ESTIMACION DE CAUDALES Y SEDIMENTOS EN LA CUENCA DEL RIO CHAGUANA, MEDIANTE EL MODELO MATEMATICO AVSWAT

Jimmy Bonini Avilés[1], Edwin Guzmán Cáceres[2], David Matamoros Campusano[3]

[1] Ingeniero Civil 2003
[2] Ingeniero Civil 2003
[3] Director de Tesis. Ingeniero en Geotecnia, Escuela Superior Politécnica del Litoral, 1987. Masterado EEUU, Universidad de Nueva Orleáns, 1995. Profesor de ESPOL desde 1995

RESUMEN

La finalidad de este trabajo es presentar una herramienta de apoyo que ayudará a determinar caudales y sedimentos en una cuenca hidrográfica, los cuales son de mucha importancia en un proyecto hidráulico. Además, este modelo hidrológico fue seleccionado ya que puede ayudar a predecir posibles impactos en una cuenca debido al uso de suelo y aporte de sedimentos a un cauce. Teniendo en cuenta la carencia de datos que existen en el país como son precipitaciones diarias, caudales medidos y otros parámetros hidrológicos los resultados en este estudio son bastantes alentadores en el uso del SWAT. El caso de estudio es la cuenca del Río Chaguana, sub-cuenca del Río Pagua al norte de la provincia de El Oro.

INTRODUCCIÓN

Este estudio se logro desarrollar para la obtención del Titulo de Ingeniero Civil de Bonini J. y Guzmán E., además, como parte del proceso de obtención de la una Tesis Doctoral financiada por el VLIR. (2004).

Todos los proyectos hidráulicos en el mundo necesitan como base varios parámetros y uno en particular es el caudal. Debido a que no todos los ríos en el mundo cuentan con una estación que lo mida, se esta optando en la actualidad por aplicar modelos matemáticos que puedan predecirlo.

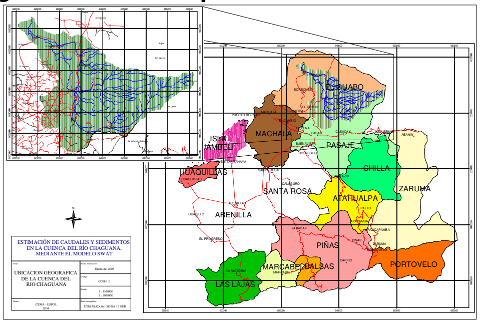
Un modelo matemático para simulación de parámetros hidráulicos e hidrológicos, brinda la posibilidad de simular los posibles escenarios que se producirían en una cuenca hidrográfica, que afectarían a uno o varios de los procesos físicos que intervienen en dicha cuenca. La implantación de obras de captación, corrección de cauces, la urbanización, el cambio del uso de suelo, entre otros, son hechos que afectan directamente el movimiento y la producción del agua en una cuenca hidrográfica.

Para la implementación de un modelo hidrológico para la cuenca del río Chaguana, se ha escogido el modelo matemático SWAT, que por sus características de funcionamiento permitirá analizar caudales y sedimentos en la cuenca.

UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El presente estudio se realiza en la cuenca del Río Chaguana, ubicada en la Provincia de El Oro-Ecuador, cubriendo parte de los cantones El Guabo (76.87%) y Pasaje (21.33%). La cuenca se encuentra ubicada entre las coordenadas 617.965 a 625.205 ESTE y 9'632.773 a 9´660.403 Norte, con un área de 322.134 Km² y una elevación que varia desde 0 m.s.n.m hasta 3.238 m.s.n.m.
En la Figura 1, se observa la ubicación geografica de la cuenca del Rio Chaguana en el plano general de la provincia de El Oro.

Figura 1. Ubicación geográfica de la cuenca del Río Chaguana en el plano general de la provincia de El Oro



Fuente: CEMA-ESPOL 2002

EL MODELO SWAT

El Soil and Water Assessment Tool (SWAT) es un programa de modelamiento hidrológico diseñado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos en conjunto con la Universidad de Texas (Arnold et al, 1990). Este modelo permite simular la producción de agua y sedimentos en cuencas hidrográficas, así como el efecto que en la calidad del agua tienen las practicas agrícolas por el uso de pesticidas y fertilizantes.

El SWAT se basa en un balance hídrico para determinar la entrada, salida y almacenamiento de agua en la cuenca. Para la simulación, la cuenca hidrográfica se divide en pequeñas subcuencas con el fin de mejorar la exactitud de los cálculos. Adicionalmente el SWAT trabaja por unidades de respuesta hidrológica (HRU) obtenidas del cruce de los diferentes tipos de suelo (textura), con el uso y cobertura del suelo. La simulación de la hidrología de la cuenca puede separarse en dos grandes divisiones: la primera división es la fase terrestre del ciclo hidrológico que controla la cantidad de agua, sedimento y pesticidas transportados al canal principal por cada subcuenca y la segunda es la del agua o la fase de tránsito la cual puede definirse como el movimiento del agua, sedimentos, etc, a través de la red del canal hasta el sitio de descarga de la cuenca.

El ciclo hidrológico simulado por el AVSWAT está basado en la ecuación del balance hídrico:

$$SW_t = SW + \sum (R_i - Q_i - ET_i - P_i - QR_i)$$

Donde, SW_t es la cantidad final de contenido de agua en el suelo (mm), SW es la cantidad inicial de contenido de agua en el suelo (mm), t es el tiempo en días, R_i es la cantidad de lluvia caída en el período de análisis (mm), Q_i es la cantidad de escorrentía (mm), ET_i evapotranspiración (mm), P_i percolación (mm), QR_i flujo de retorno (mm).

Una vez que el AVSWAT determina las cargas de sedimentos, nutrientes y pesticidas en el agua del cauce principal, las cargas son transitadas a través de la red de canales de la cuenca. Adicionalmente para mantener el rastro del contaminante en la masa de flujo del canal, el modelo simula la transformación de químicos en el río y en el lecho del mismo.

METODOLOGÍA

El primer paso para la implementación es la recolección de la información topográfica, de tipos y uso actual de suelos.

Para este trabajo la topografía se la obtuvo a partir de la digitalización de planos topográficos IGM 1:50000. Un procesamiento posterior usando el SIG ayudo a determinar la ubicación aproximada de los cauces. La información del suelo fue generada a partir de una campaña de muestreo de suelos y posterior análisis en el laboratorio (Matamoros D. et al, 2001). La información de uso de suelo fue administrada por el Clirsen, 2001.

Las estaciones meteorológicas consideradas para este estudio son Machala, Pagua y Pasaje de la red del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI). Además para fines de calibración se recolectó la información de caudales medios mensuales en dos estaciones limnimétricas localizadas en el interior de la cuenca, los Registros datan desde enero de 1978 hasta marzo de 1982.

Con la información de suelos recopilada, el SWAT define las Unidades de Respuesta Hidrológica. La información meteorológica genera estocásticamente los valores de precipitación y temperatura más probables, para ser usados en caso de no contar con información completa. Con los datos de las estaciones anteriormente mencionadas, se generaron todos los datos necesarios que requiere el modelo matemático como datos de entrada y se generan registros mensuales de caudales que deben ser comparados con los valores reales de caudal medidos en la estación de aforo. Las diferencias entre lo simulado y lo observado sirve para proceder a calibrar el modelo y de esta manera poder simular un registro histórico.

PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN DE TIPO DE SUELO

Para el presente estudio se realizó la clasificación del suelo mediante el procesamiento de la siguiente información:

a. Análisis granulométrico de cada estrato constitutivo del suelo, para obtener porcentajes de arena, limo y arcilla.

b. El grupo Hidrológico del suelo (A, B, C y D), según la metodología del número de la curva del U. S. Soil Conservation Service, parámetro que se obtuvo en base a la conductividad hidráulica saturada en la capa de suelo de 0 a 0.5 m (Chow, 1994).

c. La erodabilidad[1] es calculado en base a la ecuación propuesta por Wischmeier y Smith, en la que K es el índice de erodabilidad en el que se selecciono un valor de 0.014 (USDA-ARS, 1996).

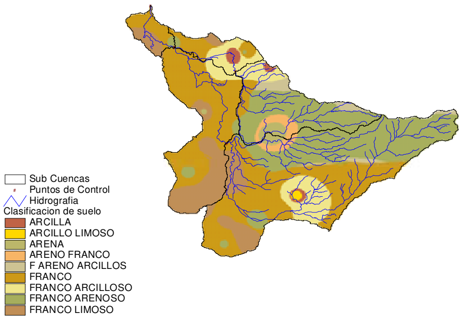
d. La densidad aparente (BD) que es la relación entre la masa de suelo seco y su volumen total.

e. La conductividad hidráulica definida como la medida de la capacidad del suelo para permitir el paso del agua.

[1] La erodabilidad del suelo se define como la resistencia del suelo a ser erosionado por el golpe directo de las gotas de lluvia

El mapa de los tipos de suelo se presenta en la figura 2.

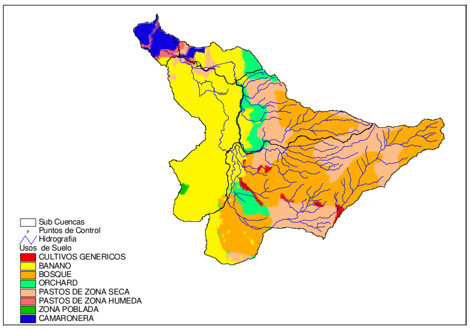
Figura 2. Tipos de suelo en la cuenca del Río Chaguana



PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN DE USO DE SUELO

La información que el SWAT requiere sobre uso de suelo, se la tomó de la base de datos del programa en el que constan los 100 tipos de cultivo más comunes, los que son acoplados a los que existen en la cuenca en estudio. Cabe señalar que algunos parámetros específicos para el banano fueron obtenidos gracias a una comunicación directa con uno de los desarrolladores del modelo (Dr. Jim Kiniry). El mapa de uso de suelo utilizado en el modelo se muestra en la Figura 3.

Figura 3. Uso actual del suelo en la cuenca del Río Chaguana



PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN METEOROLÓGICA

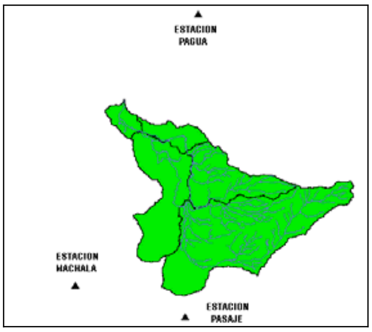
Se seleccionaron tres estaciones meteorológicas del INAMHI, recopilándose la información histórica con periodos variables, a fin de alimentar la base de datos del Generador de Clima del SWAT. Las estaciones seleccionadas con las coordenadas se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Estaciones meteorológicas usadas en la modelación de la cuenca del Río Chaguana y sus respectivas coordenadas

Estación:	**Pasaje**	**Pagua**	**Machala**
Coordenada este	635327.37	636936	621503.92
Coordenada norte	9631873.94	9669648.4	9635790.31
Elevación	40.0	13.0	13.0
Años de precipitación	13	14	14

En la Figura 4 se muestra la ubicación de las estaciones meteorológicas cercanas a la cuenca del Río Chaguana.

Figura 4. Ubicación geográfica de las estaciones cercanas a la cuenca del Río Chaguana



La información meteorológica que el modelo requiere comprende:

a. Número de años con información de precipitaciones

b. Coordenadas geográficas y/o proyectadas en algún sistema de coordenadas estándar (para Ecuador se uso UTM – PSAD56 – Z 17 S)

c. Elevación donde encuentran localizadas las estaciones meteorológicas

d. Promedio de temperatura máxima y mínimas que se producen en el mes y sus respectivas desviaciones estándares

e. Precipitaciones diarias (mm); en el caso de no existir esta información, se deberá de estimar un promedio de precipitación diaria a partir de las precipitaciones mensuales, además, de la desviación estándar de la precipitación diaria y el coeficiente de asimetría de Pearson de dichas precipitaciones.

   No se han considerado los registros de precipitaciones mensuales en las épocas de El fenómenos de El niño; estos registros se los ha considerado valores fuera de los parámetros normales. Además, los promedios anuales se los obtiene con la mediana, esto asegura que no se consideran los valores aberrantes.

f. La probabilidad de tener un día húmedo después de uno seco y la probabilidad de tener un día húmedo luego de un día húmedo, a partir del número de precipitaciones en el mes.

g. Promedio del numero de precipitaciones en el mes.

h. Para obtener las lluvias máximas en media hora a partir de las lluvias máximas de 24 horas se empleo el método de las Relaciones Universales; el cual establece que los valores lluvia máxima de 24 horas deben convertirse en lluvia máxima diaria multiplicando por un factor de 1.20. Posteriormente se analiza la frecuencia de valores empleando una distribución Gumbel Tipo I, de uso común para eventos extremos. El método de las Relaciones Universales establece que para un periodo de retorno de 2 años se puede emplear el coeficiente de 0.435 que al multiplicarse por la lluvia máxima diaria nos proporcionaría la lluvia máxima en una hora y a su vez si a la lluvia máxima de 1 hora se la multiplica por un factor de 0.79 se puede obtener la lluvia máxima para 0.5h. (Montoya A., 1973)

i. El programa requiere el promedio de la radiación solar para el mes, valor que no está disponible para ninguna estación en las cercanías de la cuenca, por esta razón se determinó este parámetro en base a la heliofanía. La ecuación usada en la siguiente:

$$H_{MX} = 30.0E_0\left(\varpi T_{SR} sen\delta sen\phi + \cos\delta\cos\phi sen(\varpi T_{SR})\right)$$

donde H_{MX} es la máxima radiación solar alcanzada en un punto cualquiera de la tierra (MJ m^{-2} hr^{-1}), E_0 el factor de corrección por la excentricidad de la orbita de la tierra, ω es la velocidad angular de la tierra (0.2618 rad h-1), T_{SR} la hora en que amanece, δ es la declinación solar en radianes, y ϕ es la latitud geográfica en radianes; este análisis se encuentra ampliamente desarrollado en el Manual teórico del SWAT (Neitsch S. L. et al, 2002).

j. Finalmente se necesita el promedio de la velocidad del viento y el punto de rocío mensual.

CAUDALES OBSERVADOS

Con la finalidad de calibrar el modelo, se recopilaron los caudales medios mensuales observados en las estaciones limnimétricas ubicadas junto a la carretera Guayaquil-Machala y que interceptan con el Río Zapote y el Río Chaguana, las cuales llamaremos Estación Zapote y Chaguana respectivamente, estas estaciones solo cuentan con un limitado número de registros entre los años 1978 a 1981.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

La aplicación del modelo permitió obtener caudales y sedimentos en tres puntos de interés, en la desembocadura de la cuenca de estudio y en las estaciones limnimétricas Zapote y Chaguana.

Uno de los factores determinantes en la exactitud del AVSWAT son los datos metereológicos, desafortunadamente estos registros con los que se cuenta resultan ineficientes. Si bien las lluvia y los caudales muestran ciertas similitudes en sus picos, la diferencia en algunos casos es mayor del 10% lo cual implica de acuerdo con los autores del modelo que los datos climáticos son insuficientes. Sin embargo el modelo es una herramienta muy útil en la generación de caudales, precipitaciones, sedimentos y diversas variables hidráulicas. Además es una manera económica de determinar y simular las condiciones de una cuenca hidrográfica, ya que para realizar la simulación solo se requiere de un DEM, el uso de suelos, el tipo de suelos y los datos meteorológicos de la cuenca en estudio.

En la Estación Zapote se observo que no existen una buena correlación lineal entre los caudales medidos y los simulados (R^2= 0.226). Esto se debe a varios motivos:

1. No hay suficientes estaciones meteorológicas en las cercanías de la subcuenca de aportación a esta estación, lo que obliga al modelo matemático a extrapolar valores a la subcuenca; este punto es uno de los principales factores que no ayudan a la correcta calibración del modelo.

2. La carencia de suficientes mediciones de caudales en la estación no ayuda a realizar una buena correlación; estadísticamente es recomendable contar con una muestra de mas de 30 datos, lo que no sucede en la estación.

3. Los registros de las estaciones meteorológicas que se obtuvieron para el análisis estadístico no mantienen una continuidad de datos.

4. El Modelo digital del terreno (MDT)[2] que se obtuvo para este estudio cuenta con una unidad de celdas de 30m *30m ; esto no ayuda a determinar la mejor área de aportación de la subcuenca. Este MDT podría ser mejorados a celdas inclusive de 1m *1m , gracias al procesamiento de un par estereoscopio de una imagen satelital o una fotografía aérea.

En las Figuras 5, 6 y 7, se muestran los resultados obtenidos en la estación Zapote y su respectivo análisis de correlación.

Figura 5. Caudales simulados y medidos en la Estación limnimétrica Zapote (Enero 1978-Marzo 1982)

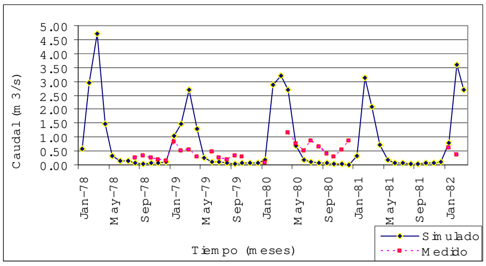


Figura 6. Precipitación simulada Estación limnimétrica Zapote (Enero 1978-Marzo 1982)

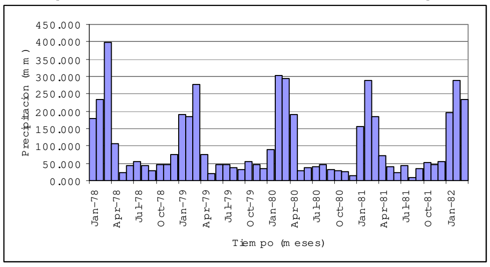
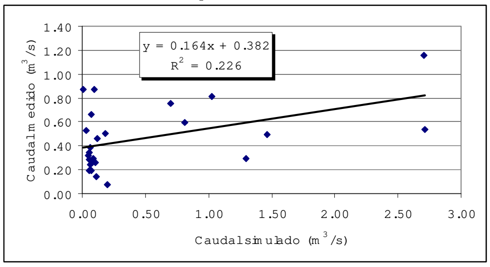


Figura 7. Correlación lineal de los caudales simulados y medidos en la Estación limnimétrica Zapote (Enero 1978-Marzo 1982)



A pesar de los puntos citados anteriormente, lo cuales no ayudan a la buena calibración del SWAT, los resultados que se han obtenido en la estación Chaguana son bastante alentadores a seguir desarrollando este modelo. La correlación que se obtuvo en esta estación es apreciablemente buena (R^2= 0.711). El cual se debe

---

[2] Modelo digital del terreno (MDT), es una base de datos geográfica que almacena las cotas topográficas de un terreno o superficie en una unidad de superficie. Esta unidad de superficie varía de acuerdo a la metodología que se use para obtener el MDT.

principalmente a que la cercanía de las estaciones. Se puede apreciar que los máximos caudales simulados mantienen la tendencia de los caudales medidos en la estación.

En las Figuras 8, 9 y 10 muestran los resultados obtenidos en la Estación Chaguana.

Figura 8. Caudales simulados y medidos en la Estación limnimétrica Chaguana (Enero 1978-Marzo 1982)

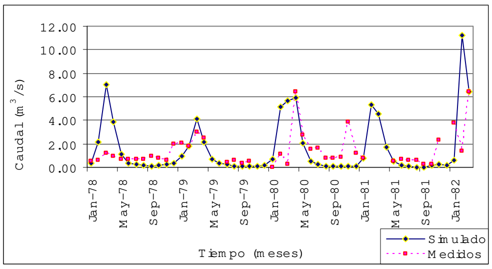


Figura 9. Precipitación simulada Estación limnimétrica Chaguana (Enero 1978-Marzo 1982)

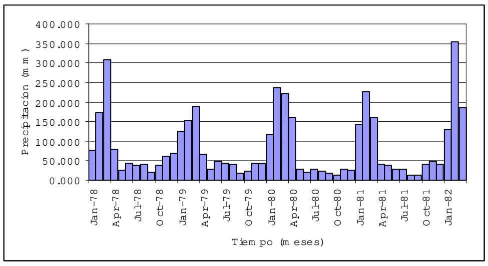
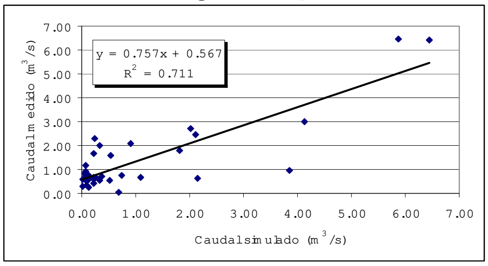
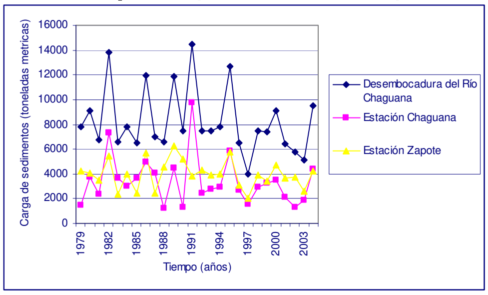


Figura 10. Correlación lineal de los caudales simulados y medidos en la Estación limnimétrica Chaguana (Enero 1978-Marzo 1982)



La aportación promedio anual de sedimentos de la Cuenca del Río Chaguana hacia el Río Pagua (desembocadura de la cuenca) es de 9700 toneladas métricas, dado que la densidad promedio de los suelos de la cuenca es de 1660 Kg/m ^{3}, el volumen de sedimentos transportados asciende a 5840 m ^{3}. Para un área de 322.134 Km ^{2}, se concluye que el espesor promedio de la capa de suelo erosionado es de 0.02 mm por cada año. En la Figura 11 se muestra la carga de sedimentos simulados en la Desembocadura de la cuenca y en las estaciones Chaguana y Zapote en el período comprendido entre 1979 a 2004.

Figura 11. Representación gráfica de la carga de sedimentos simulados en la Desembocadura del Río Chaguana y en las estaciones Chaguana y Zapote (1979 – 2004)



CONCLUSIONES

- A pesar de la carencia de información, el modelo SWAT reproduce de una buena manera los registros históricos tanto de precipitaciones como la de los caudales.

- Existe carencia de estaciones meteorológicas y registros de precipitaciones insuficientes en el área de estudio.

- La carencia de mediciones de caudales en la estaciones limnimétricas no ayuda a realizar una buena correlación;

- El Modelo digital del terreno (MDT) que se obtuvo para este estudio no aporta la precisión necesaria para la estimación de los caudales en las subcuencas.

- La aportación promedio anual de sedimentos de la Cuenca del Río Chaguana hacia el Río Pagua es de 9700 toneladas métricas, lo que corresponde a 5840 m^3.

RECOMENDACIONES

- Mejorar y ampliar la red de estaciones meteorológicas, de tal manera que se puedan almacenar todos los datos automáticamente y evitar que estos se pierdan o no sean registrados.

- Fomentar la investigación en el país.

- Medir parámetros adicionales en las estaciones meteorológicas (radiación solar, precipitaciones diarias, etc.).

- Crear un banco de datos en donde se almacenen todas las investigaciones realizadas, con el fin de ayudar a futuros investigadores a realizar trabajos de mayor envergadura que el actual y no realizar esfuerzos dobles en algo existente.

- El INAMHI como ente administrador de las estaciones meteorológicas en el Ecuador, debería ayudar a las instituciones sin fines de lucro, proporcionándoles la información necesaria para poder desarrollar más trabajos de investigación en el País.

BIBLIOGRAFÍA

- Chow, V, T, "Hidrologia aplicada", Edición Mc Grill Hill, 2000
- Di Luzio M., Srinivasan R., Arnold J., 2001 "Arcview Interface for SWAT 2000 User Guide".
- INAMHI, Anuarios hidrológicos, meteorológicos
- Kiniry J., 2003 "Banana Database", JKiniry@SPA.ARS.USDA.GOV
- Matamoros D., Bonini J., Guzmán E., Ramírez G., and Vanrolleghen P., 2001 "Using GIS in designing a soil sampling campaign to generate soil maps for an Ecuadorian watershed assessment"
- Montoya A, 1973, "Estimación de lluvias máximas de 0.5 horas a partir de lluvias máximas de 24 horas"
- Neitsch S., Arnold J, Kiniry J, Williams J, King K, "Soil and Water assessment tool theoretical documentation", version 2000.
- USDA-ARS, "Predicting Soil Erosion by Water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)", Agricultural Handbook No. 703, Agricultural Research Service, U.S. Department of Agriculture, 1996.