

## Caudales De La Región Este Extendidos Mediante Modelos Lluvia-Escorrentía

Por. Por Ing. Barinas Gabriel ;Ing. Aponte Raziell; Ing. Von Arx Alejandro. Universidad Autónoma de Santo Domingo (UASD), Facultad de Ingeniería phd.barinas@gmail.com

### • Abstract

The research carried out in the Eastern Region of the country consists of determining the flows in the basins of the area through the application of rain-runoff models, obtaining records of extended flows. This is achieved using rainfall records completed with bivariate regression models. The objective is to solve the lack of hydrological information available in the region, which is limited by the deficiency of the available records, which leads to resorting to alternatives with a low level of reliability.

In addition, the Eastern Region has a wide demand for water resources due to cities, crops and the increase in tourism development; It is precisely the region with the greatest weaknesses in terms of available hydrological information. It seeks to generate a flow record based on a precipitation record, for a storm event and improve the precision of the mathematical models normally used for project evaluations in the country.

After completing the rainfall records, an increase in average rainfall is observed, but 99% of the stations present a variation in the annual average rainfall value of less than 10%, maintaining its consistency. When generating flow data with the MPE, you go from having only 30 or 40 years available in the best of cases, to having 80 years of flow data. The variation of the recorded mean flows versus the simulated ones remains less than 10% in 90% of the cases.

### • Keywords

Water resources, data completion, hydrological models, flow simulation, historical records, hydrology.

### • Resumen

La investigación realizada en la Región Este del país consiste en determinar los caudales en las cuencas de la zona mediante la aplicación de modelos lluvia-escorrentía, obteniendo registros de caudales extendidos. Esto se logra utilizando registros pluviométricos completados con modelos de regresión bivariado. El objetivo es solucionar la falta de información hidrológica disponible en la región, que se ve limitada por la deficiencia de los registros disponibles, que lleva a recurrir a alternativas con bajo nivel de confiabilidad.

Además, la Región Este posee amplia demanda del recurso hídrico debido a las ciudades, cultivos y al aumento en el desarrollo turístico; es precisamente la región con mayores debilidades en cuanto a información hidrológica disponible. Se busca generar un registro de caudales basado en un registro de precipitación, para un evento de tormenta y mejorar la precisión de los modelos matemáticos utilizados normalmente para las evaluaciones de proyectos en el país.

Luego de completar los registros pluviométricos se observa un aumento de las precipitaciones media, pero el 99% de las estaciones presenta una variación en el valor de precipitación media anual inferior a 10%, manteniendo su consistencia. Al generar con el MPE los datos de caudal, se pasa de contar con apenas 30 o 40 años disponibles en el mejor de los casos, a contar con 80 años de datos de caudal. La variación de los caudales medios registrados versus los simulados se mantiene menor al 10% en el 90% de los casos.

### • Palabras Clave

---

Recursos hídricos, completado de datos, modelos hidrológicos, simulación de caudales, registros históricos, hidrología.

- **Introducción**

Nuestro país cada año tiene una alta posibilidad de tener que enfrentar una tormenta o una sequía. Nuestros proyectos de abastecimiento y protección están diseñados basados en los registros históricos disponibles los cuales son débiles en cuanto a extensión y consistencia, muchas veces ignorando eventos críticos de nuestra historia.

Los diseños de los proyectos que se abastecen de ríos y arroyos se ven limitados por la deficiencia de los registros disponibles, recurriendo a alternativas con bajo nivel de confiabilidad (Salinas-Tapia et al., 2018). Estas alternativas se basan en completar con valores promedio, utilizar ponderaciones lineales, utilizar estaciones más alejadas con mayor extensión, utilizar registros de cuencas similares, entre otros.

La problemática se intensifica en la zona Este de nuestro país, ya que posee una gran demanda del recurso hídrico debido a las ciudades y cultivos y a el aumento en el desarrollo turístico, y es precisamente la región con debilidades en cuanto a información hidrológica disponible (Cocco Quezada, 1992).

Esta investigación consiste en determinar los caudales en las cuencas de la Región Este de República Dominicana, mediante aplicación de modelos lluvia-escorrentía, obteniendo un registro de caudales de más de 30 años; utilizando registros pluviométricos a su vez completados con modelos de regresión bivariado.

La solución común al problema de la falta de datos consiste en ignorar las estaciones cercanas y utilizar otras mucho más alejadas de los proyectos evaluados, pero que cumplen con la cantidad de años requerida, lo cual asume que el comportamiento en ambas ubicaciones es la misma, alejándonos significativamente de la realidad (Burbano & Zarama, 1996).

Existen múltiples avances para el completado de datos basados en métodos diversos. Algunos métodos intentan utilizar los avances computacionales para aplicar inteligencia artificial en el proceso de completado (Nkuna & Odiyo, 2011). Otros métodos utilizan imágenes satelitales e interpolaciones con otros equipos de medición (Githungo et al., 2016).

Pero los modelos que arrojan resultados más cercanos a la realidad son los modelos de regresión estadística múltiple y bivariada enfocados en la correlación, distancia y el número de datos en común (Hasan & Croke, 2013), como es el caso del primer componente de este proyecto de investigación.

Estudios realizados en 2016 estiman de los parámetros necesarios para aplicar un método basado en erosión, pero con el mismo objetivo de generar un registro de caudales basado en un registro de precipitación para un evento de tormenta (Cilek et al., 2016). Es importante señalar que la precisión obtenida de realizar esta inferencia desde parámetros erosivos es muy inferior a la obtenida del completado directo de mediciones pluviométricas.

Por otro lado, estudios de 2019, combinan metodologías clásicas con los avances computacionales para la creación de registros de caudales basado en el comportamiento de la precipitación y de la

geomorfología de la cuenca de aporte (Asadi et al., 2019). Se debe resaltar que los registros calculados en estas investigaciones señaladas son sintéticos, no validados con datos reales, reto que esta investigación pretende superar.

Aumentando la precisión de los modelos matemáticos referidos anteriormente, el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) en España, ha desarrollado sobre el modelo de regresión bivariado con estacionalización previa mensual de los datos, el cual actualmente se ha utilizado para las evaluaciones de proyectos en dicho país (CEDEX, 2013).

El completado de los datos hidrométricos es más complejo, requiriendo utilizar los previamente completados registros de precipitación, acompañados de los datos de evapotranspiración y los aforos existentes que servirán como base para realizar una calibración y posteriormente una validación de los resultados (Larson & Peck, 1974).

La hipótesis principal de esta investigación no se basa en si el proceso funciona o no, debido a que ha sido implementado en cuencas de España con gran efectividad (Álvarez, 2002), la cuestión es si es aplicable para las variables condiciones climáticas de nuestro país tropical (Franklin et al., 2019).

- **Metodología**

Luego de la fase preliminar de recopilación, organización, digitalización y depuración de la información hidrológica, el proyecto fue llevado a cabo en 3 fases posteriores: una primera fase correspondiente al completado de datos de precipitación utilizando un modelo de correlación múltiple (Álvarez, s. f.); una segunda fase para el preanálisis de los

registros foronómicos existentes mediante técnicas de estadística hidrológica; y una fase final de simulación de datos de caudal mediante la aplicación del modelo de Témez (Témez, 1977).

#### Método de Completado de Datos Meteorológicos Modelo de Correlación Múltiple Bivariada

Un método de completado de datos se hace necesario cuando se tienen estaciones de datos meteorológicos (en este caso de precipitación) con registros interrumpidos, y se desea rellenar dichos huecos en los registros de la manera más cercana a la realidad posible. Esto nos lleva a relacionar una estación de estudio incompleta con otras que tengan registros donde la estación incompleta carece de ellos, para luego aplicar criterios matemáticos para conocer su grado de compatibilidad numérica, y seleccionar las mejores estaciones a usar para realizar el completado.

Basado en esta hipótesis, se utiliza como criterio matemático el modelo de correlación múltiple bivariada (Lewis-Beck & Lewis-Beck, 2015), el cual compara el comportamiento de la estación de estudio con todas las parejas posibles de estaciones disponibles, seleccionando entonces una pareja de estaciones escogida por su comportamiento similar a la estación de estudio, finalmente usándola como base para completar la estación de estudio. Para lograr estos objetivos se emplea el software CHAC (Cálculo Hidrometeorológico de Aportaciones y Crecidas) del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX, esta aplicación es de libre distribución.

- **Registros de precipitación areal**

La estimación de recursos hídricos requiere conocer la distribución espacial de los puntos de medición que permita, a partir de estos valores puntuales,

definir una precipitación media areal (PMA), representativa de la superficie que se estudie. El método de Thiessen, un método de promedio por ponderación directa, fue el utilizado por su fácil aplicabilidad y por ajustarse al alcance de los estudios llevados a cabo en esta investigación. Para obtener las áreas que se emplean en el método de Thiessen, se ha empleado el software QGIS, un sistema de información geográfica libre y de código abierto.

#### Aplicación modelo Lluvia-Escorrentía de Témez

En la hidrología, los modelos precipitación-escorrentía (MPE) intentan representar de manera simplificada el ciclo hidrológico en régimen natural, para estimar a partir de las lluvias caídas sobre una cuenca (y otros parámetros secundarios), los caudales (escurrimientos) que se presentarán.

Los MPE son muy útiles por ser capaces de generar series de caudales para períodos y lugares no aforados, tomando como ventaja la existencia de registros pluviométricos, generalmente más comunes y extensos que los registros foronómicos (Linsley et al., 1977).

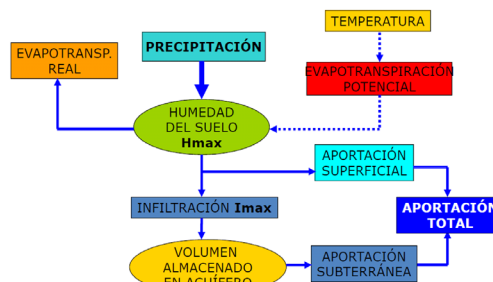
El modelo de Témez es de los MPE más utilizados, por tener un número reducido de parámetros de calibración, lo que hace fácil su aplicación en zonas con pocos registros de datos. Existen otros modelos que requieren un elevado número de parámetros, como el de Stanford IV (Crawford & Burges, 2004), el HSPF (Singh et al., 2005), SACRAMENTO (Sorooshian et al., 1993), NAM-MIKE 11 (Doulgeris et al., 2011), SIMPA (Álvarez et al., 2005), TETIS (Vélez et al., 2005), entre otros.

Mientras más parámetros tiene un modelo, resulta más difícil calibrarlo, pero suele tener una mayor precisión que los que emplean menos parámetros.

Asimismo, cuantos más parámetros tenga un modelo, con mayor complejidad simula el ciclo hidrológico, haciéndolo más parecido a lo que sucede en la naturaleza (Upegui & García, 2003).

El MPE de Témez es un modelo continuo, determinístico y agregado, que se utiliza a escala mensual. Tiene 4 parámetros de calibración y 2 variables iniciales:

- **H<sub>max</sub>** es la humedad máxima en el suelo, medida en milímetros. Representa la capacidad máxima de almacenamiento del suelo, y depende de la textura, la pendiente del terreno y el espesor de la franja de suelo donde tiene lugar la evapotranspiración.
- **C** es un parámetro adimensional relacionado con el umbral a partir del cual hay excedentes. Permite obtener el valor umbral de precipitación, a partir del déficit de humedad del suelo.
- **$\alpha$**  es la velocidad de descarga de los acuíferos, regula el drenaje subterráneo, se mide en día<sup>-1</sup>.
- **I<sub>max</sub>** es la infiltración máxima, medida en milímetros.
- **H<sub>0</sub>** es la humedad inicial en el suelo, medida en milímetros.
- **V<sub>0</sub>** es el volumen de almacenamiento inicial del acuífero, medido en milímetros.



- **Datos históricos de RD**

En la República Dominicana, las principales instituciones que miden datos de lluvia son:

- Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INDRHI): Es el organismo encargado de la gestión y el monitoreo de los recursos hídricos en el país. Opera una red de estaciones pluviométricas distribuidas en todo el territorio nacional.
- Oficina Nacional de Meteorología (ONAMET): Es la entidad encargada de monitorear y pronosticar el clima en la República Dominicana. Cuenta con una red de estaciones meteorológicas que incluyen medidas de precipitación.

Cuenca	ESTACIÓN	X UTM	Y UTM	LATITUD	LONGITUD	AÑOS	PERIODO
Anamuya-Anamuya	230001	537431	2067456	18.6981	-68.6450	21	1974/1994
Chavón-Santa Lucía	260001	506737	2066098	18.6861	-68.9361	48	1956/2003
Chavón/Sanate-Guanito	261001	521477	2059655	18.6278	-68.7964	39	1956/1994
Duey-El Mamey	240001	526629	2063534	18.6628	-68.7475	27	1968/1994
Higuamo/Casul-excavación	311001	457251	2059783	18.6286	-69.4053	35	1961/1995
Higuamo/Casul-Las Táranas	311002	455502	2063844	18.6653	-69.4219	5	1956/1960
Maimón-La Guama I	220001	533074	2080203	18.8133	-68.6861	10	1956/1965
Soco-Paso del Medio	300002	482678	2054088	18.5775	-69.1642	37	1957/1993
Soco/Seibo-Isabelita	301001	489436	2083988	18.8478	-69.1003	10	1957/1966
Yabón-La Cruz	200001	458047	2101336	19.0042	-69.3986	6	1969/1974
Chavón-Mira Pato	260002	516389	2047633	18.5192	-68.8447	-	-
Soco-El Llano	300003	497394	2074918	18.7658	-69.0247	-	-

Estas instituciones recopilan y analizan datos sobre la lluvia, temperatura y otras variables climáticas, para su utilización en diversos campos, como la planificación hidrológica, la agricultura, la gestión de riesgos y la investigación científica. Adicionalmente el INDRHI mide y registra datos de caudales, evaporación, horas de sol, etc.

Los datos aquí utilizados son los suministrados por ambas instituciones. De precipitación se recolectaron 247 estaciones con registros (a nivel nacional). De caudal, en la Región Este se tienen 12 estaciones, de las cuales el INDRHI suministró 10 con registros, por ello las estaciones Chavón-Mira Pato y Soco-El Llano se descartan.

- **Resultados**

Al recolectar los registros de las estaciones pluviométricas del país, se consiguieron 282 estaciones en total, 247 de estas estaciones con información. Al elegir un periodo de registro mínimo de 20 años, quedaron 128 estaciones.

Depurando individualmente las estaciones se eliminaron 10 por tener datos inconsistentes, quedando 118 estaciones. Para lograr una densidad de estaciones uniforme (tener aproximadamente 10 km entre estaciones), se descartaron algunas estaciones en áreas muy pobladas por ellas, quedando finalmente 95 estaciones con las cuales trabajar.

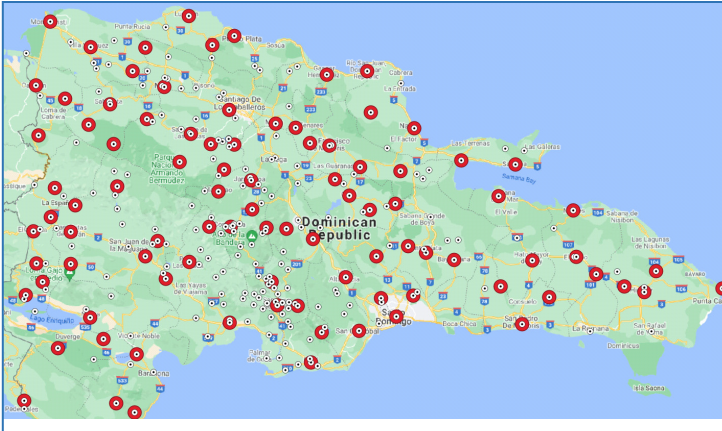


Ilustración – Estaciones pluviométricas (blancas) y estaciones seleccionadas para el estudio (rojas). Completado de datos pluviométricos. Luego de completar los registros pluviométricos con el modelo, el gráfico del historial de datos de las estaciones cambia significativamente:

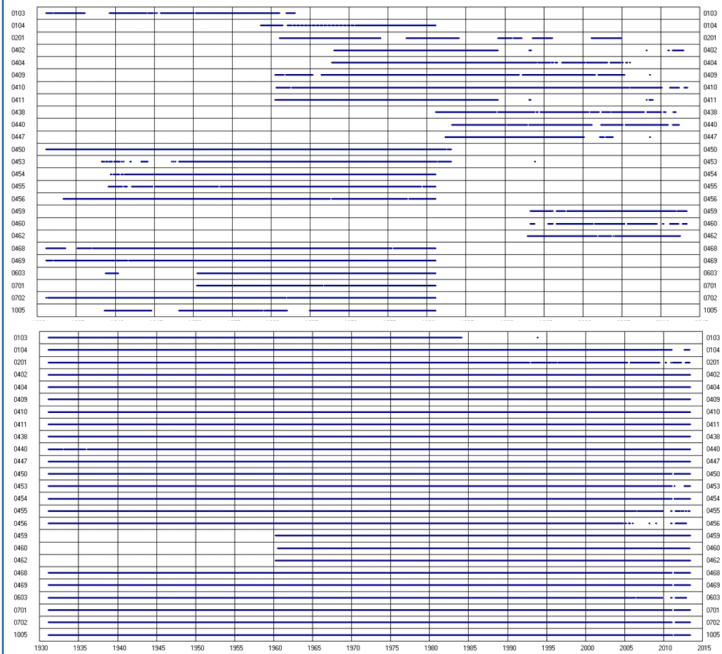


Ilustración – Muestra de las estaciones estudiadas (registros originales vs registros completados).

Tabla – Parámetros estadísticos de los registros de precipitación (originales vs completados)

Estadísticas de Estaciones Seleccionadas					Estadísticas de Estaciones Completadas					
93 Estaciones					93 Estaciones					
Estación	Años	Completos	Media	CV	Estación	Años	Completos	Media	CV	
1803	32	26	1363.3	0.180	1803	83	53	1367.8	0.208	
2011	44	25	1381.4	0.529	-0.256	2011	83	73	1454.1	0.243
402	45	21	1262.8	0.242	0.534	402	83	82	1320.0	0.188
404	29	25	972.6	0.283	0.184	404	83	82	1024.3	0.247
409	49	36	1296.0	0.258	0.931	409	83	82	1344.8	0.213
410	54	47	1862.0	0.321	1.508	410	83	82	1721.5	0.262
411	49	27	1015.7	0.305	-0.316	411	83	81	1701.1	0.214
438	31	17	1911.1	0.258	1.153	438	83	82	1878.5	0.179
440	30	17	1387.8	0.259	-0.125	440	83	77	1393.2	0.257
447	27	17	1195.4	0.267	1.838	447	83	81	1240.4	0.182
456	48	44	684.0	0.259	0.260	456	83	72	718.8	0.262
460	33	33	1329.4	0.266	0.945	460	83	80	1335.3	0.238
454	42	39	742.6	0.276	0.783	454	83	80	781.0	0.255
405	42	37	706.7	0.336	0.247	405	83	77	734.0	0.292
469	33	12	1318.1	0.318	-0.057	469	83	52	3172.3	0.270
460	21	8	2392.0	0.144	-0.237	460	83	52	2431.6	0.139
462	21	13	862.1	0.257	0.753	462	83	51	909.6	0.205
468	46	46	1432.3	0.229	0.867	468	83	48	1465.5	0.217
469	50	47	1254.2	0.260	0.502	469	83	80	1288.6	0.231
603	43	27	1704.3	0.262	-0.145	603	83	26	1725.9	0.232
701	31	29	1264.4	0.229	0.767	701	83	80	1324.2	0.198
702	50	49	1838.2	0.217	0.569	702	83	80	1878.2	0.203
1005	43	32	2054.2	0.214	-0.017	1005	83	80	2121.5	0.196
1201	33	29	1744.6	0.211	-0.791	1201	83	80	1812.1	0.212
1301	20	18	2548.9	0.214	-0.305	1301	83	81	2394.4	0.177
1003	31	28	2072.1	0.316	1.435	1003	83	80	2063.2	0.247
1701	50	46	2283.2	0.256	0.838	1701	83	80	2254.1	0.223
1702	50	39	2088.7	0.280	0.026	1702	83	80	2033.0	0.195
1806	47	29	2272.1	0.261	0.411	1806	83	80	2548.9	0.286
1811	39	28	1055.1	0.215	-0.346	1811	83	81	1738.2	0.165
1815	35	27	1454.7	0.222	0.733	1815	83	81	1437.4	0.204
1821	32	18	3112.3	0.288	-0.117	1821	83	81	2953.2	0.239
1837	27	26	1992.8	0.280	0.467	1837	83	73	2024.4	0.193
1838	28	21	1135.4	0.381	0.546	1838	83	57	1164.7	0.273
1842	28	18	2887.0	0.264	-0.620	1842	83	58	2668.0	0.283
1844	47	28	2265.7	0.330	0.701	1844	83	80	2353.1	0.224
2002	49	27	1294.6	0.289	0.153	2002	83	81	1322.0	0.214
1846	50	42	1788.3	0.315	0.940	1846	83	80	1833.8	0.254
1847	53	40	1445.8	0.220	0.736	1847	83	80	1473.3	0.207
1848	53	43	1233.5	0.215	0.081	1848	83	79	1296.2	0.208
1853	42	42	1181.9	0.228	0.195	1853	83	81	1217.1	0.212
2001	47	46	2142.3	0.210	0.644	2001	83	81	2206.1	0.194
2101	50	40	1896.2	0.254	0.757	2101	83	80	2001.9	0.204
2201	37	26	1854.9	0.187	0.102	2201	83	80	1824.1	0.140
2202	36	27	1864.7	0.252	0.348	2202	83	80	1893.3	0.185
2303	47	42	1345.2	0.205	0.308	2303	83	80	1383.1	0.197
2601	40	32	1094.2	0.273	0.851	2601	83	81	1171.7	0.246
2602	49	27	1294.6	0.289	0.153	2602	83	81	1322.0	0.214
3002	40	35	1407.2	0.326	0.854	3002	83	81	1404.5	0.256
3005	36	33	1261.0	0.232	0.149	3005	83	80	1346.6	0.221
3101	31	18	1411.5	0.330	1.126	3101	83	80	1452.1	0.240
3103	50	45	1015.0	0.267	0.495	3103	83	80	1046.6	0.251
3104	47	31	1546.2	0.166	0.299	3104	83	80	1611.7	0.166
3302	54	39	1797.7	0.189	0.167	3302	83	81	1815.8	0.157
3303	29	22	1854.1	0.268	1.360	3303	83	80	1875.5	0.194
3305	52	47	1461.7	0.217	0.171	3305	83	81	1711.6	0.171
3309	27	27	1754.2	0.178	0.470	3309	83	80	1784.2	0.154
3311	43	33	1950.9	0.284	0.697	3311	83	80	2157.0	0.241
3312	36	32	1807.8	0.159	1.002	3312	83	80	1943.9	0.138
3313	40	40	1365.7	0.228	0.729	3313	83	80	1411.9	0.207
3405	43	31	2246.8	0.327	1.834	3405	83	80	2374.3	0.233
3602	47	40	1788.7	0.222	0.519	3602	83	80	1796.1	0.194
3602	35	33	1725.6	0.280	-0.092	3602	83	81	1727.9	0.190
3806	26	18	1273.5	0.234	-0.252	3806	83	81	1275.3	0.196
4002	49	47	932.3	0.284	0.938	4002	83	80	957.9	0.243
4426	21	15	1343.4	0.297	0.238	4426	83	51	1348.0	0.188
4427	50	46	1025.3	0.280	-0.062	4427	83	80	1103.8	0.316
4405	53	45	668.4	0.414	1.275	4405	83	80	702.0	0.338
4903	22	20	702.1	0.307	0.042	4903	83	81	731.4	0.218
4904	26	24	646.3	0.296	0.969	4904	83	79	693.8	0.259
4906	53	51	1108.3	0.115	-0.062	4906	83	25	1053.3	0.123
4907	54	40	1294.1	0.214	-0.410	4907	83	72	1419.1	0.224
4913	47	40	571.8	0.260	0.739	4913	83	81	594.8	0.240
4914	21	14	779.6	0.222	0.441	4914	83	80	799.6	0.209
4918	28	49	1015.3	0.280	0.421	4918	83	80	1051.3	0.185
4982	28	17	1499.3	0.267	0.043	4982	83	73	1437.5	0.208
5101	32	23	2299.6	0.175	0.378	5101	83	80	2408.9	0.155
5103	40	32	2137.4	0.324	1.213	5103	83	80	2224.4	0.233
5201	35	28	702.3	0.395	1.035	5201	83	80	705.1	0.274
5307	27	17	625.2	0.184	1.364	5307	83	81	678.9	0.238
5307	32	18	1540.9	0.188	0.626	5307	83	81	1613.5	0.223
5318	21	12	496.3	0.484	1.092	5318	83	72	546.6	0.313
5319	42	28	474.5	0.371	0.527	5319	83	77	514.7	0.205
5320	42	22	696.2	0.341	1.826	5320	83	80	751.7	0.252
5402	42	26	1054.1	0.312	0.982	5402	83	81	1121.9	0.256
5404	45	35	1170.0	0.163	0.185	5404	83	80	1213.7	0.155
5405	28	26	1618.6	0.282	1.132	5405	83	79	1646.7	0.191
5407	44	28	946.2	0.256	-0.382	5407	83	80	998.5	0.224
5412	34	17	1284.6	0.252	1.660	5412	83	78	1229.7	0.205
5414	36	33	1050.7	0.159	1.072	5414	83	79	1080.8	0.166
5415	53	30	1727.0	0.408	2.303	5415	83	78	1707.4	0.313
5417	42	33	1673.9	0.479	2.114	5417	83	76	1806.9	0.336

## Completado de datos hidrométricos con MPE

Un modelo de precipitación-escorrentía tiene por objetivo estimar los caudales en un cauce, tomando en cuenta parámetros de la cuenca, series históricas de datos de precipitación y algunos registros de caudal.

Estos modelos tienen gran importancia en hidrología, ya que lo más normal es contar con registros de pluviometría, más que de caudales. Tomando en cuenta las características de cada una de las cuencas de estudio, se estiman valores iniciales de estos parámetros, y se calibra el MPE de cada cuenca partiendo de ellos. Las 10 cuencas estudiadas, limitadas por la cantidad de estaciones hidrométricas (Chavón-Mira Pato y Soco-El Llano se descartan) con registros en la Región Este, se muestran a continuación.



Ilustración – Cuencas delimitadas hasta las estaciones hidrométricas de la Región Este.

La calibración del MPE consiste en ajustar los múltiples parámetros predefinidos hasta conseguir cierto ajuste entre los valores de caudal registrados y los valores simulados, para luego utilizar estos mismos parámetros ahora definidos para el proceso posterior de simulación.

Durante el proceso de ajuste se consideran los errores que presentan los caudales simulados en comparación con los caudales registrados para cada periodo, cada promedio mensual y cada año registrado. Estos errores se reflejan como errores en los caudales bajos, caudales altos y el error medio relativo.

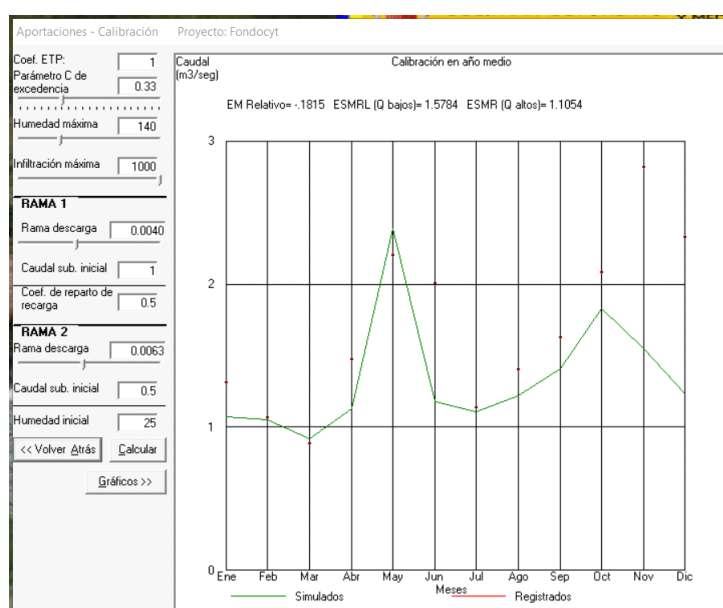


Ilustración – Inicio de calibración de las series de caudal para Estación Chavón/Sanate-Guanito.

Luego de ajustar el gráfico de promedios mensuales entre los caudales registrados y los simulados durante el proceso de calibración, también es necesario verificar los caudales mensuales durante el registro completo.

Adicionalmente se debe verificar si los parámetros están representados por las descargas de los acuíferos de forma correcta, mostrando el caudal base estimado en comparación con los caudales totales simulados.

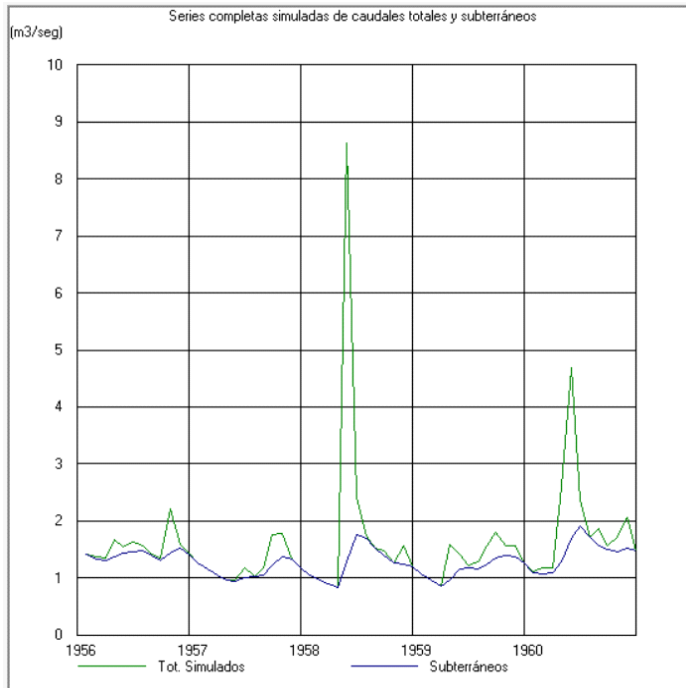


Ilustración - Comparación de los registros de caudales subterráneos y mensuales, entre simulados y los registrados.

Cuando se logra un ajuste razonable entre los caudales registrados y los caudales simulados, basado en los gráficos y en los errores relativos, entonces se procede a registrar la simulación que generaría un registro de caudales con la misma extensión de la serie de precipitación areal (1931-2013). Los gráficos resultantes de calibrar y simular los MPE de todas las cuencas estudiadas se encuentran en el anexo 1.

- Tesis de grado: Completado De Series De Datos Hidrológicos Mediante Modelo De Regresión Bivariado Para El Análisis De Recursos Hídricos.

Caso de estudio: Sub-cuenca Ocoa-Arroyo Limón. Alejandro von Arx S. & Arturo Vásquez A.

- Tesis de grado: Caudales mínimos y máximos en la cuenca del Río Yuna de la República Dominicana utilizando registros completados con modelos de regresión bi-variado y modelos lluvia-escorrentía. Welinton Antonio Roa García & Nataly Nicol Alcántara Gómez.
- Transferencia tecnológica: Barinas, G., Aponte, R. (2023). Gap-filled Data Series for East Region of Dominican Republic, HydroShare. <http://www.hydroshare.org/resource/aa33f5439f62422a9efcd284f38cfb23>
- Barinas, G. Presentación de Metodología y Avances del Proyecto sobre Completado de Series en Oregon State University, octubre 2021.
- Barinas, G. Presentación tipo Lightning en conferencia Internacional AGU Fronteras en Hidrología, junio 2022.
- Aponte, R. Modelo lluvia-escorrentía utilizando registros de lluvia completados con regresión bivariada en la Región Este de República Dominicana. Conferencia en el marco del 483 aniversario de la UASD. Universidad Autónoma de Santo Domingo. 27 de octubre 2021, Santo Domingo.
- Aponte, R. Modelo lluvia-escorrentía utilizando registros de lluvia completados con regresión bivariada en la Región Este de República Dominicana. Conferencia en la XXIV Feria Internacional del Libro Santo Domingo 2022. Casa de La Rectoría. 26 de abril 2022, Santo Domingo.

Domingo.

- Aponte, R. Modelo lluvia-escorrentía utilizando registros de lluvia completados con regresión bivariada en la Región Este de República Dominicana. Conferencia en el 1º Congreso Internacional de Investigación, Desarrollo e Innovación y XXI Jornada de Investigación Científica. Universidad Autónoma de Santo Domingo. 24 de noviembre 2022, Santo Domingo.

#### Actividades de formación:

- Taller de CHAC (Cálculo Hidrometeorológico de Aportaciones y Crecidas) al personal del departamento de hidrología del INAPA.
- Capacitación en uso de CHAC a estudiantes de la asignatura Hidrología (CIV-460) de la carrera Ingeniería Civil en los semestres 2020-1, 2020-2, 2021-1, 2021-2, 2022-1, 2022-2 y 2023-1.
- Taller de HEC-HMS al personal del departamento de hidrología del INAPA.
- Discusión

#### Comparación de registros de precipitación completados con los originales.

Existen múltiples formas que nos permiten comparar las series de precipitaciones seleccionadas y las series luego del completado. Para este proyecto se ha decidido por iniciar por una comparación de los parámetros básicos estadísticos (media, coeficiente de variación CV y coeficiente de simetría CS) y evaluar manualmente las estaciones que contengan diferencias substanciales con ellas mismas luego del

completado. Al calcular los parámetros estadísticos para ambas series y determinar la diferencia entre ellos, fue evidente que el completado mantuvo estos parámetros prácticamente iguales, ligeramente aumentando el valor promedio y ligeramente disminuyendo la variación de las series. Sin embargo, fueron resaltados algunas estaciones que presentaron valores muy diferentes del coeficiente de simetría CS.



Ilustración - Localización de las estaciones 0440, 1702 y 4982.

Estas estaciones que presentaron anomalías en la asimetría de sus series seleccionadas y completadas, identificadas por los códigos 0440, 1702 y 4982, fueron analizadas más de cerca revisando por métodos gráficos con el objetivo de identificar la razón de esta diferencia. Adicionalmente fue verificado que no guardan relación espacial entre ellas.

Al realizar la inspección, fue evidente que la razón por la que el coeficiente de asimetría en la estación Cagueyes 0440 resultara substancialmente

diferente, se debe a que durante el periodo de medición 2000-2005 la estación fue muy inconsistente en su medición, aunque no lo suficiente para ser descartada. Al completar este comportamiento con valores más consistentes, provocó un aumento substancial del coeficiente, incluso cambiando la orientación de la asimetría.

Para el resto de las estaciones que representaron diferencias substanciales, incluyendo la estación Sánchez MET 1702 y la estación El Limoncito 4982, se debió a lo opuesto, ya que la asimetría de las series originales era prácticamente nula, pero al completar los datos y extender la serie considerablemente, por naturaleza de los datos, el coeficiente empezó tender a un valor más característico. Otra comparación importante que fue realizada, verificando así la consistencia espacial del completado de todas las estaciones, consistió en trazar las isolíneas de precipitación (isoyetas) para la precipitación media anual de todas las estaciones en ambas series seleccionadas y completadas, para luego calcular la diferencia en precipitación y graficarlas como isolíneas de diferencia en precipitación.

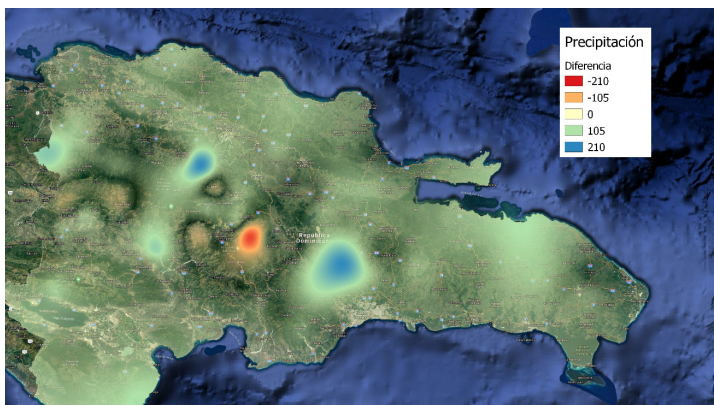


Ilustración - Diferencia de precipitación media anual entre Seleccionadas y Completadas.

Al analizar los resultados fue evidente que, en promedio y exceptuando algunas anomalías, hubo un ligero aumento de los niveles de precipitación en todo el territorio nacional. Las mayores diferencias se presentaron en la Cordillera Central, presentando incrementos de hasta 200 mm de precipitación total en algunas estaciones. Del mismo modo, aunque con mucho menor frecuencia, hubo estaciones que presentaron un descenso en los niveles de precipitación de hasta -200 mm.

No obstante, a estas diferencias en precipitación que refleja el análisis espacial, como lo refleja el análisis estadístico, el 99% de las estaciones presenta una variación en el valor de precipitación media anual inferior al 10%, manteniendo su consistencia. La única estación que presenta un cambio considerablemente mayor (17%) es la misma estación 0440 que refleja la anomalía en su asimetría. Incluso considerando todas estas diferencias, no fue posible encontrar razones suficientes como para considerar esta estación como inválida.

### Comparación de parámetros estadísticos de los caudales

Luego de realizar las simulaciones con el MPE de Témez, se procede a comparar los caudales registrados con los caudales simulados utilizando diferentes métodos. El proceso de simulación permite realizar una comparación sencilla contrastando la serie registrada con la simulada de forma paralela. Sin embargo, esta comparación visual ya se había apreciado durante la calibración, reflejando grandes diferencias entre los registros de forma puntual, aunque se seleccionaran los indicadores del método de forma satisfactoria.

Esta desincronización visual entre los registros se debe principalmente a la poca correlación entre

los registros de precipitación y los registros de caudal, la cual pudo ser causada por errores en los registros de medición foronómica y/o limitaciones de las estructuras de medición. En menor magnitud, la razón puede estar asociada a la variabilidad no considerada de los parámetros como la evapotranspiración, distancia entre estaciones, efectos orográficos sobre la precipitación, u otros factores fuera del alcance de la investigación.

No obstante, los registros reproducidos con el método consideran los parámetros de la serie real para generar un registro robusto y extenso que representa la realidad de la zona, aunque no necesariamente represente la historia real. Esto quiere decir que, aunque los caudales representados por estos registros simulados no sean los que realmente sucedieron, estos valores representan lo que muy probablemente sucedería dadas las condiciones climáticas e hidrológicas utilizadas. Como segundo paso se procede a comparar la extensión de los registros, ya que una de las grandes debilidades en el uso de estos datos es la reducida cantidad de años disponibles para realizar un análisis que pueda considerarse como representativo de la realidad.

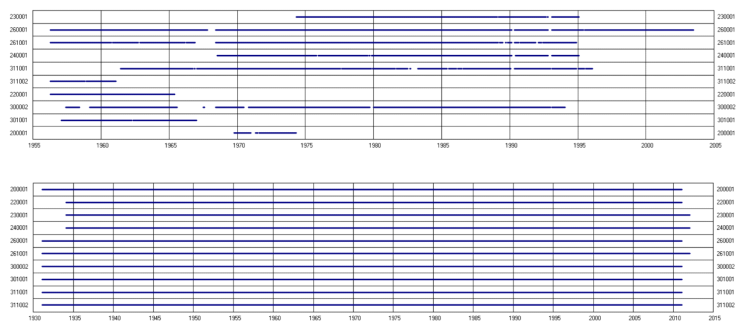


Ilustración - Comparación visual entre la extensión de las series de caudales registrados y los caudales simulados.

Los parámetros estadísticos principales como el valor medio, coeficiente de variación y el coeficiente de simetría son los más recomendados para comparar distintas características de cambio de comportamiento entre los caudales registrados y los simulados.

Tabla - Comparación entre los caudales medios registrados y los simulados.

Cuenca	Código	Registrado	Simulado	Variación
Anamuya-Anamuya	230001	1.15	1.18	2%
Chavón-Santa Lucía	260001	4.93	4.91	-1%
Chavón/Sanate-Guanito	261001	1.71	1.67	-2%
Duey-El Mamey	240001	1.56	1.22	-22%
Higuamo/Casuí-Excavación	311001	4.15	4.10	-1%
Higuamo/Casuí-Las Táranas	311002	4.42	4.81	9%
Maimón-La Guama I	220001	2.88	2.88	0%
Soco-Paso del Medio	300002	12.98	15.34	18%
Soco/Seibo-Isabelita	301001	1.82	1.64	-10%
Yabón-La Cruz	200001	9.55	9.43	-1%

Un aumento en el valor medio en la serie simulada se podría deber a que el periodo registrado por la estación de caudales coincidió con un periodo de baja precipitación. Del mismo modo, una reducción en el caudal medio de la serie simulada es muy probable que se deba a que los caudales registrados son representativos de un periodo de mucha precipitación.

Las variaciones entre los caudales registrados y los simulados son bajas, siendo Duey e Isabelita las únicas estaciones con variaciones cercanas al 20%. Es muy posible que estas estaciones hayan presentado los efectos mencionados anteriormente.

Otro parámetro para considerar es el coeficiente de variación. Este parámetro muestra, en promedio, que tan alejados de la media se encuentran los valores de la serie. Lo normal al aumentar considerablemente una serie es que este valor disminuya de forma substancial, debido a que

se amortiguan los valores de la serie. Un caso excepcional es cuando la serie original presenta muy pocos datos y ya inicia con un coeficiente de variación bajo, por lo que la serie tomaría la variación de la serie de calibración, que en este caso sería la precipitación. Esto es característico a los resultados obtenidos en los caudales simulados de la estación La Cruz.

Tabla - Comparación entre los coeficientes de variación de los caudales registrados y de los simulados.

Cuenca	Código	Registrado	Simulado	Variación
Anamuya-Anamuya	230001	0.73	0.26	-64%
Chavón-Santa Lucía	260001	0.60	0.35	-42%
Chavón/Sanate-Guanito	261001	0.58	0.35	-40%
Duey-El Mamey	240001	0.54	0.28	-48%
Higuamo/Casuí-Excavación	311001	0.45	0.41	-10%
Higuamo/Casuí-Las Táranas	311002	0.30	0.27	-9%
Maimón-La Guama I	220001	0.37	0.31	-18%
Soco-Paso del Medio	300002	0.59	0.34	-43%
Soco/Seibo-Isabelita	301001	0.43	0.24	-45%
Yabón-La Cruz	200001	0.18	0.28	60%

Por último, fueron evaluados los coeficientes de simetría, los cuales son indicadores del sesgo que tienen los registros a tender hacia los valores máximos o hacia los valores mínimos con respecto a la media. Al igual que con la variación, este parámetro debe reducirse considerablemente en la serie simulada, exceptuando en los casos en que la serie original ya haya tenido una excelente simetría, como en el caso de los datos de la estación Isabelita.

Tabla - Comparación entre la simetría de los caudales registrados y de los simulados.

Cuenca	Código	Registrado	Simulado	Variación
Anamuya-Anamuya	230001	1.27	0.45	-65%
Chavón-Santa Lucía	260001	1.58	1.36	-14%
Chavón/Sanate-Guanito	261001	1.15	0.46	-60%
Duey-El Mamey	240001	1.17	0.15	-87%
Higuamo/Casuí-Excavación	311001	2.40	0.78	-67%
Higuamo/Casuí-Las Táranas	311002	1.81	0.56	-69%
Maimón-La Guama I	220001	0.78	0.60	-23%
Soco-Paso del Medio	300002	1.27	0.70	-45%
Soco/Seibo-Isabelita	301001	0.33	0.56	67%
Yabón-La Cruz	200001	0.83	0.62	-26%

Basados en estos gráficos y estadísticas analizados, es evidente que los registros generados mediante el proceso de simulación son suficientes para realizar análisis de disponibilidad, regulación y tomar decisiones en cuanto al comportamiento de estos ríos.

#### • Conclusiones

Luego de completar los registros pluviométricos con el modelo bivariado se observa lo siguiente:

- Ligero aumento de las precipitaciones.
- Las mayores diferencias se presentaron en la Cordillera Central, con incrementos de hasta 200 mm de precipitación total en algunas estaciones.
- Con mucho menor frecuencia, algunas estaciones
- presentaron un descenso en los niveles de

---

precipitación de hasta 200 mm.

- 99% de las estaciones presenta una variación en el valor de precipitación media anual inferior a 10%, manteniendo su consistencia.

Al generar con el MPE los datos de caudal, se pasa de contar con apenas 30 o 40 años disponibles en el mejor de los casos, a contar con 80 años de datos de caudal, esto permite no solo realizar análisis de comportamiento con patrones mensuales bastante significativos, sino que también permitiría realizar proyecciones a futuro.

La variación de los caudales medios registrados versus los simulados se mantiene menor al 10% en el 90% de los casos. Los coeficientes de variación de los caudales simulados tienden a reducirse en comparación con los registro originales, indicando que los valores completados están más próximos a su propio valor medio. Los coeficientes de simetría de los valores completados también tendieron a la reducirse.

- Recomendaciones

Los datos resultantes tienen escala mensual, el uso de datos de caudal generados con esta escala puede presentar algunas desventajas, tales como:

- Pérdida de información detallada: Al utilizar datos de caudal a escala mensual, se pierde la información más detallada sobre las fluctuaciones diarias o incluso horarias en los caudales. Esto puede dificultar el análisis de eventos extremos, como crecidas repentinas o sequías prolongadas, que podrían tener impactos significativos en la gestión de los recursos hídricos.

- Dificultad para analizar eventos extremos: Los eventos extremos, como inundaciones o sequías severas, a menudo están asociados con periodos de tiempo más cortos. Utilizar datos mensuales puede dificultar la identificación y el análisis preciso de estos eventos, lo que limita la capacidad de comprender su naturaleza, duración y magnitud.
- Interpolación y extrapolación: Al trabajar con datos mensuales, es posible que se requiera realizar interpolaciones o extrapolaciones para obtener estimaciones de los caudales en periodos de tiempo más cortos o largos. Estas extrapolaciones pueden introducir incertidumbre adicional en los resultados y pueden no reflejar con precisión los flujos reales en esos periodos.

Se recomienda considerar estas limitaciones al interpretar y utilizar datos de caudal a escala mensual. Si es posible, complementarlos con datos de escala diaria u horaria puede brindar una visión más completa y precisa de los patrones hidrológicos en la región de estudio.

Otro aspecto importante para considerar en estudios futuros es la incorporación de las acciones antropológicas actuales, como las extracciones superficiales de agua y las extracciones de aguas subterráneas. Estas actividades humanas pueden tener un impacto significativo en los caudales de las cuencas y deben ser tomadas en cuenta para comprender el equilibrio hídrico y evaluar la sostenibilidad de los recursos hídricos.

Para abordar este aspecto, se requeriría realizar un recorrido exhaustivo por las cuencas de interés, donde se puedan identificar y mapear las diferentes

---

fuentes de extracción de agua. Además, sería necesario realizar encuestas en las comunidades que dependen del agua de estas cuencas para recopilar información sobre las extracciones superficiales y subterráneas realizadas por los usuarios.

Asimismo, sería valioso buscar información en las instituciones responsables de la gestión del agua en el país, como el Instituto Nacional de Aguas Potables y Alcantarillados (INAPA), el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INDRHI), el Instituto Agrario Dominicano (IAD) y otras entidades relacionadas. Estas instituciones pueden proporcionar datos y registros sobre las extracciones de agua autorizadas, los permisos de uso y los volúmenes extraídos en diferentes puntos de las cuencas.

Al considerar las acciones antropológicas, se puede obtener una visión más completa de la dinámica hídrica de las cuencas, permitiendo evaluar el impacto de las actividades humanas en los caudales y tomar decisiones informadas en la gestión de los recursos hídricos. Esto proporcionaría una base más sólida para el desarrollo de estrategias de manejo y conservación del agua en la región.

Realizar futuras investigaciones en el campo de la hidrología y recursos hídricos en la República Dominicana es de vital importancia debido a las deficiencias existentes en los registros de caudal y precipitaciones. A través de la recolección de datos más precisos y completos, podemos obtener una comprensión más sólida de los flujos de agua en todo el país, lo que permitirá una gestión más eficiente y sostenible de nuestros recursos hídricos. Por ello se recomienda priorizar como país, tener estaciones pluviométricas e hidrométricas midiendo y registrando datos continuamente.

Por último, pero no menos importante, se recomienda realizar estudios como este para

las demás regiones del país, con el fin de tener registros robustos a partir de los datos de lluvia y caudal registrados a lo largo de la historia del país.

- Referencias citadas

Álvarez, J. (2002). Completado de datos meteorológicos. Modelo CORMUL. Centro de estudios hidrográficos del CEDEX.

Álvarez, J., Sánchez, A., & Quintas, L. (2005). SIMPA, a GRASS based tool for hydrological studies. *International journal of geoinformatics*, 1(1), 1-13.

Asadi, H., Shahedi, K., Jarihani, B., & Sidle, R. C. (2019). Rainfall-runoff modelling using hydrological connectivity index and artificial neural network approach. *Water*, 11(2), 212.

Burbano, L. L., & Zarama, M. V. (1996). La importancia de la hidrología en el manejo de cuencas hidrográficas. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 14(1 y 2).

CEDEX. (2013). CHAC. CÁLCULO HIDROMETEOROLÓGICO DE APORTACIONES Y CRECIDAS MANUAL CHAC.

Cilek, A., Berberoglu, S., & Donmez, C. (2016). Evaluation of rainfall-runoff models for Mediterranean subcatchments.

Cocco Quezada, A. (1992). Análisis de las Sequias en la Republica Dominicana. Available in: <http://www.acqweather.com/ANALISIS%20DE%20LAS%20SEQUIAS.pdf> [Last access: October 12, 2017].

- Crawford, N. H., & Burges, S. J. (2004). History of the Stanford watershed model. *Water Resources Impact*, 6(2), 3-6.
- Doulgeris, C., Georgiou, P., Papadimos, D., & Papamichail, D. (2011). Evaluating three different model setups in the MIKE 11 NAM model. *Advances in the Research of Aquatic Environment: Volume 1*, 241-249.
- Franklin, J., Majure, L. C., Encarnación, Y., Clase, T., Almonte-Espinosa, H., Landestoy, M., Kratter, A. W., Oswald, J. A., Soltis, D. E., & Terrill, R. S. (2019). Changing ecological communities along an elevation gradient in seasonally dry tropical forest on Hispaniola (Sierra Martín García, Dominican Republic). *Biotropica*, 51(6), 802-816.
- Githungo, W., Otengi, S., Wakhungu, J., & Masibayi, E. (2016). Infilling monthly rain gauge data gaps with satellite estimates for Asal of Kenya. *Hydrology*, 3(4), 40.
- Hasan, M. M., & Croke, B. (2013). Filling gaps in daily rainfall data: A statistical approach.
- Larson, L. W., & Peck, E. L. (1974). Accuracy of precipitation measurements for hydrologic modeling. *Water Resources Research*, 10(4), 857-863.
- Lewis-Beck, C., & Lewis-Beck, M. (2015). *Applied regression: An introduction* (Vol. 22). Sage publications.
- Linsley, R. K., Kohler, M. A., & Paulhus, J. L. (1977). *Hidrología para ingenieros*.
- Nkuna, T. R., & Odiyo, J. O. (2011). Filling of missing rainfall data in Luvuvhu River Catchment using artificial neural networks. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 36(14-15), 830-835.
- Salinas-Tapia, H., Mejía, A. L. A., Lara, J. M. B., Aragón, J. A. G., & López-Rebollar, B. M. (2018). ESTIMACIÓN DE ZONAS DE ALTO RIESGO EROSIVO EN RÍOS PEQUEÑOS, UTILIZANDO UN MODELO HIDRÁULICO BIDIMENSIONAL.
- Singh, J., Knapp, H. V., Arnold, J. G., & Demissie, M. (2005). Hydrological modeling of the Iroquois river watershed using HSPF and SWAT 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 41(2), 343-360.
- Sorooshian, S., Duan, Q., & Gupta, V. K. (1993). Calibration of rainfall-runoff models: Application of global optimization to the Sacramento Soil Moisture Accounting Model. *Water resources research*, 29(4), 1185-1194.
- Témez, J. R. (1977). Modelo matemático de transformación precipitación-aportación. *Asociación de*