

APOYO A LA CDMB EN EL DESARROLLO DE ACTIVIDADES PARA EL FUNCIONAMIENTO DE LA RED HIDROCLIMATOLÓGICA Y PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN, EN ESTACIONES LOCALIZADAS EN LA MICROCUENCA RÍO DE ORO ALTO

LAURA XIMENA GALVIS DURAN

Estudiante de ingeniería civil

Universidad Industrial de Santander

Lauris_0820@hotmail.com

RESUMEN

La Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga - CDMB, es la entidad ambiental encargada de administrar y monitorear los recursos naturales renovables en el área de su jurisdicción. Dentro de las actividades que se realizan en la entidad, se encuentra la administración de la red hidroclimatológica por parte del grupo de investigación y gestión del conocimiento, la cual está conformada por estaciones climatológicas e hidrométricas, que registran información del clima, y variación de niveles y caudales en las principales fuentes hídricas.

En este trabajo se muestra el análisis de información de variables hidroclimatológicas de las estaciones que la CDMB dispone dentro de la microcuenca Río de Oro Alto, considerando los datos de las estaciones vigentes y los registros históricos de estaciones ya suspendidas. Para el procesamiento y análisis de la información climatológica se establecieron series de tiempo y periodos de análisis comprendidos entre 2012 y junio de 2016. Los periodos se eligieron teniendo en cuenta el porcentaje de datos faltantes y los errores detectados en las mediciones por medio de gráficas. Posteriormente se obtuvieron valores mensuales de cada variable y se identificaron comportamientos en las mediciones. En cuanto a la información hidrométrica se realizaron curvas de calibración para El Rasgón a partir del año 2012, y se analizó el comportamiento de caudales y su relación con eventos de precipitación. Finalmente se determinó que los datos de aforos realizados para el año 2015 son dispersos y no se ajustan a una curva de calibración, lo cual puede estar asociado a las malas prácticas en la realización de aforos, colmatación de la estación por falta de mantenimiento o problemas de sección variable.

PALABRAS CLAVE: Clima, red hidroclimatológica, curva de calibración, aforos, caudales.

ABSTRACT

The Autonomous Regional Corporation for the Defense of the Bucaramanga Plateau - CDMB is the environmental agency responsible for managing and monitoring the renewable natural resources in the area of its jurisdiction. Among the activities carried out in the entity, is the administration of the hydro-climatological network by the research group and knowledge management, which consists of climatological and hydrometric stations that record weather information, changes in levels water flow in the main water sources.

This paper shows the analysis of hydro-climatological variables from stations that the CDMB has within the micro watershed Río de Oro Alto, taking into account information from current stations and historical records of suspended stations. For the analysis of the climatological and water flow information, time series and analysis periods between 2012 and June 2016 were established. The periods of analysis were chosen taking as a criterion the percentage of data missing and detected errors in measurements by means of graphs. Afterwards monthly values of each variable were obtained and behaviors identified in measurements. As for the hydrometric information, calibration curves for El Rasgón were made starting from 2012, and the flow behavior and its relationship with precipitation events were analyzed. Finally, it was determined that gauging data for 2015 are scattered and are not adjusted to a calibration curve, which may be associated with bad practices in conducting water gauging, silting of the station due to lack of maintenance or problems dealing with variable section.

KEYWORDS: climate, hydro-climatological network, calibration curve, gauging, water flow

1. INTRODUCCIÓN

El clima según la Organización Meteorológica Mundial, OMM, es el conjunto de cambios en las condiciones atmosféricas, el cual está determinado por las variaciones y evoluciones del estado del tiempo, durante un periodo de tiempo, en un lugar o región dada [1]. En Colombia el clima es determinado por los aspectos geográficos y atmosféricos, y para estudiarlo es necesario conocer los elementos climáticos (temperatura, precipitación, viento, humedad, entre otros) y los factores climáticos (altitud, latitud y continentalidad) [2]. En el país, existen autoridades ambientales que se encargan del monitoreo, análisis y predicción o estudio hidroclimatológico, enfocado a variables hidrológicas y climáticas, que permiten conocer y respaldar principalmente al estudio de las lluvias, como es el comportamiento de las mismas, y las implicaciones en materia de riesgo por eventos extremos.

La Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga, CDMB, es la entidad ambiental que se encarga de la gestión y conservación del medioambiente y los recursos naturales renovables en el área de su jurisdicción, conformada por 13 municipios que abarcan una extensión aproximada de 4.520 Km y cuya altitud varía entre 35 a 3940 msnm [3].

Para el estudio del clima y el recurso hídrico, la CDMB cuenta con una red hidroclimatológica en donde se monitorea los diferentes niveles de caudales en las principales corrientes y se operan las estaciones climatológicas. El proceso de recolección y análisis de datos de la red de monitoreo tiene como finalidad mostrar información que describa con precisión las condiciones hidroclimáticas, las cuales requiere de una medición continua en todas las estaciones.

En este proyecto se realizó el procesamiento de la información hidroclimatológica disponible para la microcuenca Río de Oro Alto, y se analizó el comportamiento de variables climatológicas y caudales dentro de un periodo de tiempo definido. Los periodos se eligieron teniendo como criterio el porcentaje de datos faltantes y los errores detectados en las mediciones por medio de gráficas. Para los datos de precipitación, se analizaron todos los registros obtenidos durante el tiempo de funcionamiento de cada estación, sin embargo, para las demás variables

climatológicas: en la estación de El Rasgón se analizó los datos del 2014, para la estación de Sevilla los datos del 2012 y para la estación El Pajonal los datos dentro del periodo de abril 2012 y junio 2013. Finalmente, los datos de la curva de calibración y el análisis de caudales comprenden el periodo desde el año 2012 hasta junio de 2016.

2. ÁREA DE ESTUDIO

La microcuenca Río de Oro Alto se localiza en el municipio de Piedecuesta, ubicada al suroriente del área de jurisdicción de la CDMB en el departamento de Santander, con una extensión aproximada de 14.274 hectáreas que van hasta el punto de confluencia con el Río Lato; la limitan al norte las subcuencas del Río Suratá y Río Chitagá, al Oriente con la Subcuenca Río Umpalá, al Occidente con la microcuenca Río Lato y al sur con la microcuenca Río de Oro Medio y subcuenca Sogamoso Alto [4].

La microcuenca Río de Oro Alto posee altitudes que van de los 800 a los 3.500 msnm, por lo que se presentan climas que varían desde el muy frío, moderadamente húmedo, hasta el templado semihúmedo, presentándose los valores más altos de humedad en la parte media alta de la microcuenca en la vereda Cristales del municipio de Piedecuesta.

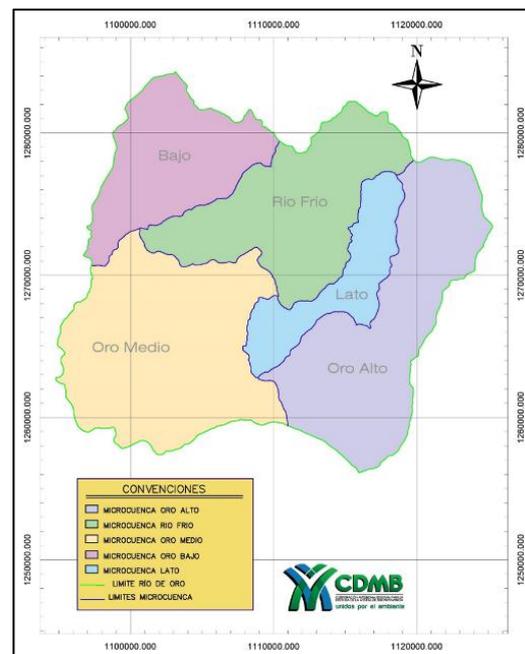


Figura 1. División de la cuenca del Río de Oro

Fuente: Subdirección de ordenamiento y planificación integral del territorio - SOPIT

El cauce principal es el Río de Oro, el cual nace a una altura aproximada de 3500 msnm,

resaltándose como referencia importante en la divisoria de aguas, el sector conocido como El Picacho. Sus principales afluentes son la Quebrada El Rasgón, Quebrada Sevilla y Quebrada La Grande.

La microcuenca Río de Oro Alto junto con las microcuencas Oro Medio, Oro Bajo, Río Frio y Río Lato, hacen parte de la subcuenca Río de Oro (Figura 1), la cual alcanza un área aproximada de 56.942,18 hectáreas, que circunscriben parcialmente a los municipios de Piedecuesta, Girón y Bucaramanga y a la totalidad del municipio de Floridablanca, constituyéndose como el área de mayor oferta de recursos y servicios ambientales para el área metropolitana de Bucaramanga.

3. RED HIDROCLIMATOLÓGICA CDMB

3.1 Descripción

En la microcuenca Río de Oro Alto, se tiene una estación climatológica y una estación de niveles ambas automáticas en el sector conocido como El Rasgón, además se cuenta con tres puntos de monitoreo en los que se realizan aforos (El Rasgón, Conquistador y Villa Paulina). En la figura 2 se observa el mapa de la red hidroclicmatológica en la microcuenca Río de Oro Alto, con los puntos de monitoreo existentes y las estaciones climatológicas activas y suspendidas (Sevilla y Pajonal).

3.2 Estaciones climatológicas

La información correspondiente a las estaciones climatológicas de la CDMB que han existido y existen dentro de la microcuenca Río de Oro Alto se muestran en la tabla 1.

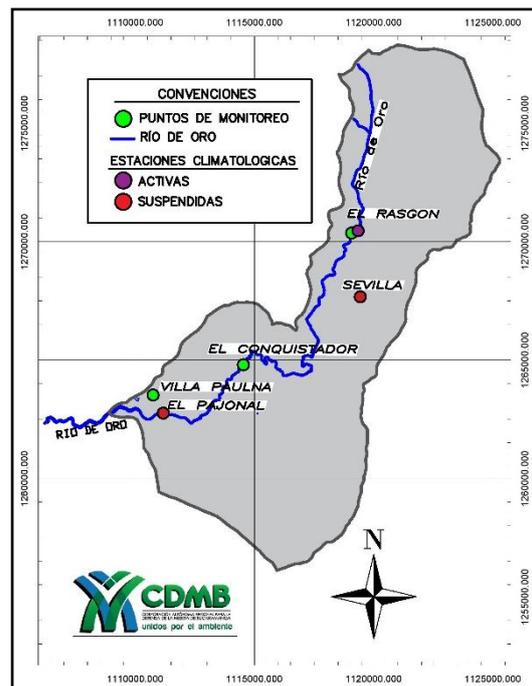


Figura 2. Red hidroclicmatológica de la microcuenca Río de Oro Alto

Fuente: Subdirección de ordenamiento y planificación integral del territorio - SOPIT

3.2.1 Equipos de medición

Las estaciones climatológicas que posee la CDMB, son de tipo Wireless Davis Vantage PRO2, las cuales poseen varios sensores integrados que realizan la captura y almacenamiento de información de las variables climatológicas cada hora. Estas estaciones permiten la transmisión inalámbrica a una distancia de hasta 300 metros, con una capacidad de almacenamiento de 2560 registros, alcanzando su límite aproximadamente a las 14 semanas después de su última descarga. Los instrumentos que conforman la estación Davis son principalmente el pluviógrafo, el conjunto de sensores, el anemómetro y la veleta, la consola, el datalogger, el panel solar, entre otros.

Tabla 1. Estaciones climatológicas microcuenca Río de Oro Alto – CDMB

ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS								
Cód.	Nombre	Tipo de estación		Coordenadas		Altitud (m.s.n.m.)	Inicio de operación	Fecha de suspensión
				Norte	Este			
50	El Rasgón	CO*	Análogas	1.270.294	1.119.913	2185	Enero de 1987	Diciembre de 2010
49	Sevilla	PM**	Análogas	1.267.670	1.119.427	1840	Julio de 1981	Octubre de 2006
23	El Rasgón	Automática	Automática	1.270.464	1.119.338	2148	Septiembre de 2013	activa
13	Sevilla	Automática	Automática	1.267.670	1.119.428	1907	Enero de 2011	Septiembre de 2013
20	Pajonal	Automática	Automática	1.262.749	1.111.178	896	Marzo de 2012	Marzo de 2015

*CO: Climatológica ordinaria **PM: Pluviómetro

Tabla 2. Estaciones hidrométricas microcuenca Río de Oro Alto – CDMB

ESTACIONES HIDROMÉTRICAS Y PUNTOS DE MONITOREO								
Cód.	Nombre	Tipo	Corriente	Coordenadas		Altitud (m.s.n.m.)	Inicio de operación	Fecha de suspensión
				Norte	Este			
RO - 06	El Rasgón	Automática de niveles	Río de Oro	1.270.358	1.119.062	2141	Abril de 2012	activa
RO - 06	El Rasgón	LM*-PMo**	Río de Oro	1.270.358	1.119.062	2141	Marzo de 2004	2012
RO - 05	Conquistador	PMo**	Río de Oro	1.114.531	1.264.794	1053	-	activa
SO - 01	Villa Paulina	PMo**	Quebrada Soratoque	1.110.752	1.263.519	910	Mayo de 2002	activa

*LM: Limnómetro **PMo: punto de monitoreo

3.3 Estaciones hidrométricas

En la microcuenca Río de Oro Alto, existen tres puntos de monitoreo (tabla 2), donde se realizan los aforos y toma de muestras para el análisis de calidad y cantidad. Por otro lado, se tiene la estación automática de niveles (figura 3), la cual registra temperatura y presiones absolutas y barométricas, cada cinco minutos.

3.3.1 Instrumentos y equipos de medición

Las estaciones que conforman la red de cantidad de agua de la CDMB, son miras limnimétricas y una estación automática de niveles que se observa en la figura 3.



Figura 3. Estación automática de niveles y mira del Rasgón

La mira limnimétrica es una regla escalada, que se empotra sobre listones de madera, estructuras de acero, estructuras de concreto o taludes del cauce, y la estación automática de niveles es una estación conformada por: el Mini-Diver y Baro-

Diver, sensores que capturan información de temperatura y presiones absolutas y barométricas [5]; el tubo limnimétrico que actúa como protección de los sensores y provee el medio necesario para las mediciones; el dispositivo USB Diver que se utiliza para la transmisión de datos almacenados por los sensores, y por último el software Diver Office, diseñado para el intercambio de datos Diver, permitiendo descargar y compensar los datos del Diver y el Baro-Diver en un computador, exportarlos a un programa de hojas de cálculo y visualizar el comportamiento de los niveles, temperatura y presiones barométricas en la interfaz del programa.

4. METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Para el análisis de la información hidroclimatológica que la CDMB dispone de la microcuenca Río de Oro Alto, se realizó el proceso que se ilustra en la Figura 4.



Figura 4. Estructura general de la metodología.

4.1 Consulta y disposición de la información

La CDMB pone a disposición de la red hidroclimatológica, dispositivos, herramientas y aplicativos, que ayudan en el desarrollo de las

actividades de las redes de monitoreo (figura 5), permitiendo que la información capturada en campo, sea almacenada en el sistema de información corporativo -SIC, y en los equipos de la red.



Figura 5. Procesamiento de la información climatológica

La información hidrométrica se obtiene de la realización de aforos y registros de la estación automática de niveles.

4.2 Procedimiento para el análisis de datos faltantes

En el proceso de depuración de datos (figura 5), se completa la serie con un valor negativo (-999) establecido por la CDMB cuando se presenta ausencia de datos en los registros, con el fin de hacer notoria la existencia de un dato faltante. Posteriormente se aplicó la ecuación (1) para determinar el porcentaje de datos faltantes para cada año de registros de cada una de las variables.

$$\%DF = \left(1 - \frac{DR-DT}{DT}\right) \times 100 \quad (1)$$

Donde:

DF: Datos faltantes

DR: Datos registrados

DT: Datos totales que deben ser registrados

Finalmente se compara el porcentaje de datos faltantes de cada año para establecer el periodo de análisis de las variables. No obstante, se grafican los datos para identificar irregularidades en el comportamiento de las variables, producto de errores en la medición.

4.3 Errores en la adquisición de datos

La existencia de datos faltantes en un porcentaje alto o la obtención de series incompletas es producto de un número de acontecimientos que

impiden la medición correcta o completa de la información, tales como:

- Daño de los sensores
- Fallas en el suministro eléctrico
- La estación alcanza el límite de capacidad de almacenamiento
- Falta de calibración y mantenimiento
- Daños en el cableado de la consola

4.4 Procedimiento para el análisis de las variables climatológicas

Para realizar el análisis de las variables climatológicas se escogieron siete de las nueve que los equipos de la CDMB reportan. A continuación, se describe brevemente el procedimiento que se realiza en el análisis de cada variable.

4.4.1 Radiación solar

La radiación diaria se determinó sumando los registros horarios. Los datos diarios fueron promediados para los meses involucrados, teniendo como resultado la radiación media mensual en W/m². Seguidamente, se compararon resultados con el promedio multianual de radiación solar global determinado por el IDEAM.

4.4.2 Índice UV

Los valores de índice UV que se utilizaron para este análisis, son los referentes al máximo valor horario que se presentó en el día, tomando como referencia los rangos de categorías de exposición que se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Categoría de exposición radiación UV

CATEGORÍA DE EXPOSICIÓN	INTERVALO DE VALORES DEL IUUV
BAJA	< 2
MEDERADA	3 A 5
ALTA	6 A 7
MUY ALTA	8 A 10
EXTREMADAMENTE ALTA	11+

Fuente: índice UV solar mundial guía práctica - WHO

4.4.3 Temperatura

El análisis de la temperatura media máxima y mínima, representan los valores extremos que se registran durante el día. La temperatura promedio se utilizó para estimar la temperatura del día y para determinar la temperatura media mensual.

Para tener una percepción más clara de la variabilidad de la temperatura en los periodos de análisis de cada estación, se realizó el histograma de frecuencia de temperatura horaria y se determinaron variables estadísticas de interés.

4.4.4 Humedad relativa

La humedad relativa se analizó promediando los registros horarios recopilados por la estación automática. Posteriormente se determinó la media mensual para cada año de registro y se compararon los resultados con la humedad relativa media anual determinada entre 1981-2010 por el IDEAM.

4.4.5 Velocidad y dirección del viento

En el análisis e interpretación de la información del viento, se tiene en cuenta la velocidad con que este se desplaza y la dirección hacia donde se transporta, para su representación se creó la gráfica de la rosa de los vientos, la cual permite incorporar simultáneamente la relación que existe entre las características que componen el viento en un periodo de tiempo determinado.

Para el análisis de datos de vientos, se utilizó el software WRPLOT View, el cual es un programa que grafica rosas de vientos y permite hacer el análisis de distribución de frecuencia a los datos.

4.4.6 Precipitación

La información que se encontró para el análisis de la precipitación, proviene de las estaciones análogas y las estaciones automáticas. Los registros obtenidos por las estaciones análogas fueron de utilidad para determinar el ciclo anual de lluvias de la zona. Por último, con la información recopilada por las estaciones climatológicas automáticas se realizó un análisis de intensidades para cada estación y el comportamiento de los datos mensuales para cada año.

- Ciclo anual de lluvias: se estableció promediando los valores de precipitación mensual de todos los años de registro para cada mes, obteniendo un promedio multianual en cada uno de los 12 meses del año y el comportamiento anual de la lluvia en la zona de estudio.
- La intensidad de lluvia: se define como el volumen de precipitación por unidad de

tiempo (mm/hr). Para este análisis se identificaron los eventos de lluvia registrados por las estaciones automáticas en intervalos de una hora, y se clasificaron los eventos según los rangos de intensidades definidos en la tabla 4.

Tabla 4. Clasificación de la intensidad de lluvia

INTENSIDAD	RANGO [mm/hr]
Débil	Menor a 2
Moderado	Entre 2.1 y 15
Fuerte	Entre 15.1 y 30
Muy fuerte	Entre 30.1 y 60
Torrencial	Mayor a 60

Fuente: Instituto nacional de meteorología de España - INM

- Precipitación mensual y máxima mensual de 24 horas: es la suma de los acumulados diarios y el valor máximo registrado en las 24 horas para cada mes, respectivamente.

4.5 Procedimiento para el análisis de la información hidrométrica

Para la información hidrométrica se analizó el comportamiento de los niveles registrado por la estación automática. Así mismo, se determinó la curva de calibración con la información de aforos y niveles disponibles del Rasgón. Por último, se hallaron los caudales utilizando la curva de calibración ya mencionada y se analizó el comportamiento de caudales y su relación con eventos de precipitación.

4.5.1 Curva de calibración

Una curva de calibración es la representación gráfica de las variaciones de las descargas en la sección transversal de un río, en función de las lecturas de miras limnimétricas [6].

Para la elaboración de la curva de calibración se analizaron los aforos realizados en El Rasgón a partir del año 2012, y los niveles de la estación automática.

En la elaboración de la curva se utilizó el método logarítmico propuesto en la guía de métodos para elaborar curvas de calibración de cauces aluviales del IDEAM, el cual se basa en la ecuación (2), en donde Q representa el caudal, c y n son constantes, H y Ho corresponden a el nivel medio de la mira y el nivel cuando el caudal es cero respectivamente.

$$Q = C \times (H - H_0)^n \quad (2)$$

La ecuación anterior se puede expresar como la ecuación (3), la cual representa una recta con pendiente n e intercepto $\ln(c)$.

$$\ln(Q) = \ln(c) + n * \ln(H - H_0) \quad (3)$$

Siendo la ecuación (3) una recta, se calculan las constantes c y n utilizando el método de mínimos cuadrados, el cual se basa en las ecuaciones (4) y (5), en donde N representa el número de datos utilizados en la curva de calibración.

$$n = \frac{N [\sum(H-H_0) \times Q] - [\sum(H-H_0)] \times [\sum Q]}{N \sum(H-H_0)^2 - [\sum(H-H_0)]^2} \quad (4)$$

$$c = \frac{[\sum Q] - n[\sum(H-H_0)]}{N} \quad (5)$$

4.5.2 Caudales

Con la curva de calibración que se obtiene con el procedimiento anterior y los niveles registrados por la estación automática, se procede a calcular los caudales y analizar el comportamiento e identificación de eventos máximos instantáneos.

El caudal medio mensual se determinó hallando la media aritmética de los caudales promedios diarios para cada mes.

4.5.3 Relación caudales y precipitación

El caudal de un río está directamente relacionado con eventos de lluvia, los cuales dan lugar a la ocurrencia de caudales instantáneos. Para identificar la relación que existe entre los eventos de lluvias y el comportamiento de caudales en un momento dado, se graficaron los valores de

precipitación diaria y caudales diarios simultáneamente.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 Información climatológica disponible

En el proceso de búsqueda de la información, se encontró que la CDMB cuenta con registros históricos de estaciones suspendidas y una estación activa (El Rasgón). La información disponible de las estaciones climatológicas se muestra en la tabla 5.

5.2 Información hidrométrica disponible

En la microcuenca Río de Oro Alto la CDMB tiene miras limnimétricas instaladas, pero en ellas no se realiza lectura de niveles ni aforos, por lo cual no se tuvieron en cuenta para este análisis. Por otro, lado se tienen tres puntos de monitoreo en el cauce principal del Río de Oro y en la quebrada Soratoque en los que se realizan varios aforos cada año, sin embargo, para el análisis de caudales se utilizó únicamente la información de aforos y niveles de la estación automática del Rasgón. La información disponible de las estaciones hidrométricas se muestra en la tabla 6.

Los aforos se realizan en largos periodos de tiempo con el fin de que estos se ajusten a la realidad, presentando caudales mínimos y máximos dentro de las mediciones, y de esta manera, la curva de calibración se ajuste más al comportamiento verdadero del cauce. En la tabla 7 se muestra el número de aforos realizados en cada punto de monitoreo desde el 2012 hasta junio de 2016.

Tabla 5. Información climatológica disponible.

ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS						
Cód.	Nombre	Tipo de estación	Información disponible		Disponibilidad de datos	
			Periodicidad	datos	Desde	Hasta
50	El Rasgón	**CO - Análogas	Diarios	precipitación	Enero 1987	Diciembre 2010
49	Sevilla	***PM - Análogas	Diarios	precipitación	Enero 1981	Diciembre 2009
23	El Rasgón	Automática	Horarios	*9 variables	Septiembre 2013	junio 2016
13	Sevilla	Automática	Horarios	*9 variables	Enero 2011	Septiembre 2013
20	Pajonal	Automática	Horarios	*9 variables	Marzo 2012	marzo 2015

* 9 variables: Precipitación, temperatura, radiación solar, índice UV, índice de calor, presión atmosférica, velocidad y dirección del viento **CO: Climatológica ordinaria ***PM: Pluviómetro

Tabla 6. Información hidrométrica disponible

ESTACIONES HIDROMÉTRICAS Y PUNTOS DE MONITOREO				
Cód.	Nombre	Tipo de estación	Información	Disponibilidad

			Intervalo	Datos	Desde	Hasta
RO – 06	El rasgón	Automática de niveles	Cada 5 minutos	Niveles	mayo 2012	agosto 2016
RO – 06	El rasgón	LM* - PMo**	No definida	Aforos	Septiembre 1985	Junio de 2016
RO – 05	Conquistador	PMo**	No definida	Aforos	Enero 1997	Noviembre 2015
SO – 01	Villa paulina	PMo**	No definida	Aforos	Enero 1997	Noviembre 2015

*LM: Limnómetro **PMo: Punto de monitoreo

Los aforos son realizados por funcionarios de la CDMB, quienes hacen entre 3 y 5 aforos en el segundo semestre del año, y las fechas de realización obedecen más a la programación administrativa de la entidad que a la ocurrencia de épocas lluviosas y secas.

Tabla 7. Numero de aforos Rasgón 2012-2016

ESTACIÓN	AÑO				
	2012	2013	2014	2015	2016
El Rasgón	3	2	3	5	1
Villa Paulina	1	2	3	5	1
Conquistador	0	1	3	5	1

5.3 Análisis de datos faltantes

El porcentaje de datos faltantes de cada estación por año se muestra en el anexo 1. En la tabla 8 se muestran los resultados del análisis de datos faltantes por cada variable en el tiempo de registro disponible de cada estación, cabe resaltar que este análisis se realizó a partir de los datos horarios recolectados por la Davis.

Tabla 8. Porcentaje de datos faltantes totales de cada variable por estación.

Estaciones	El Rasgón	Pajonal	Sevilla
Periodo	2013-2016	2012-2015	2011-2013
Temp	15%	15%	5.8%
Humr	15%	24%	5.8%
Dirv	15%	15%	10.4%
Velv	15%	15%	10.4%
Inca	15%	15%	5.8%
Pres	15%	15%	5.8%
Prec	15%	15%	5.8%
Rads	15%	15%	5.8%
Inuv	15%	15%	5.8%

La estación climatológica de El Rasgón en el año 2015 presentó un 16,83% de datos faltantes, que en su mayoría corresponden a los últimos meses del año. En 2016 se perdió información de los tres primeros meses que corresponden al 51% de los datos totales registrados hasta el mes de junio. Para la estación de Pajonal el porcentaje de datos faltantes más alto se presentó en el año 2014, en el primer semestre del año con un 36.8% y el año 2015 no se presentaron registros de humedad relativa por daños en el sensor. La estación de Sevilla en el año 2011 no presentó registros del

mes de junio en su totalidad lo que representa un 19.2% de los datos para ese año.

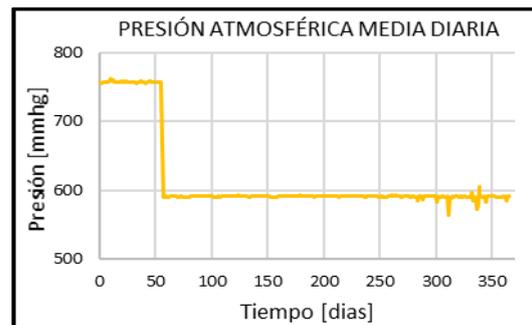


Figura 6. Errores de mediciones de presión.

Por otra parte, se realizaron graficas de los registros diarios para identificar errores en las mediciones como se muestra en la figura 6.

5.4 Análisis de variables climatológicas

Terminado el análisis de datos faltantes y verificación grafica de las mediciones, se determinó el periodo de tiempo que se va a analizar para cada variable en cada estación. En la tabla 9 se muestran los periodos de análisis elegidos para las estaciones automáticas. Las estaciones análogas se analizaron los datos en su totalidad.

Tabla 9. Periodos de análisis para variables climatológicas

Variable	ESTACIÓN		
	El Rasgón	Sevilla	Pajonal
TEMP	2014	2012	Abr 2012 -jun2013
PRECIP	2013-2016	2011- 2013	2012-2015
HUMR	2014	2012	Abr 2012 -jun2013
INDUV	2014	2012	2013
RADS	2014	2012	Abr 2012 -jun2013
DIRV	2014	2012	Abr 2012 -jun2013
VELV	2014	2012	Abr 2012 -jun2013

5.4.1 Radiación solar

En la tabla 10 se presentan los resultados del análisis de la radiación solar de cada estación, para los periodos definidos en la tabla 9. En el anexo 2 se muestran los resultados gráficos de la radiación solar.

Tabla 10. Radiación solar media mensual

RADIACIÓN SOLAR MEDIA MENSUAL EN W/m ²				
MES	SEVILLA 2012	PAJONAL		RASGÓN 2014
		2012	2013	
ENE	4055	-	3545	3984
FEB	4477	-	3635	4132
MAR	4050	-	3947	3938
ABR	3866	4587	4401	3487
MAY	3897	4541	4376	3342
JUN	4098	4841	4536	3001
JUL	3995	4518	-	3082
AGO	3902	4857	-	3344
SEP	4462	4810	-	3734
OCT	4182	4049	-	3178
NOV	4175	3553	-	3263
DIC	3881	3415	-	3984
MEDIA	4087	4352	4073	3539
MAX	4477	4857	4536	4132
MIN	3866	3415	3545	3001

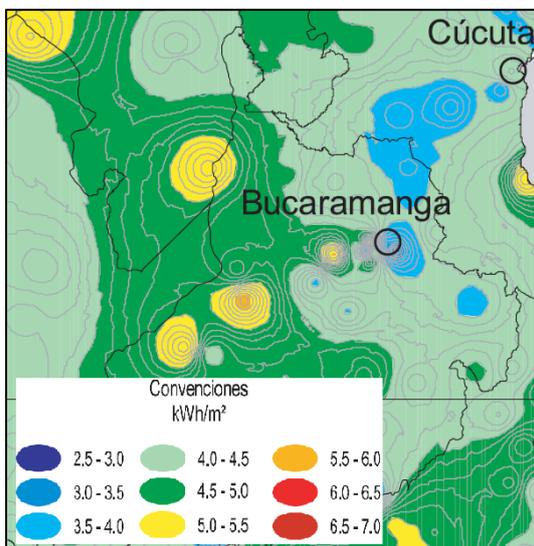


Figura 7. Promedio multianual de Radiación solar global. Fuente: IDEAM

Los valores de radiación solar global para la región según determinaciones del IDEAM oscilan entre 3 y 5 kW/m² como se puede apreciar en la figura 7, ratificando los resultados presentados en la tabla 10. De esta manera, se concluye que para las estaciones de estudio la media mensual de radiación global se encuentra entre los 3.5 y 4.5 kW/m².

5.4.2 Índice UV

El índice UV es una medida sencilla de la intensidad de la radiación UV en la superficie terrestre y un indicador de su capacidad de producir lesiones cutáneas [7].

Tabla 11. Índice UV máximo mensual

Mes	EL RASGÓN	PAJONAL	SEVILLA
-----	-----------	---------	---------

	Max	Media	Max	Media	Max	Media
ENE	9	7	8	5	12	9
FEB	10	8	10	7	13	10
MAR	11	8	10	7	14	10
ABR	12	8	10	7	14	10
MAY	11	7	10	7	14	9
JUN	10	7	8	6	11	8
JUL	11	7	DF*	DF*	11	8
AGO	12	7	9	7	12	9
SEPT	11	8	10	7	13	10
OCT	10	7	9	6	13	9
NOV	10	7	DF*	DF*	12	9
DIC	10	7	4	3	11	8

*DF: dato faltante **Max: máximo absoluto ***Media: valor medio de los máximos diarios.

De los resultados gráficos del análisis del índice UV mostrados en el anexo 3 y la tabla 11, se observan registros de valores de índice UV considerablemente altos (un gran porcentaje de los días presento valores por encima de la categoría alta). En el caso de la estación de Sevilla se presenta una situación crítica, en donde el 92% de los datos están por encima de la categoría alta de exposición y para la estación pajonal un poco más del 50% se encuentran por encima de este rango.

5.4.3 Temperatura del aire

Para tener una percepción más clara de la variabilidad de la temperatura en los periodos de análisis de cada estación, se muestran en el anexo 4, los histogramas de frecuencia de temperatura horaria y en la tabla 12 se presentan algunas variables estadísticas de interés.

Tabla 12. Variables estadísticas

Variables estadísticas	El Rasgón 2014	Sevilla 2012	Pajonal abril 2012 - junio 2013
mínimo	8 °C	11 °C	13 °C
máximo	23 °C	26 °C	33 °C
media	15.6 °C	17.4 °C	23.2 °C
mediana	15.3 °C	16.7 °C	22.1 °C
Total de datos	8,760	8,171	11,025

Por otra parte, en el anexo 4 se encuentran las gráficas de temperatura media mensual, en las que se observa que la estación El Rasgón en el año 2014 la temperatura media mensual varía entre los 15 °C y 16 °C durante todo el año. En Sevilla la temperatura media mensual oscilo entre los 17°C y 18°C. Para Pajonal la temperatura media mensual se mantuvo entre los 22.5°C y 23.3°C en

el año 2012 y para la primera mitad del año 2013 la temperatura media aumentó hasta los 24°C.

5.4.5 Humedad relativa

En el análisis de humedad relativa se tomó como referencia los valores de humedad media anual entre 65% y 90%, para el periodo comprendido entre 1981 y 2010 determinados por estudios del IDEAM, como se evidencia en la figura 8.

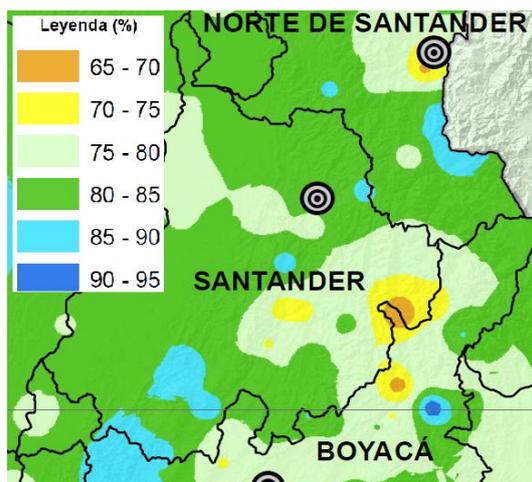


Figura 8. Humedad relativa media anual – promedio multianual 1981-2010. Fuente: IDEAM

Tabla 13. Humedad relativa media mensual

MES	HUMEDAD RELATIVA MEDIA MENSUAL [%]			
	SEVILLA 2012	PAJONAL		RASGÓN 2014
		2012	2013	
ENE	90	-	82	92
FEB	87	-	87	91
MAR	89	-	86	92
ABR	92	87	84	93
MAY	91	87	87	94
JUN	89	84	85	93
JUL	89	83	-	91
AGO	91	85	-	92
SEP	88	84	-	92
OCT	91	87	-	94
NOV	90	87	-	95
DIC	90	87	-	92
MEDIA	90	86	85	92
MAX	92	87	87	95
MIN	87	83	82	91

Los resultados gráficos de humedad relativa se muestran en el anexo 5. Con base a las gráficas y la tabla 13 se puede afirmar que la humedad relativa media mensual para la estación El Rasgón

presentó variaciones entre 90% y 95%. En Sevilla la humedad relativa media osciló entre 87% y 92%, y en la estación Pajonal se presentaron porcentajes de humedad entre el 82% y 87%.

5.4.6 Velocidad y dirección del viento

Los resultados gráficos y de frecuencia del análisis de los registros de vientos, se encuentran en el anexo 6, y de estos se concluye que los vientos en la zona son de bajas velocidades, que predomina la calma y la velocidad máxima no supera los 5m/s. En la figura 9 se muestra el mapa de velocidad media para Santander según reportes del IDEAM, lo cual ratifica los resultados obtenidos anteriormente.

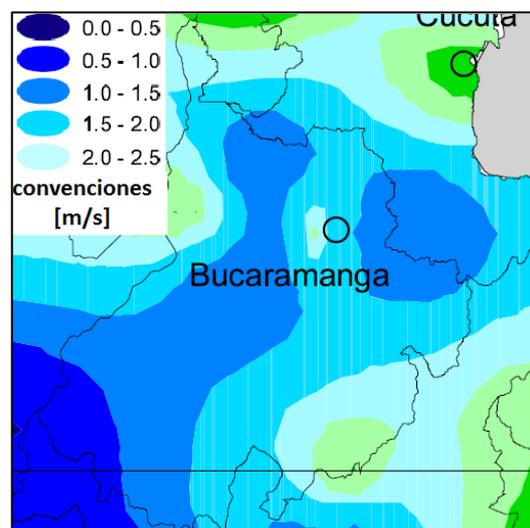


Figura 9. Velocidad media del viento en superficie Fuente: IDEAM

5.4.7 Precipitación

A continuación, se muestran los resultados de precipitación con la información disponible de las estaciones análogas y automáticas.

Ciclo anual de lluvia

Desde el punto de vista temporal, la migración meridional de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) es uno de los mecanismos preponderantes para explicar la variabilidad anual y semianual de la precipitación en Colombia [8].

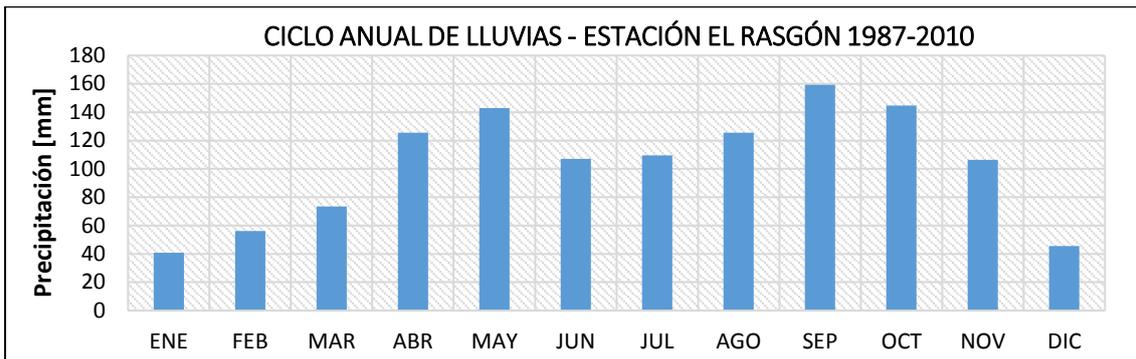


Figura 10. Precipitación media mensual multianual estación El Rasgón 1987 - 2010

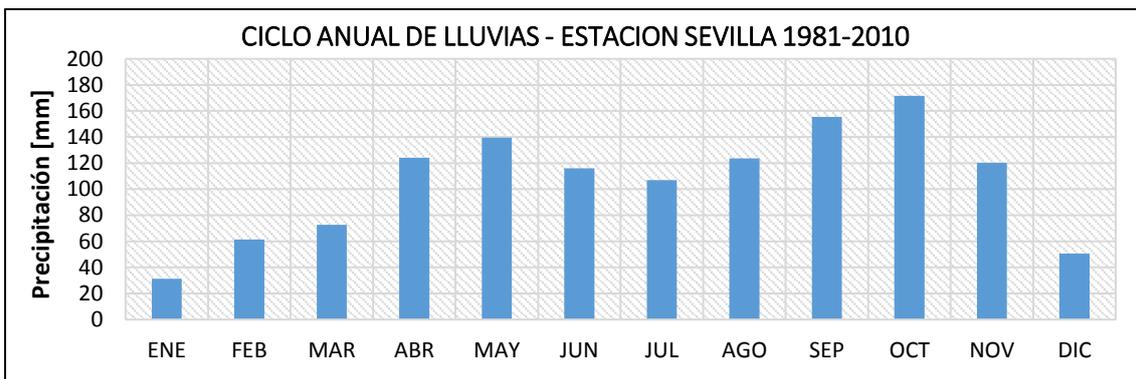


Figura 11. Precipitación media mensual multianual estación Sevilla 1981 – 2010

Las figuras 10 y 11 muestran que el ciclo anual de lluvias para la zona es de tipo bimodal. Durante el año se presentan dos periodos de lluvia, el primero entre abril y mayo y el segundo entre septiembre y octubre.

Análisis de intensidades

Los resultados del análisis de intensidad para cada estación se resumen en las tablas que se encuentran en el anexo 7. Se presentan las gráficas de la intensidad de lluvia (figuras 12, 13 y 14) de las estaciones con base a los eventos de lluvia registrados, sin olvidar la existencia de un porcentaje de datos faltantes.

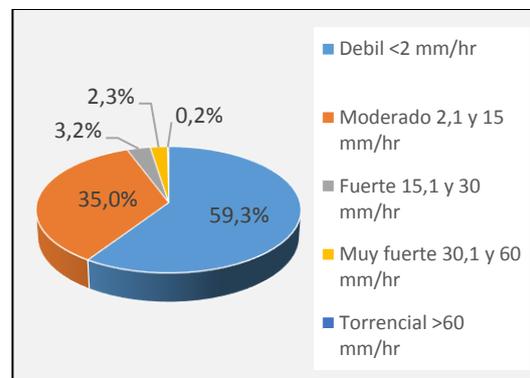


Figura 13. Intensidad de lluvia Sevilla 2011 – 2013

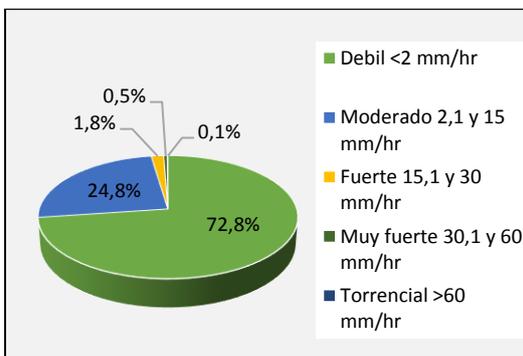


Figura 12. Intensidad de lluvia El Rasgón 2013 -2016

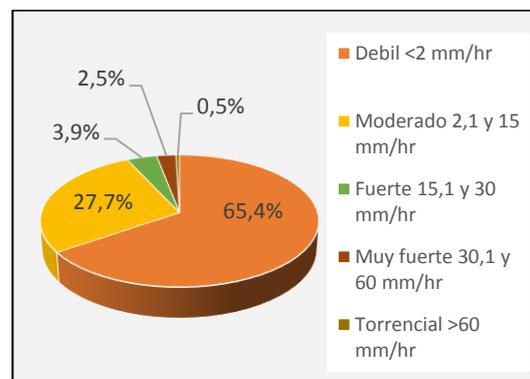


Figura 14. Intensidad de lluvia Pajonal 2012 – 2015

Análisis de precipitación mensual

El análisis de la precipitación mensual se realizó con los registros totales de las estaciones automáticas (figura 15, 16 y 17). Se observa que la precipitación no tiene una evidencia clara de su comportamiento a través del periodo de funcionamiento de cada estación debido al porcentaje de meses faltantes (tabla 14).

Sin embargo, en las estaciones El Rasgón y Sevilla, en los años 2014 y 2012 respectivamente

se puede evidenciar un comportamiento bimodal, en el cual existen dos épocas de lluvia.

Tabla 14. Porcentaje de datos faltantes de lluvia mensual

ESTACIONES	% DE DATOS FALTANTES DE LLUVIA MENSUAL – ESTACIONES AUTOMÁTICAS	
	EL RASGÓN	24%
SEVILLA	15%	
PAJONAL	19%	

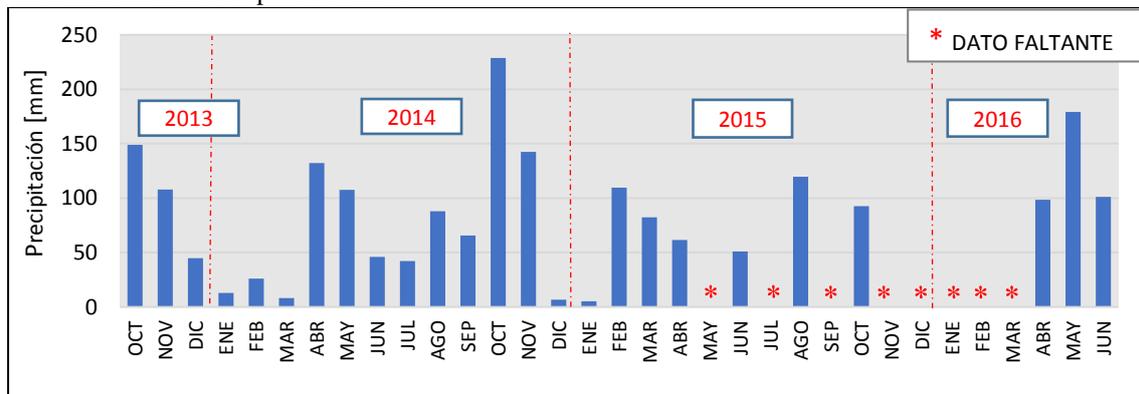


Figura 15. Precipitación media mensual El Rasgón 2013-2016

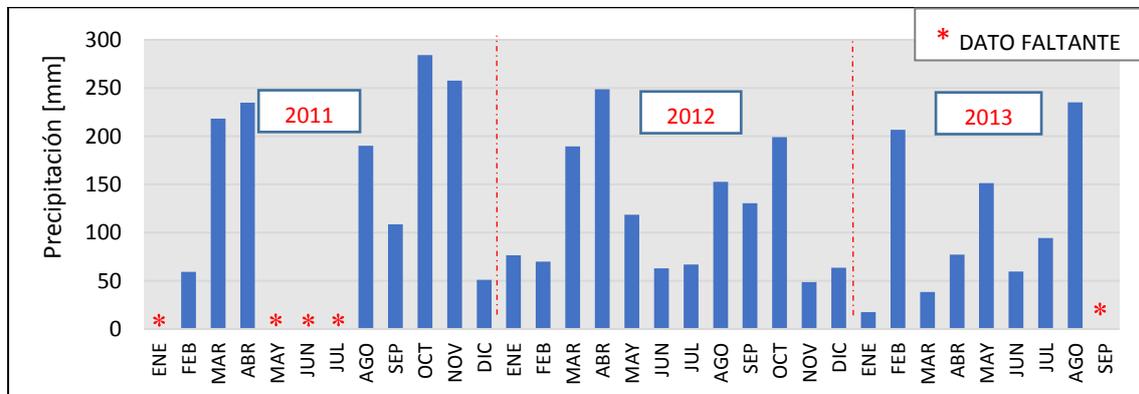


Figura 16. Precipitación media mensual Sevilla 2011-2013

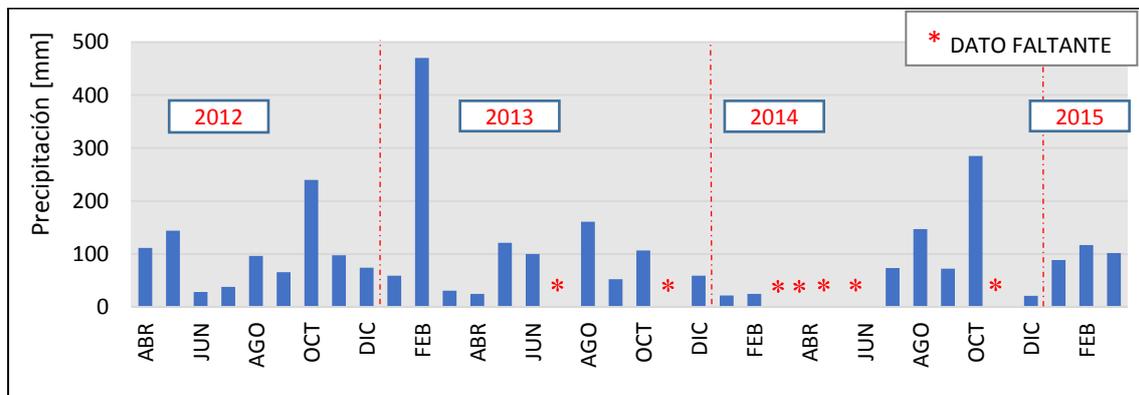


Figura 17. Precipitación media mensual Pajonal 2012-2015

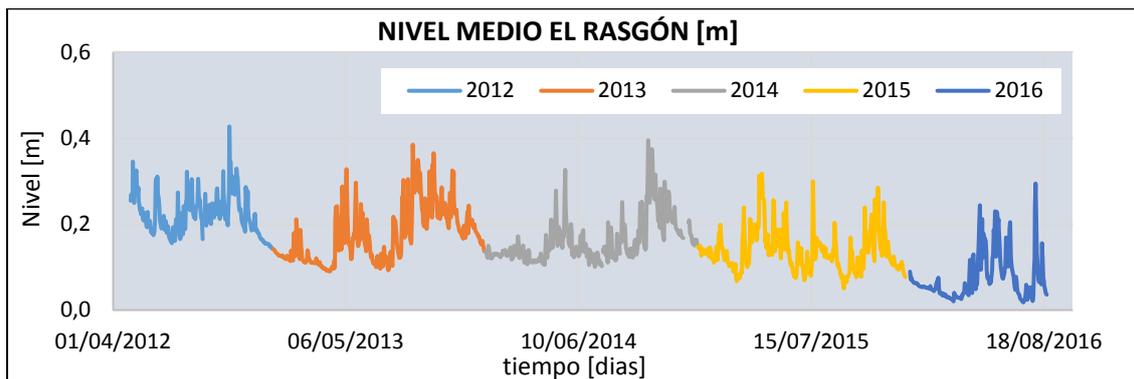


Figura 18. Nivel medio diario mayo de 2012 – agosto de 2016

5.5 Análisis de caudales

Para realizar el análisis de caudales en la estación El Rasgón, se tuvo en cuenta la información disponible de aforos, y niveles entre 2012 y 2016. A continuación, se muestra los resultados de los niveles registrados por la estación automática.

5.5.1 Niveles

Con base en los resultados observados en las gráficas del anexo 8, se identificaron periodos en donde los niveles del cauce eran demasiado bajos, y que estos periodos se relacionaban con las épocas de bajas lluvias. También se observó que los valores de niveles han venido descendiendo desde el momento de la instalación de la estación (figura 18), lo cual puede estar relacionado con su mantenimiento o por captaciones aguas arriba del cauce.

5.5.2 Curva de calibración

Para la elaboración de la curva de calibración se graficaron los valores de caudal y nivel de la tabla 15 y se observó que los aforos no se ajustaban a una misma curva de calibración (figura 19) por lo cual se decidió realizar una curva para cada año.

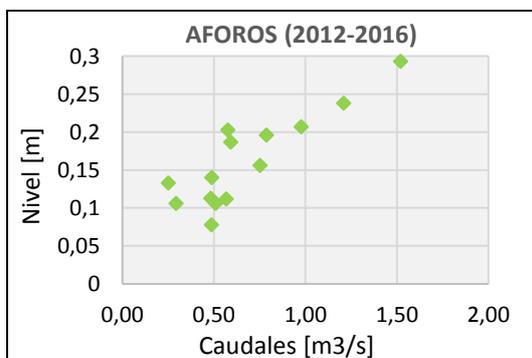


Figura 19. Aforos 2012-2016

Tabla 15. Aforos El Rasgón 2012-2016

FECHA	Nivel [m]	H-Ho [m]	Caudal [m3/s]
12/07/2012	0.16	0.41	0.75
23/08/2012	0.24	0.49	1.21
20/09/2012	0.21	0.46	0.98
24/09/2013	0.20	0.35	0.58
29/10/2013	0.20	0.35	0.79
22/07/2014	0.11	0.26	0.29
23/09/2014	0.14	0.29	0.49
21/10/2014	0.30	0.44	1.52
31/08/2015	0.11	0.46	0.51
22/09/2015	0.11	0.46	0.48
28/10/2015	0.19	0.54	0.59
01/12/2015	0.11	0.46	0.57
27/06/2016	0.08	0.43	0.49

Se pudo elaborar dos curvas de calibración de acuerdo a la información disponible (tabla 15) y al ajuste de la relación Nivel-Caudal. Estas curvas de calibración se muestran en las figuras 20 y 21.

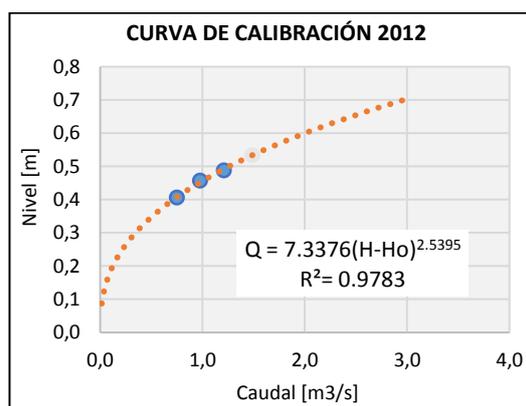


Figura 20. Curva de calibración El Rasgón 2012

Con los aforos del año 2013 y 2014 se elabora una curva de calibración (figura 21), porque los aforos de 2013 no eran suficientes y porque los datos de estos dos años se ajustaban a una misma curva.

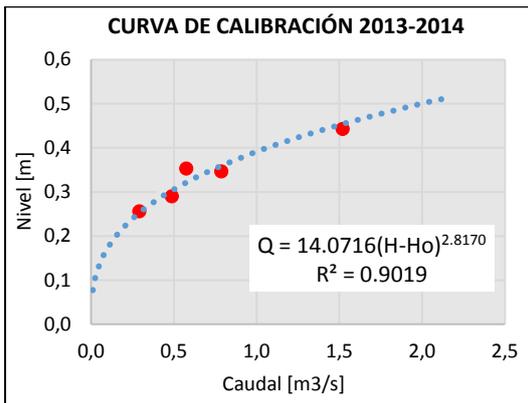


Figura 21. Curva de calibración El Rasgón 2013-2014

Las correlaciones (R^2) que se muestran en las curvas de calibración de 2012 y 2013-2014, tienen un valor aceptable dentro de los estándares establecidos por el IDEAM, sin embargo, para el año 2015, los datos no se ajustan a una curva (figura 22) ya que son muy dispersos, con una correlación de 0,67.

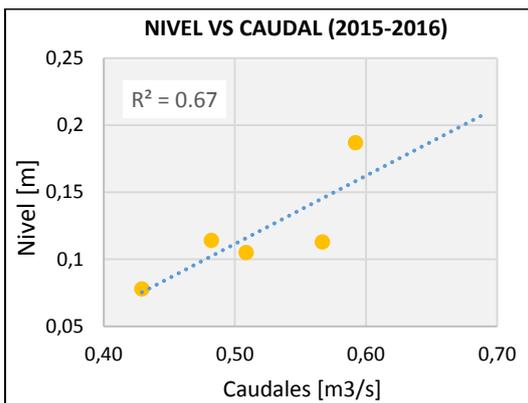


Figura 22. Aforos del Rasgón 2015-2016

La dispersión de los datos puede estar asociada a problemas de colmatación en la estación o a la variabilidad de la sección de aforos por arrastre de sedimentos. Para una mayor precisión y confiabilidad de la curva de calibración se recomienda realizar más aforos en el año y que estos se realicen tanto para época lluviosa como para época seca.

5.5.3 Caudales

A partir de las curvas de calibración se obtienen los valores de caudales, en su análisis se identificaron eventos de gran magnitud, dentro de los cuales se resalta los años de 2013 y 2014 en donde se presentaron caudales de hasta 27 m³/s y 15 m³/s respectivamente. En la figura 23 se muestran los valores de caudal máximo en 24 horas para cada mes en cada año de registro.

En el anexo 9 se puede observar el comportamiento de los caudales de cada año, en donde se identifica un flujo base entre 0,2 y 1.0 m³/s. Finalmente en la figura 24 se muestran los valores de los caudales medios diarios, y se observa una tendencia a la baja en el caudal base.

5.5.4 Relación caudales y precipitación

Para identificar la relación que existe entre los eventos de lluvias y el comportamiento de caudales en un momento dado, se muestran en la figura 25, los valores medios mensuales de precipitación y caudales para el periodo comprendido entre octubre de 2013 y junio de 2016.

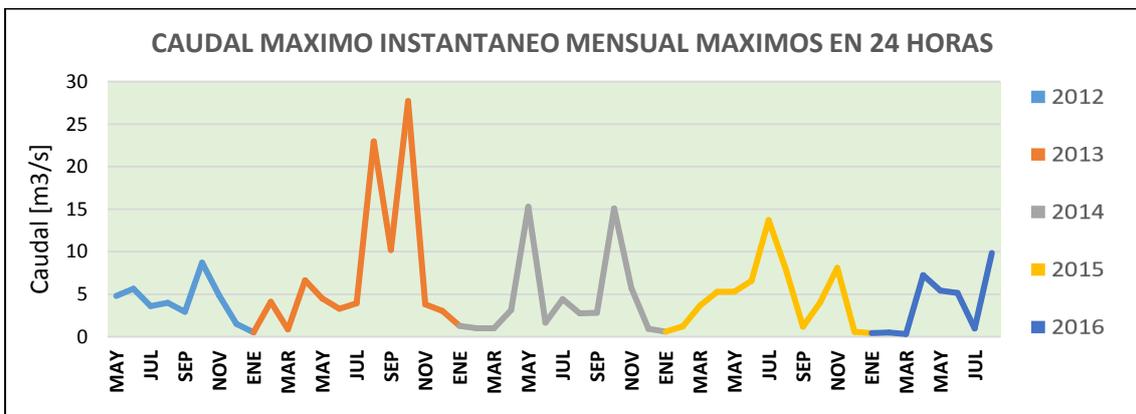


Figura 23. Caudal máximo instantáneo mensual

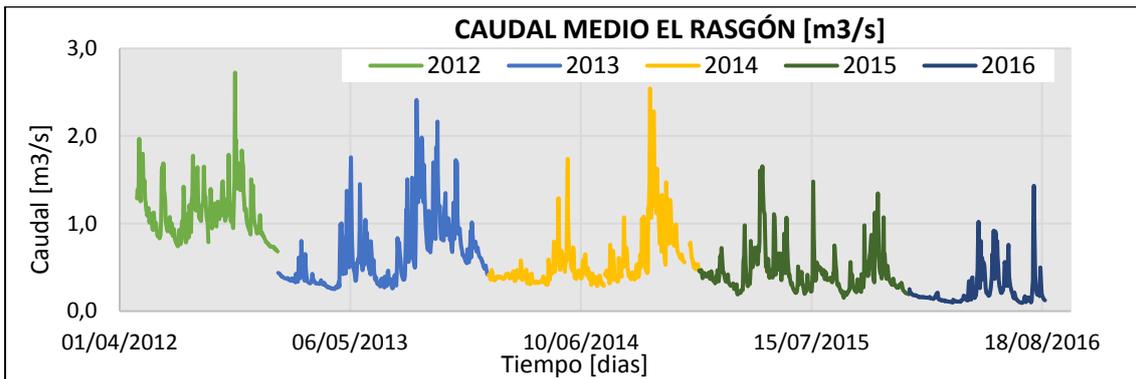


Figura 24. Caudal medio diario mayo 2012- agosto 2016

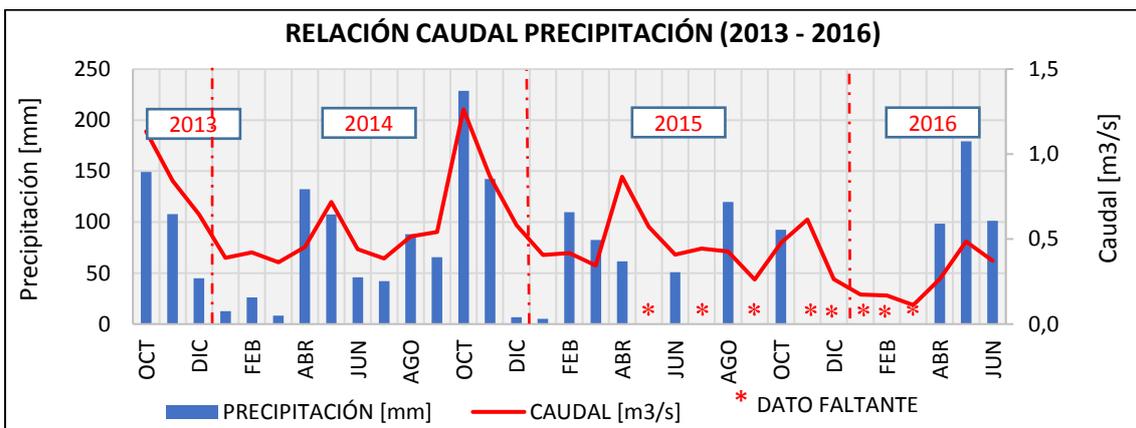


Figura 25. Relación caudal precipitación 2013-2016

6. CONCLUSIONES

Durante el funcionamiento de las estaciones automáticas no es posible tener una serie continua, debido al porcentaje de meses faltantes producto de daños en los equipos, fallas en el suministro de energía o falta de personal para el funcionamiento y mantenimiento de la red. En cuanto a las estaciones análogas de Sevilla y El Rasgón se cuenta con registros pluviométricos desde 1981 hasta el 2010, con un 5 % y 7 % de datos faltantes anuales respectivamente.

El comportamiento de las lluvias en la microcuenca Río de Oro Alto presenta un régimen de tipo bimodal, en donde se observan periodos de lluvia y poca lluvia. Los periodos de lluvia se encuentran comprendidos entre abril-mayo y septiembre-octubre con aproximadamente el 45 % de la precipitación. Para la información de lluvia de las estaciones automáticas no se puede observar el ciclo anual de lluvias debido al porcentaje de meses faltantes. En cuanto a la intensidad de la lluvia, predominan las lluvias débiles con más del 60% de los eventos.

Respecto a las variables climatológicas medidas en la microcuenca, los datos de UV (máximos)

reflejan valores altos según los rangos de categoría de exposición propuestos por la organización mundial de la salud (WHO), lo cual afecta la salud de los habitantes de la zona. Las velocidades de vientos son consideradas bajas (no supera los 5 m/s) y las humedades relativas varían entre 80% y 95%. Por último, Las temperaturas analizadas son valores medios que varían entre los 15°C y los 24°C, presentándose los valores más bajos en la parte alta de la microcuenca.

Para la elaboración de las curvas de calibración se utilizó únicamente la información de aforos de 2012 a 2014, los datos para los años de 2015 y 2016 son muy dispersos y no se ajustan a una curva de calibración. La dispersión de los datos puede estar asociada a problemas de sección variables en el cauce, colmatación en la estación por falta de mantenimiento al interior del tubo limnométrico o malas prácticas en la realización de aforos. Por otra parte, los aforos procesados para el cálculo de la curva de calibración son pocos y estos no se realizaron teniendo en cuenta épocas lluviosas y secas, por lo cual no dan una buena confiabilidad a la curva.

Finalmente, para el comportamiento de caudales se encontró que el nivel de flujo base para el Río de Oro en el sector del Rasgón ha venido descendiendo, sin embargo, los resultados pueden ser afectados por las condiciones de la sección y la localización de la estación, o por el contrario puede ser consecuencia de captaciones aguas arriba del punto de monitoreo.

Se realizó una guía de descarga de datos para la información hidroclimatológica del Sistema de Información Corporativo- SIC, se propuso e implementó un formato de respuesta para las solicitudes radicadas de información hidroclimatológica y finalmente se diseñó un formato para la realización de boletines climatológicos (Archivos disponibles en el CD).

7. RECOMENDACIONES

Las siguientes recomendaciones tienen como finalidad mejorar los procedimientos y los análisis comprendidos en este documento de tal manera que se mejore la calidad de los resultados.

En primer lugar, se debe establecer un cronograma de actividades por parte de la CDMB para supervisar el mantenimiento y el correcto funcionamiento de los instrumentos y equipos pertenecientes a la red hidroclimatológica. El cronograma de actividades contempla fechas, prioridades e informes para cada actividad con el fin de garantizar: la continuidad de la información, el buen estado de los equipos y registros sobre fallas en la red. Se espera que el cronograma aporte a la confiabilidad de la información y reduzca los datos faltantes.

Por otra parte, hay que realizar lecturas de niveles en los cauces de manera continua mínimo dos veces al día, y realizar los aforos en la sección donde se localiza la estación limnimétrica, con el fin de generar curvas de calibración y disponer de información que permita obtener registros de caudales diarios, realización de hidrogramas y actualización de la base de datos corporativa. Por otra parte, se debe realizar un mayor número de aforos en cada estación, que representen caudales máximos y mínimos, para que sea posible analizar el comportamiento real de caudales en la microcuenca.

En cuanto a la información recolectada de las estaciones climatológicas automáticas se recomienda verificar los datos registrados, comparando con estaciones del IDEAM y realizar la curva de doble masa para examinar la

consistencia de los datos. Por otra parte, se debe analizar la confiabilidad de la información, porcentaje de datos faltantes y prever posibles soluciones para el completamiento de la información. Después del análisis, se puede generar reportes climatológicos mensuales de todas las variables climatológicas, con el fin de aprovechar la información y hacer más dinámica la actividad de la red.

Por último, se debe capacitar a las personas que realizar los trabajos de campo (aforos, recolección de información y mantenimiento de las estaciones climatológicas), para generar información confiable y concientizar de la importancia de disponer registros de información veraz y continua.

8. AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos a la Doctora Sully Gómez Isidro por la contribución y apoyo para el cumplimiento de los objetivos propuestos, a la Ingeniera María Carmenza Viccini por su disponibilidad y orientación en el desarrollo de la práctica y a la CDMB por permitirme llevar a cabo la práctica empresarial y hacer parte de mi formación como profesional.

9. REFERENCIAS

[1] INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. Estudio de la caracterización climática de Bogotá y cuenca alta del Río Tunjuelo. Bogotá D.C.: IDEAM, 2008. 116 p.

[2] Boletín de la Sociedad Geográfica de Colombia. Climatología Colombiana. Bogotá D.C. 1965, vol. 23, no. 87-88.

[3] CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL PARA LA DEFENSA DE LA MESETA DE BUCARAMANGA. [Sitio web]. Área de Jurisdicción. [Consulta: 1 de septiembre de 2016]. Disponible en: <http://www.cdm.gov.co/web/asi-es-la-cdm/area-de-jurisdiccion>

[4] CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL PARA LA DEFENSA DE LA MESETA DE BUCARAMANGA. Estudio de Plan de Ordenamiento Ambiental de la Subcuenca del Río de Oro, Área de Jurisdicción de la CDMB. Bucaramanga: CDMB, 2004. ORO.3453-04-CET 01.

[5] SCHLUMBERGER WATER SERVICES. Manual de Divers® [En Línea]. [Delft, Países Bajos]: noviembre de 2014. [Citado 20 de agosto de 2016] Disponible en: <http://www.novamatrixgm.com/groundwater-services-contact>

[6] PÉREZ PRECIADO, Alfonso. Métodos para elaborar curvas de calibración en cauces aluviales. Bogotá D.C.: INCORA, 1969. 42 p.

[7] Sol-arq. [Sitio web]. Radiación solar en la Tierra. [Consulta: 12 de septiembre de 2016]. Disponible en: <http://www.sol-arq.com/index.php/radiacion-solar/radiacion-tierra>

[8] MEJÍA, Freddy, *et al.* Distribución espacial y ciclos anual y semianual de la precipitación en Colombia. Trabajo de grado Aprovechamiento del recurso hídrico. Bogotá D.C.: Universidad Nacional de Colombia, DYNA 1999.

10. BIBLIOGRAFÍA

ARCMAP. [Sitio web]. Comprender el análisis de radiación solar. [Consulta: 12 de septiembre de 2016]. Disponible en: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/understanding-solar-radiation-analysis.htm>

COLOMBIA. UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA. Mapas de radiación solar global sobre una superficie plana [en línea]. 40 p. [Consultado 28 de agosto 2016]. Disponible

en:http://www.upme.gov.co/Docs/Atlas_Radiacion_Solar/2-Mapas_Radiacion_Solar.pdf

DAVIS INSTRUMENTS. Manual de WeatherLink 5.9.0 [En línea]. [Hayward, U.S.A]: Agosto de 2010. [Consulta: 21 de febrero de 2016] Disponible en: https://www.davisnet.com/product_documents/weather/manuals/07395-210_GSG_06510_6555.pdf.

FUNDACIÓN ESPAÑOLA PARA LA CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA. Meteorología y climatología; unidad didáctica: Semana de la Ciencia y la Tecnología 2004. Madrid: La Fundación, 2004. 141 p. ISBN 84-688-8535-5.

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. Protocolo para el monitoreo y seguimiento del agua. Bogotá D.C.: IMPRENTA NACIONAL DE COLOMBIA, 2007. 163 p. ISBN 978-958-8067-23-0.

ORGANIZACIÓN METEOROLÓGICA MUNDIAL. Guía de prácticas climatológicas. Ginebra: OMM, 2011, nro. 100. ISBN 978-92-63-30100-0.