel 2 año normal

UAH	IRH	IUA	IVH
1111010100	Alta	Muy bajo	Muy bajo
1111010200	Alta	Muy bajo	Muy bajo
1111010300	Alta	Muy bajo	Muy bajo
1111010400	Alta	Muy bajo	Muy bajo
1111010500	Alta	Muy bajo	Muy bajo
1111010600	Alta	Muy bajo	Muy bajo
1111010700	Alta	Muy bajo	Muy bajo
1111010800	Alta	Muy bajo	Muy bajo
1111010900	Alta	Muy bajo	Muy bajo
1111011000	Alta	Muy bajo	Muy bajo
1111011100	Alta	Muy bajo	Muy bajo
1111011200	Alta	Muy bajo	Muy bajo
1111011300	Alta	Muy bajo	Muy bajo
1111011400	Alta	Muy bajo	Muy bajo
1111011500	Alta	Muy bajo	Muy bajo
1111011600	Alta	Muy bajo	Muy bajo
1111011700	Alta	Muy bajo	Muy bajo





PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA RÍO SUCIO ALTO
FASE DE DIAGNÓSTICO

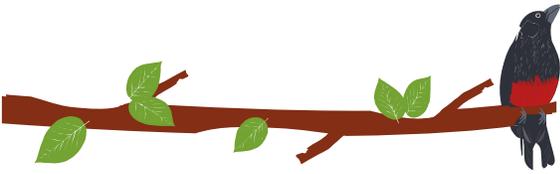
UAH	IRH	IUA	IVH
1111011800	Alta	Muy bajo	Muy bajo
1111011900	Alta	Muy bajo	Muy bajo
1111012000	Alta	Muy bajo	Muy bajo
1111012100	Alta	Muy bajo	Muy bajo
1111012200	Alta	Muy bajo	Muy bajo
1111012300	Alta	Muy bajo	Muy bajo
1111012400	Alta	Muy bajo	Muy bajo
1111012500	Alta	Muy bajo	Muy bajo
1111012600	Alta	Muy bajo	Muy bajo

Fuente: Elaboración propia

Tabla 59 Índice de vulnerabilidad por desabastecimiento hídrico UAH Nivel 3 año normal

UAH	IRH	IUA	IVH
1111010201	Alta	Muy bajo	Muy bajo
1111010401	Alta	Muy bajo	Muy bajo
1111010601	Alta	Muy bajo	Muy bajo
1111010602	Alta	Muy bajo	Muy bajo
1111010701	Alta	Muy bajo	Muy bajo
1111010702	Alta	Muy bajo	Muy bajo
1111010801	Alta	Muy bajo	Muy bajo
1111010802	Alta	Muy bajo	Muy bajo
1111010901	Alta	Muy bajo	Muy bajo
1111011601	Alta	Muy bajo	Muy bajo
1111012301	Alta	Muy bajo	Muy bajo





PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA RÍO SUCIO ALTO
FASE DE DIAGNÓSTICO

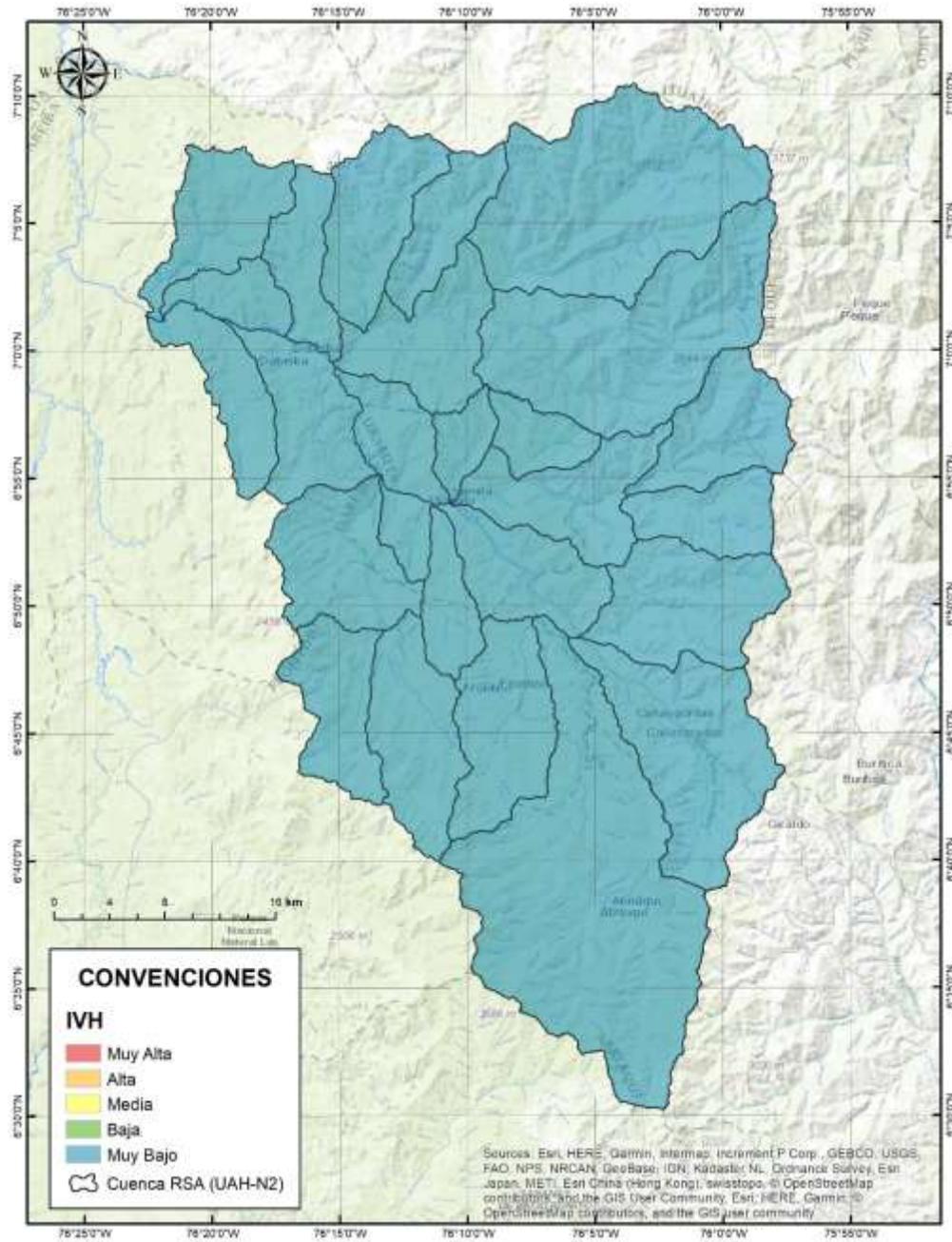
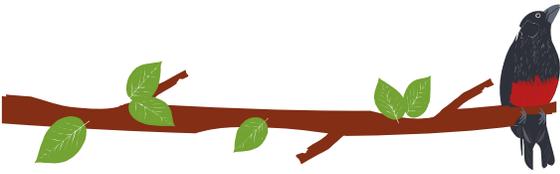


Figura 42 Índice de vulnerabilidad por desabastecimiento hídrico UAH Nivel 2 año normal. Elaboración propia





PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA RÍO SUCIO ALTO
FASE DE DIAGNÓSTICO

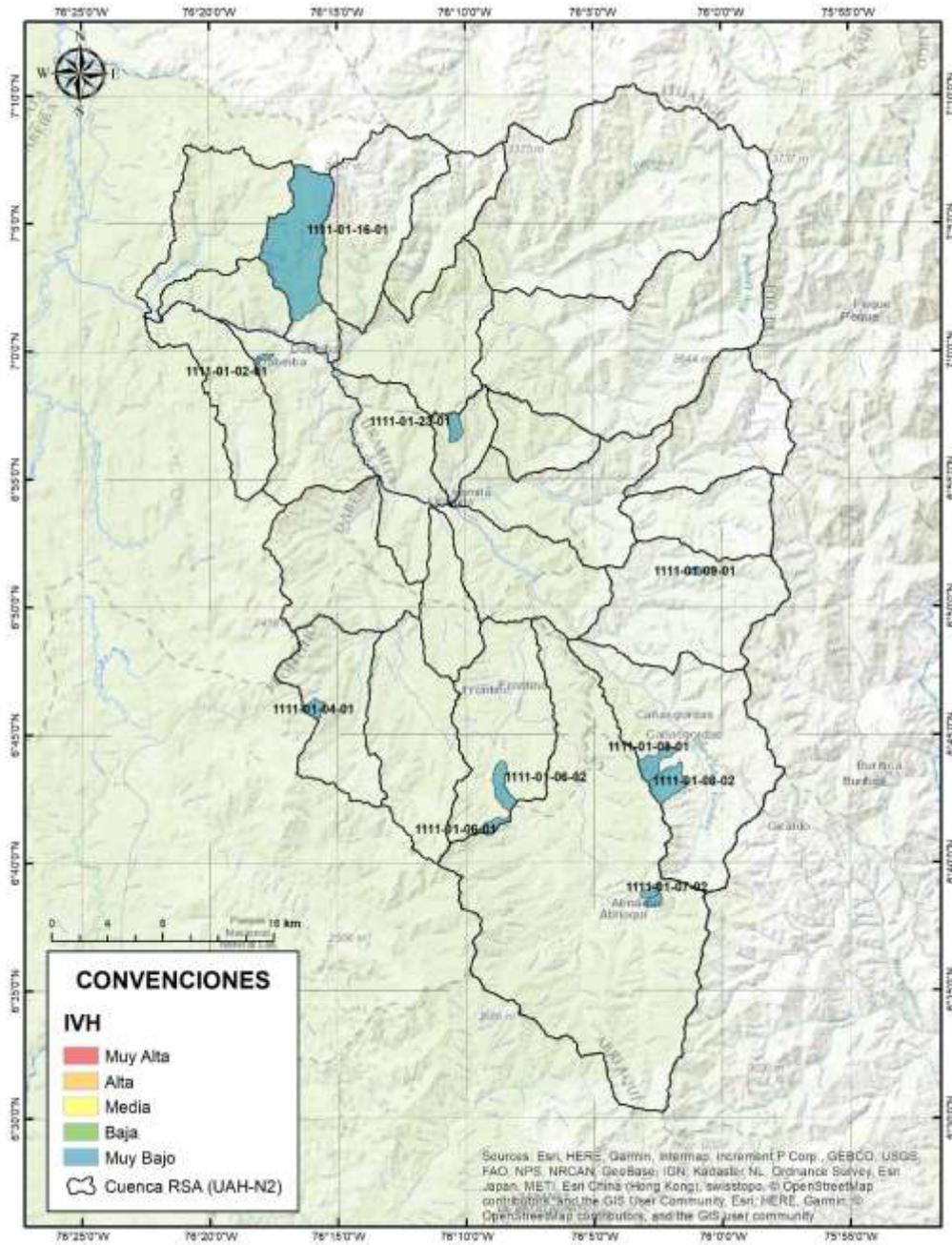
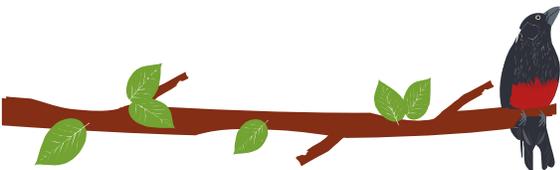


Figura 43 Índice de vulnerabilidad por desabastecimiento hídrico por UHN-3 año normal. Elaboración propia

1.10.3.2 Condición Hidrológica – Año seco





se presenta el índice de vulnerabilidad por desabastecimiento hídrico para las diferentes unidades de análisis hidrológico nivel 1, nivel 2 y nivel 3, para la condición hidrológica – año seco en la Figura 44 y Figura 45 se presenta la distribución espacial del indicador.

Tabla 60 Índice de vulnerabilidad por desabastecimiento hídrico UAH Nivel 1 año seco

UAH	IRH	IUA	IVH
1111-010000	Alta	Muy bajo	Muy bajo

Fuente: Elaboración propia

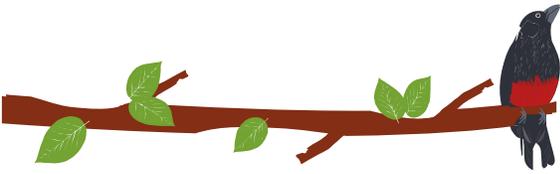
Tabla 61 Índice de vulnerabilidad por desabastecimiento hídrico UAH Nivel 2 año seco

UAH	IRH	IUA	IVH
1111010100	Alta	Bajo	Bajo
1111010200	Alta	Bajo	Bajo
1111010300	Alta	Bajo	Bajo
1111010400	Alta	Bajo	Bajo
1111010500	Alta	Bajo	Bajo
1111010600	Alta	Bajo	Bajo
1111010700	Alta	Muy bajo	Muy bajo
1111010800	Alta	Bajo	Bajo
1111010900	Alta	Bajo	Bajo
1111011000	Alta	Bajo	Bajo
1111011100	Alta	Bajo	Bajo
1111011200	Alta	Bajo	Bajo
1111011300	Alta	Muy bajo	Muy bajo
1111011400	Alta	Muy bajo	Muy bajo
1111011500	Alta	Muy bajo	Muy bajo
1111011600	Alta	Muy bajo	Muy bajo
1111011700	Alta	Muy bajo	Muy bajo
1111011800	Alta	Bajo	Bajo
1111011900	Alta	Bajo	Bajo
1111012000	Alta	Bajo	Bajo
1111012100	Alta	Bajo	Bajo
1111012200	Alta	Bajo	Bajo
1111012300	Alta	Bajo	Bajo
1111012400	Alta	Bajo	Bajo
1111012500	Alta	Muy bajo	Muy bajo
1111012600	Alta	Muy bajo	Muy bajo

Fuente: Elaboración propia

Tabla 62 Índice de vulnerabilidad por desabastecimiento hídrico UAH Nivel 3 año seco

UAH	IRH	IUA	IVH
1111010201	Alta	Muy bajo	Muy bajo
1111010401	Alta	Bajo	Bajo
1111010601	Alta	Muy bajo	Muy bajo
1111010602	Alta	Muy bajo	Muy bajo
1111010701	Alta	Muy bajo	Muy bajo
1111010702	Alta	Muy bajo	Muy bajo
1111010801	Alta	Muy bajo	Muy bajo
1111010802	Alta	Muy bajo	Muy bajo
1111010901	Alta	Bajo	Bajo



PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA RÍO SUCIO ALTO
FASE DE DIAGNÓSTICO

UAH	IRH	IUA	IVH
1111011601	Alta	Muy bajo	Muy bajo
1111012301	Alta	Bajo	Bajo

Fuente: Elaboración propia

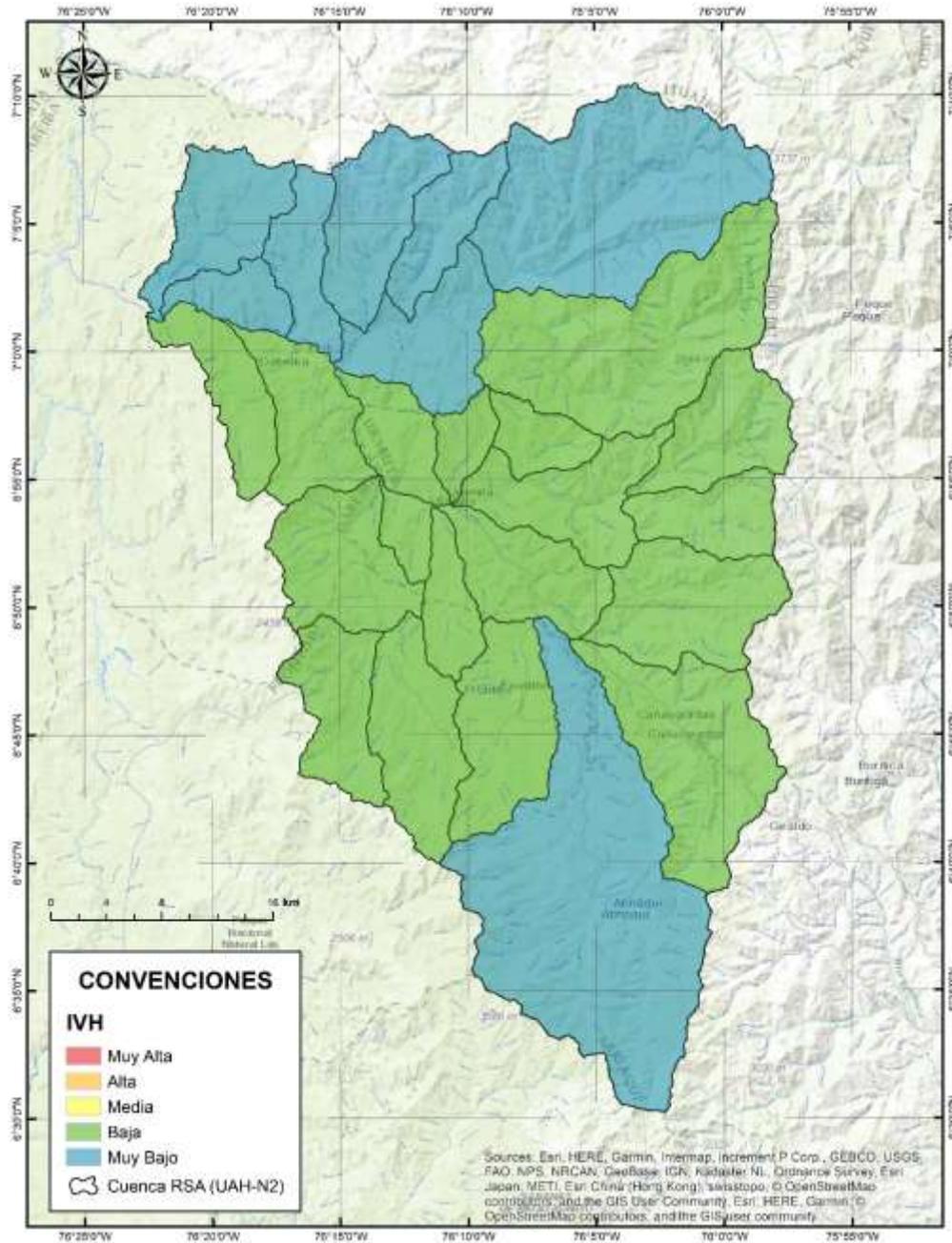
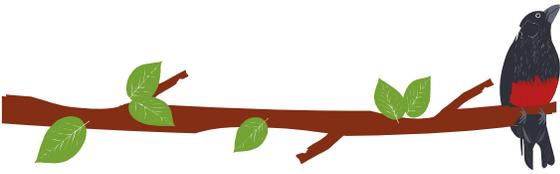


Figura 44 Índice de vulnerabilidad por desabastecimiento hídrico UAH Nivel 2 año seco. Elaboración propia





PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA RÍO SUCIO ALTO
FASE DE DIAGNÓSTICO

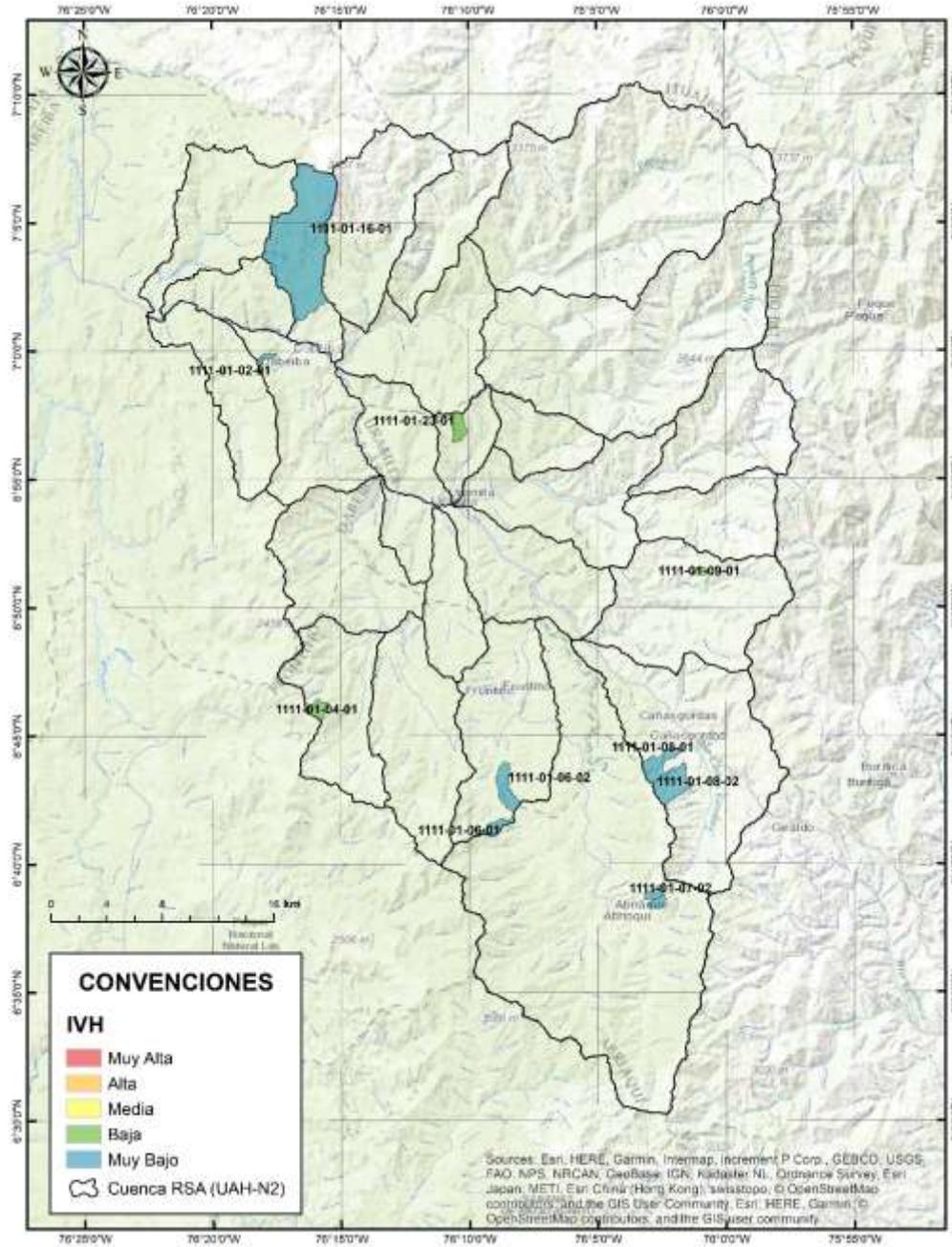
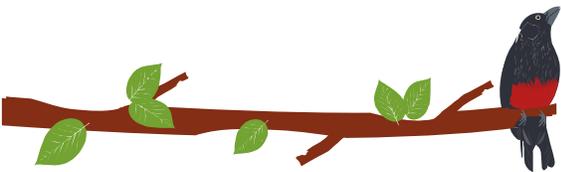


Figura 45 Índice de vulnerabilidad por desabastecimiento hídrico por UHN-3 año seco. Elaboración propia





La información recopilada junto con las metodologías aplicadas en este capítulo permitió establecer las características asociadas a la oferta hídrica en la cuenca de río Sucio Alto tanto en cantidad como en distribución espacio-temporal. Como resultado la cuenca presenta una oferta que supera significativamente las demandas contabilizadas en este estudio como se puede apreciar en los índices de uso y cuyo resultado con congruente con los publicado en el Estudio Nacional del Agua 2014. Es una cuenca que presenta excedentes significativos de agua dada la alta pluviosidad y la baja demanda ambiental por procesos de evapotranspiración. También, dada la alta capacidad de regulación en la cuenca y el bajo índice de uso, la vulnerabilidad de la cuenca es muy baja. Vale la pena resaltar que este tipo de unidades con su capacidad de regulación y oferta generosa prestan unos servicios importantes desde el punto de vista ecosistémico como por ejemplo la regulación de la oferta en condiciones de baja humedad para los sistemas hidrográficos ubicados aguas debajo de la cuenca río Sucio Alto y, por lo tanto, es importante mantener dichas condiciones.

Una de las mayores restricciones en la elaboración de este documento es la disponibilidad de información a la escala espacial y resolución temporal que exige este tipo de estudios, pues se pretende caracterizar unidades de orden 2 y 3 de acuerdo con el IDEAM soportándose básicamente en la red nacional de monitoreo que cumple otro tipo de propósitos pero que sin duda aporta información valiosa para la cuenca. Lo anterior se convierte en un hallazgo en el sentido que es necesario el reforzamiento de la red de monitoreo hidrológico basados en criterios de red óptima para la generación de más información que permita la captura de componentes de variabilidad a las escalas de las unidades hidrológicas nivel 2 y 3, de tal forma que se reduzca la incertidumbre en la caracterización hidroclimática y los rasgos de variabilidad en cada una de las unidades.

El reforzamiento de la red de monitoreo hidrometeorológico deberá seguir los elementos de diseño de red optima propuesto por Karasiov y Kagan (Kagan, 1966; Karasiov, 1968) las cuales, en función de la información histórica, ubicación, representatividad y nivel de error de la tecnología de monitoreo generan unidades hidrológicas (en el caso de la metodología de Karasiov) homogéneas con un nivel de incertidumbre conocido.

Un balance hídrico de alta resolución espacio temporal con mínima incertidumbre permitirá una adecuada gestión del recurso hídrico para el ordenamiento productivo sostenible de la región ya que será posible la evaluación de actividades productivas que involucren la afectación de la oferta hídrica en la cuenca del río Sucio.

Otro vacío importante es la ausencia de sistemas de monitoreo de la demanda de agua en las distintas regiones y por distintos tipos de usuario. Este vacío lo tienen, en general todas las corporaciones y el IDEAM mismo. Las experiencias de cálculo de la demanda de agua con base en los inventarios de usuarios adelantados por las CARs sugieren que la estimación de demanda según inventario de usuarios puede ser entre 2 y 3 veces mayor que la estimada por métodos indirectos de demanda potencial. No obstante, los inventarios de usuarios no están disponibles para todas las subzonas hidrológicas y usualmente no se mantienen actualizados en el tiempo. Lo que se propone para llenar este vacío es la consolidación de sistemas de monitoreo de la demanda de agua que tengan continuidad en tiempo y en espacio (UHN-2).

