

Journal of Engineering Research

Acceptance date: 29/04/2025

PROPUESTA DE UN PROCEDIMIENTO PARA MEJORAR EL FUNCIONAMIENTO HIDRÁULICO DE LAS CUENCAS DE APORTE A LOS ALMACENAMIENTOS DE AGUA DENOMINADOS “AGUADAS” EN LA RBC (CAMPECHE)

Víctor M Ortiz Martínez

Universidad Nacional Autónoma de México,
Instituto de Ingeniería, México
Ciudad de México, México

Javier Osnaya Romero

Universidad Nacional Autónoma de México,
Instituto de Ingeniería, México
Ciudad de México, México

Jesús Gracia Sánchez

Universidad Nacional Autónoma de México,
Instituto de Ingeniería, México
Ciudad de México, México

Judith G Ramos Hernández

Universidad Nacional Autónoma de México,
Instituto de Ingeniería, México
Ciudad de México, México

All content in this magazine is
licensed under a Creative Com-
mons Attribution License. Attri-
bution-Non-Commercial-Non-
Derivatives 4.0 International (CC
BY-NC-ND 4.0).



RESUMEN: Se propone un procedimiento para revisar el funcionamiento de las cuencas de aporte de los almacenamientos de agua superficiales denominados “aguadas” en la Península de Yucatán, con objeto de mejorar su funcionamiento. En estos sitios el suelo es cárstico, con una alta permeabilidad y por lo mismo representa un problema para el llenado de las aguadas. Esto induce un problema en la disponibilidad de agua para la flora y fauna de la zona que las pone en peligro, por lo cual es necesario proponer soluciones para la mayor captación de agua de las aguadas, sin dañar el ecosistema.

PALABRAS-CLAVE: aguadas, cuencas hidrográficas

ANTECEDENTES

En la península de Yucatán, eventualmente en el suelo existen pequeños almacenamientos naturales de agua llamados “aguadas” que son como pequeñas lagunas (p.e. 90 000 m² de área) con algunos metros de profundidad (p.e. 6.00 m). El comportamiento hidráulico de estos sitios es simple, durante la época lluvias se almacena el agua y su nivel dependerá la lluvia ocurrida, de las extracciones realizadas y del agua almacenada. De tal manera que su llenado será variable año con año. En la Fig. 1 se muestra la panorámica de una “aguada”.

Las aguadas pequeñas pueden almacenar volúmenes del orden de los 60 m³ pero las mas grandes pueden ser del orden de 600 m³, por lo tanto la disponibilidad del agua durante los meses de sequía puede ser muy importantes. A pesar de las altas precipitaciones anuales, el agua puede volverse escasa durante los cuatro meses de la estación seca. Conviene hacer notar que uno de los principales efectos naturales que contribuyen a la disminución del volumen almacenado en las aguadas es la evaporación. En promedio la evaporación es del orden de 1.6 m mientras que la lluvia es del orden de los 1.00 m. por supuesto estos valores varían ampliamente de un año a otro.

PROBLEMÁTICA DE LAS AGUADAS

Una de las problemáticas de las aguadas radica en que se espera que su funcionamiento sea relativamente autosustentable, y que en cada año después de la época de lluvias se mantengan aproximadamente los mismos niveles para que se encuentren en equilibrio a lo largo de los años, sabiendo que las lluvias son variables año con año (Carrasco et al, 1996). Esto no ocurre así, porque al parecer el cambio climático está alterando esta variabilidad de las lluvias, además de que existe una explotación adicional de las aguadas realizada por los seres humanos.



Figura 1.- Vista general de una aguada.

DESCRIPCIÓN TÉCNICA DE LA PROBLEMÁTICA

En este trabajo se aborda la problemática de determinar la hidrología de las aguadas, lo cual en principio no representa ningún problema técnico no abordado, sin embargo, lo peculiar de las cuencas de aportación hacen que vuelva un problema muy importante porque son zonas muy “planas”, con una extensa vegetación, que tienen una infiltración muy alta y por lo tanto los escurrimientos son muy bajos. Pero lo más peculiar son las características de las cuencas. En la Fig. 2 se presenta la topografía de una de ellas, como se observa las diferencias de nivel son muy pequeñas y se

forman varias subcuencas, por lo cual cuando se alcanzan ciertos niveles del agua, puede existir comunicación de unas con otras. Entonces dan la impresión de formarse “charcos” intercomunicados, en donde, al terminar la lluvia, reconocen hacia el “charco” más bajo, donde se almacenará finalmente el agua escurrida y esto forma una “aguada”. Sin embargo, la infiltración en las laderas y los cauces son muy altas por lo cual los escurrimientos son muy bajos.

Según el funcionamiento explicado en el párrafo anterior, es fácil comprender cuales pueden ser las soluciones para mantener el mayor volumen de las aguadas, que específicamente consisten desde el punto de vista físico, en aumentar el caudal aportado por las cuencas hacia las aguadas y luego garantizar su estanqueidad.

Específicamente en la Reserva de la Biosfera de Calakmul (RBC), las aguadas tienen como principal función servir para el consumo de los animales de la reserva, si bien ya se han encontrado casos donde se usan para consumo humano, lo cual ha repercutido en su agotamiento, comprometiendo el uso para la fauna local.

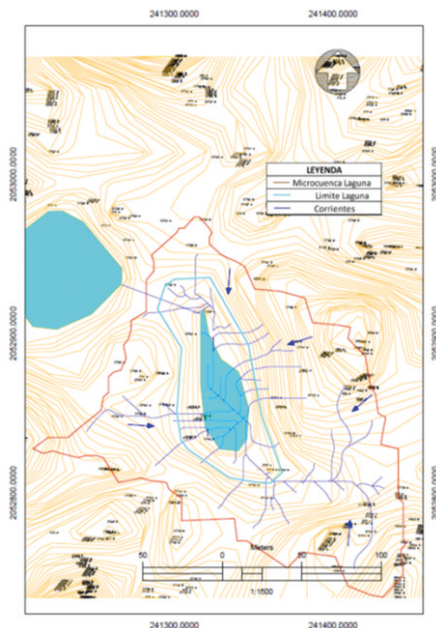


Figura 2.- Topobatimetría de la aguada.

CÁLCULO DE LA LLUVIA APROVECHABLE

Existen diversos criterios teóricos para evaluar la lluvia infiltrable, la cual, en algunos casos se denomina también “lluvia aprovechable”. En la literatura sobre el tema se proponen diferentes criterios para determinar de la lluvia neta, la que puede escurrir, y por lo tanto se puede calcular la que se infiltra. En este trabajo se emplea un criterio sencillo para la determinación de la lluvia infiltrable propuesto por el USBR (Mc Cuen, 1989). Y por lo tanto la diferencia entre la lluvia neta y la infiltrable es el valor del escurrimiento hacia las aguadas.

Debe ser claro que el uso del agua por parte de los habitantes de la península en la época prehispánica es un misterio y queda sujeta a estudios futuros (Weiss-Krejci E, 2000, Weiss-Krejci, E, y Sabbas T, 2002). Pero una teoría interesante es que el uso de las aguadas, fue un factor preponderante en la civilización Maya. Las pequeñas depresiones llamadas aguadas son una característica frecuente en la península de Yucatán. Aunque generalmente existen restos de antiguos almacenamientos (cisternas) de agua estacionales, estas no se han estudiado a fondo.

Volviendo al caso que aquí interesa en cuanto al funcionamiento de las aguadas para el uso de la fauna y flora locales, en este trabajo se presenta la propuesta de un procedimiento para revisar y evaluar su funcionamiento dadas las peculiaridades señaladas antes.

DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE UNA AGUADA

En la Fig. 1 se muestra la vista general de una aguada y en la Fig. 2 se presenta el plano de la misma aguada mostrando los detalles de la cuenca de aporte. Como se observa, se notan dos peculiaridades importantes, una la escasa variación de los niveles y otra la formación de

subcuencas interconectadas en su interior. Lo anterior, cuando llueve, da la impresión de ser “charcos” que están interconectados entre sí o sean pequeñas elevaciones que reconocen un solo cauce hasta el punto más bajo que es el sitio donde se forma la aguada. Nótese que el funcionamiento del sistema de “charcos” durante una lluvia, es el siguiente, con la lluvia se van llenando los diferentes “charcos” y escurrirán cuando su cota más baja pueda alcanzar la de un cauce que es común a todos y que llega hasta la aguada. Entonces, mientras ocurre este funcionamiento, el agua de lluvia se infiltra con tasas muy altas en las laderas debido a las características del suelo kárstico. Una vez que cesa la lluvia el agua en los charcos también se infiltrará o drenará y sólo quedará el agua almacenada en las aguadas.

La descripción del funcionamiento propuesto en el párrafo anterior, es muy importante porque ello permite entender las posibles soluciones para el mejoramiento de las aguadas. Se vislumbran varias alternativas, una consiste en aumentar el escurrimiento hacia la aguada, lo cual puede lograrse aumentando la tasa de escurrimiento superficial, que puede hacerse disminuyendo la velocidad de infiltración en de las laderas.

PROPUESTA DE UN CRITERIO PARA SIMULAR EL FUNCIONAMIENTO DE UNA AGUADA

- 1) Determinar la topobatimetría de la aguada y su cuenca de aporte

Esta aparentemente debería ser una de las tareas más sencillas a realizar, sin embargo, en el caso de las selvas de RBC esta es una de las tareas más complejas, ya que los desniveles del suelo no son muy grandes pues son suelos casi planos y no es fácil determinar los parteaguas debido a la espesa vegetación. Si bien existen en la actualidad diferentes técnicas como son el LIDAR, el levantamiento satelital, los SPM,

etc. No siempre la información esta disponible y en ocasiones sólo los trabajos de campo son la alternativa, con las consecuentes dificultades y costos. En este trabajo se empleó información LIDAR del tipo terreno, el cual se obtienen de una nube de puntos ajustada al terreno mediante procesos geodésicos; de esta se seleccionan aquellos puntos que corresponden únicamente al terreno, a esta nube, se le aplica una interpolación a los puntos clasificados obteniendo y habiendo eliminado los puntos que no pertenecen al terreno, como los reflejados por infraestructura, vegetación, objetos aéreos como nubes y pájaros; generando un modelo digital de elevaciones de tipo terreno con una resolución horizontal de 5 m. Los datos LIDAR utilizados en este trabajo se obtuvieron de la página del INEGI; se procesaron en el paquete de acceso libre QGIS 2.28, del cual se obtienen (con ayuda de herramientas de software) curvas de nivel (x, y, z), y se determina la microcuenca de la aguada, escorrentía y una vez analizada la superficie de estudio, se procesa para obtener archivos con extensión .DXF, y las imágenes correspondientes a la superficie. En la Fig. 3, se observa la cuenca RH33Ad (de archivos de INEGI), mientras que en la Fig. 4 se observa la microcuenca de la aguada y donde se precisan las curvas de nivel con datos LIDAR con resolución de 1 segundo de arco (1 arc second) del software Global Mapper, en el cual se obtuvieron y compararon las curvas de nivel obtenidas de ambos paquetes. En las Figs. 2 y 4 se observa la microcuenca, así como las curvas de nivel, que son la batimetría de la cuenca en estudio y los principales elementos hidráulicos. En cuanto a la batimetría de la aguada esta se obtuvo también del levantamiento LIDAR, empleando curvas de nivel a cada 0.2 m, procesadas con QGIS.



Figura 3.- Cuenca región de estudio, INEGI.



Figura 4.- Región de estudio, INEGI

2) Para diferentes condiciones de lluvia, calcular la infiltración y el escurrimiento en la cuenca de aporte y en la aguada.

Empleando un criterio lluvia-escurrimiento, determinar para los datos de lluvia disponibles los escurrimientos correspondientes. Existen diferentes criterios para valuar esta relación, aquí se propone emplear uno de los más conocidos, como lo es el método del USBR

en Metselaar, K. (2023) , sin embargo, se hace notar que existen una gran cantidad de procedimientos que podrían aplicarse, entre los que destacan por ejemplo el de Green & Ampt (Mein y Larson, 1973). Por supuesto, el lector puede emplear cualquiera de ellos.

3) Simular el funcionamiento de la aguada para diferentes condiciones de lluvia y evaporación.

Para las diferentes condiciones de lluvia estudiadas, simular el funcionamiento de “vaso” de la aguada sabiendo que uno de los factores más importantes es la evaporación en la aguada, por lo cual se requerirán los datos de la misma.

4) Análisis de resultados del funcionamiento de la aguada.

Del funcionamiento de la aguada para el registro histórico analizado, determinar la conveniencia de aumentar su volumen almacenado. Nótese que en esto influirá el número de años en la aguada se seque o tenga niveles mínimos. También obsérvese que en este punto se puede decidir si es factible utilizar a la aguada para otros fines que no sean el de la flora o la fauna natural, como es el consumo humano o para riego.

5) Revisar el estado físico de la aguada para determinar posibles pérdidas por el fondo o sus paredes.

6) Plantear los ajustes y adaptaciones de las cuencas de aporte necesarios.

7) En el vaso de la aguada realizar las reparaciones necesarias para garantizar su estanqueidad. Para tal fin existen una gran cantidad de trabajos en la literatura que pueden ayudar en tales labores, por ejemplo, Palma et al, 2011. Se hace notar que los trabajos de diseño y/o rehabilitación de almacenamientos de agua (como las aguadas) es una práctica común en la Ingeniería Civil. Sin embargo, se requieren además de los datos hidrológicos, estudios de detalle de topografía y muestreos de geotecnia.

CRITERIO DEL USBR

Existen diversos criterios teóricos para evaluar la lluvia infiltrable, la cual, en algunos casos se denomina también “lluvia aprovechable”. En la literatura sobre el tema se proponen diferentes criterios para determinar de la lluvia neta la que puede escurrir, y por lo tanto también se puede calcular la que se infiltra. A continuación, se presenta un criterio sencillo para la determinación de la lluvia infiltrable propuesto por el USBR (Metselaar, 2023) y por lo tanto el escurrimiento directo (Q en mm) que es el factor que importa para este trabajo. La lluvia neta se representa a través de (P), en mm.

DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO:

1. Se determina el valor del factor , el cual toma en cuenta el uso del suelo, tratamiento del terreno (surcos, terrazas, etc.), pendiente y el tipo de suelo (desde arenoso A, hasta arcilloso D), (McCuen R H, 1989). Para el caso específico de los suelos cársticos, su valor puede oscilar el valor de entre 10 y 40, pero convendría realizar experimentos en campo para afinar estos valores.

2. Se corrige el valor de multiplicándolo por el factor correspondiente a la precipitación antecedente que se muestra la Tabla 1, de la siguiente manera:

Si 5 días antes hubo lluvia	menos de 2.5 cm	Corrección A
	entre 2.5 y 5 cm	Sin corrección
	más de 5 cm	Corrección B

N	Corrección A	Corrección B
10	0.40	2.22
20	0.45	1.85
30	0.50	1.67
40	0.55	1.50
50	0.62	1.40
60	0.67	1.30
70	0.73	1.21
80	0.79	1.14
90	0.87	1.07
100	1.00	1.00

Tabla 1. Factores de corrección del número de escurrimiento N, según la precipitación antecedente

3. Se calcula el parámetro (en mm) con la siguiente ecuación:

$$S = \frac{25400}{N} - 254 \quad (1)$$

4. Con el valor de (S) y la precipitación total (P), ambos en milímetros, y empleando la Ec. 2, se obtiene el valor de la lámina de escurrimiento directo (Q), en milímetros.

$$Q = \frac{(P-0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad (2)$$

donde:

Q lámina de escurrimiento directo, en mm

P precipitación, en mm

P diferencia potencial máxima entre la lluvia y el escurrimiento en mm, empezando al iniciarse la tormenta.

Hay que considerar que el método propuesto por el USBR, también tiene la consideración que para que ocurra el escurrimiento, se debe cumplir la Ec. 3.

$$P \geq 0.2 \left(\frac{25400}{N} - 254 \right) \quad (3)$$

SELECCIÓN DEL NÚMERO DE ESCURRIMIENTO (N)

El número del escurrimiento “N” se puede obtener de las tablas correspondientes de la ref. McCuen, 1989. No se incluyen en este trabajo porque son muy extensas, pero además de la referencia indicada, existen otras publicaciones en donde se pueden obtener fácilmente, dado lo común del empleo del método del USBR.

DETALLE SOBRE EL USO DE LA EC. 2 DEL USBR

Es importante señalar que se debe tener especial cuidado sobre el uso de la Ec. 3, ya que no es una ecuación lineal y por lo tanto en ciertos rangos puede ofrecer resultados especiales. Para precisar esto considérese la gráfica de la Fig. 5 donde en el eje horizontal se han indicado algunos valores de lluvias pequeñas y en el vertical se presentan los valores de el escurrimiento Ec. 3 para diferentes valores de . En la misma gráfica se ha indicado una línea de 45° (punteada) para representar la línea donde los valores de ambos ejes son iguales. Evidentemente esta sería la condición donde la lámina de lluvia es igual que la del escurrimiento, es decir no hay infiltración. El detalle más relevante que se desea resaltar es que en estos rangos, existen valores de la lámina del escurrimiento son mayores que el de la lluvia, lo cual evidentemente no puede ocurrir en la realidad. Este es el efecto indeseable de la aproximación no lineal de la Ec. 3, por lo cual habrá que tomar esta posible ocurrencia en el cálculo, considerando que en el peor de los casos el escurrimiento es igual a la lluvia.

ECUACIÓN DE CONTINUIDAD PARA EL DISEÑO DE AGUADAS

El modelo básico para realizar la simulación de una aguada se puede sintetizar según Ec. 4.

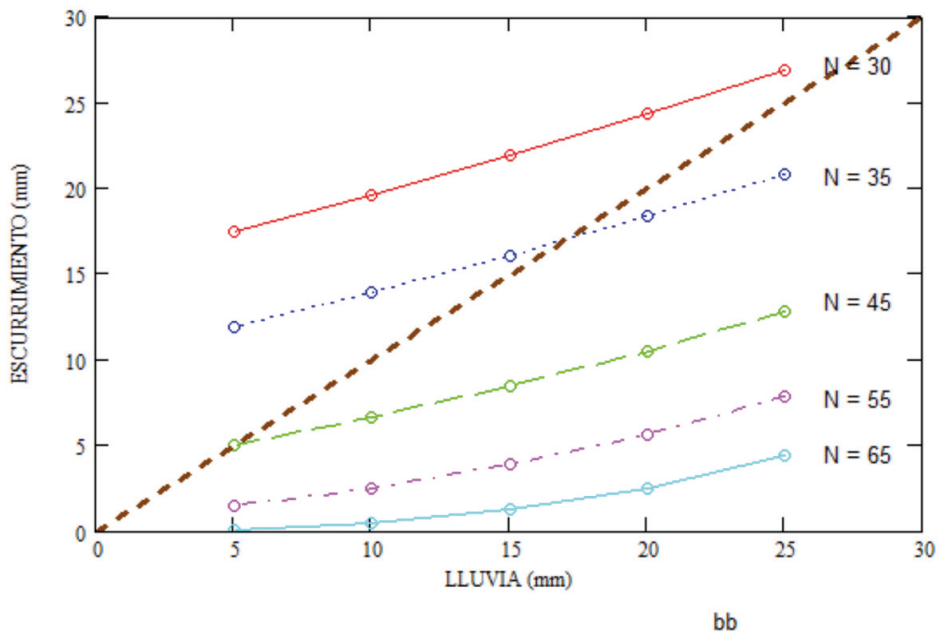


Fig. 5 Relaciones Lluvia escurrimiento para valores pequeños de lluvia.

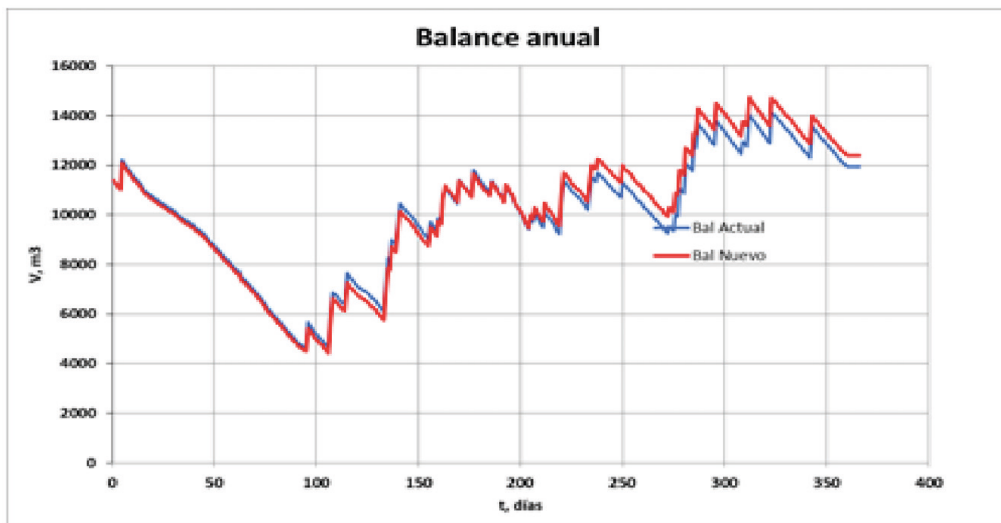


Fig. 6 Resultados de la simulación anual de una aguada.

$$V_{i+1} = V_i + Q_i - E_i \quad (4)$$

donde:

V_{i+1} volumen almacenado en el día $i+1$ (nuevo), en m^3 .

V_i volumen almacenado en el día i (anterior), en m^3 .

Q_i escurrimiento en el día i (anterior), en m^3 .

E_i evaporación en la aguada en el día i (anterior), en m^3 .

La forma de aplicar la Ec. 4 es la siguiente: para un registro de datos de lluvias y evaporaciones, partiendo de un volumen inicial en la aguada, calcular para cada día del registro, el aporte de las lluvias al escurrimiento mediante la Ec. 2 y la evaporación en la aguada para ese día. Realizando esta sencilla operación será posible disponer de la evolución de los volúmenes en la aguada para todo el registro disponible.

EJEMPLO DEL EMPLEO DEL PROCEDIMIENTO PROPUESTO PARA LA SIMULACIÓN DE AGUADAS

Con los datos diarios antes señalados, se realizó una simulación diaria de el escurrimiento producido por la lluvia en la cuenca en estudio empleando la Ec. 4. Con el escurrimiento calculado se procede a realizar el balance en la aguada considerando el escurrimiento entrante y la evaporación ocurrida en la aguada durante ese día. Se repite el cálculo para cada día y se procede así durante todo el tiempo del registro.

En la Fig. 6 se pueden observar los volúmenes en la aguada calculados. Se observará que existen dos líneas, una (azul) corresponde a las condiciones actuales de la aguada y la otra (roja) a la simulación realizada suponiendo que se aumenta el índice del escurrimiento en una subcuenca de área del 10% de la cuenca total de aporte a la aguada.

Como puede observarse, en la simulación realizada se propone un volumen inicial en la aguada. Luego se calcula la simulación diaria y se obtiene un volumen final en la aguada. Al aumentar la infiltración en la subcuenca del 10% del área total se observa que se finaliza con un volumen mayor en la aguada.

Respecto de los valores numéricos, se obtuvo lo siguiente:

Lluvia total 1200 mm
Lluvia escurrida con N original... 655 mm
Lluvia escurrida con N modificada en el 10 % de la cuenca 700 mm
Pérdida por evaporación en la aguada 1600 mm

Como se puede observar, el procedimiento de cálculo propuesto permite determinar el comportamiento de una aguada. Evidentemente si se simula un registro histórico de datos (varios años) se podrá tener una mejor perspectiva del comportamiento a largo plazo del comportamiento de la aguada.

Se hace notar que del análisis de los resultados anteriores se puede detectar la extracción extraordinaria del agua, si es que esta ocurre.

CONCLUSIONES

Se presenta un criterio para evaluar el comportamiento de las aguadas en la RBC de Campeche. Este criterio se apoya en trabajos existentes de relaciones lluvia escurrimiento en particular uno muy empleado que es el del USBR. Sin embargo, el trabajo que se presenta incorpora un nuevo concepto para analizar las aguadas y es lo referente a la selección de la topografía, ya que las cuencas de aporte de estas presentan un comportamiento muy característico en el suelo kárstico de la península de Yucatán. En este tipo de suelo la permeabilidad es muy alta y el poco escurrimiento que se produce ocurre en topografías prácticamente planas por lo cual se forman cauces que parecen “charcos” y el agua se almacena en el charco final que se encuentra más bajo formando así una aguada. Esta peculiar forma en que ocurre el escurrimiento conduce a que se puedan pensar en soluciones prácticas que mejoren el funcionamiento de las aguadas, el cual será en esencia el aumentar el coeficiente de escurrimiento o realizar la interconexión de “charcos” que permitan almacenar más agua en el almacenamiento (aguada) más lejano.

Evidentemente existen otras medidas como el uso de impermeabilizaciones sintéticos para aumentar el escurrimiento, por supuesto también pueden ser una solución, pero independientemente de su costo, son generalmente alternativas poco amigables con el medio ambiente. De hecho, en los sitios donde se aumenta ligeramente el escurrimiento, se ha observado que el valor de (en criterio del USBR) puede cambiar de 40 a 30 aumentando entonces el valor del escurrimiento. Conviene aquí señalar que solo mejorando el aporte de agua en un área del 10 % de la cuenca, puede repercutir en un aumento del 6% de escurrimiento y por lo tanto se aumentará el de aporte a la aguada.

REFERENCIAS

Carrasco D. M. R. y Folan, W. J. (1996). **Calakmul, México: aguadas, bajos, precipitación y asentamiento en el Petén campechano**. In IX Simposio de Investigaciones Arqueológicas en Guatemala, editado by Juan Pedro Laporte and Hector L. Escobedo, pp. 171–193. Museo Nacional de Antropología y Etnología.

Martinez E y Galindo C, (2002), **La vegetación de Calakmul Campeche, Mex.**: Clasificación, descripción y distribución, Boletín de la Sociedad Botánica de México 71: 7-32, DOI: 10.17129/botsci.1660.

McCuen R H, (1989), **Hydrologic Analysis and design**, Prentice Hall New Jersey.

Mein y Larson, (1973). "Modeling infiltration during steady rain." Water Resour. Res., 9(2), 384–394

Metselaar, K. (2023). **The NRCS curve number equation derived from an instantaneous unit hydrograph: Some consequences**. Journal of Hydrology X, 19, Article 100151. <https://doi.org/10.1016/j.hydroa.2023.100151>

Palma E et al., 2011, **¿Cómo construir mejores aguadas para el suministro de agua al ganado?**, 1 ed. Serie técnica. Manual técnico / CATIE, No. 101, ISBN 978-9977-57-537-7, Turrialba, 58 p.

Weiss-Krejci, Estella 1997 **Ancient Water Storage Facilities in the Maya Lowlands**. 1997 Report. Manuscript on file at the Austrian Science Foundation FWF, Vienna, Project No. P12256-SPR.Google Scholar

Weiss-Krejci, Estella 2000 **Investigating Depressions. La Milpa Archaeological Project**, Report 2000, K-Operations. Manuscript on file at Department of Archaeology, Boston University.Google Scholar

Weiss-Krejci, Estella, and Thomas Sabbas, 2002. The Potential Role of Small Depressions as Water Storage Features in the Central Maya Lowlands. Latin American Antiquity, vol. 13, no. 3, pp. 343–57. JSTOR, <https://doi.org/10.2307/972115>.