

Modelación hidrológica con escenarios de contaminación difusa, para la planificación ambiental en la cuenca del río David.

Rodríguez, X.J.; Mojica, V.Y.; Caballero, M.I.; Franco, N.A.; Domínguez, V.M.*

Universidad Tecnológica de Panamá-Facultad de Ingeniería Civil-Departamento de Hidráulica, Sanitaria y Ciencias del Ambiente. Campus Víctor Levi Sasso.

*** Correspondencias a Viccelda María Domínguez, a viccelda.dominguez@utp.ac.pa, teléfono: (507) 560-3032**

Palabras claves: Modelo Hidrológicos, Plaguicidas, Metabolitos.

El objetivo principal de esta investigación es calibrar un modelo hidrológico que permita simular escenarios de contaminación difusa por plaguicidas utilizados en una cuenca agrícola, con el propósito de que sea aplicado en la Planificación de las mejores prácticas de manejo en la cuenca del Río David, una importante fuente de abastecimiento de agua potable. Los cultivos de arroz y café han sido identificados, entre las principales actividades antropogénicas, siendo necesario evaluar los impactos de los plaguicidas utilizados en el cultivo de arroz y café, en el sistema acuático. El propósito de este artículo es evaluar el fenómeno de transporte de plaguicidas utilizando el modelo "Herramienta de Evaluación para Suelo y Agua" (SWAT). Basados en los resultados del muestreo de agua, en tres meses diferentes (octubre, diciembre y mayo de 2006), y la calibración del modelo hidrológico, que representa la principal ecuación utilizada por SWAT. Los compuestos encontrados en aguas del río, fueron Propanil, Pedimentalina, Endosulfán, Dieldrin y Lindano; estos plaguicidas fueron analizados utilizando tecnología de extracción "microconductividad eléctrica" con detección por cromatografía de gases con espectrofotómetro de masa (GC-MS). Diferentes escenarios críticos de máxima escorrentía fueron proyectados. Se obtuvo una R^2 de 0.80 en la calibración del modelo hidrológico y en la simulación de plaguicidas se obtuvo la mayor afectación por Pendimetalina y 2,4-D. Se recomiendan realizar estudios a futuros, especialmente de distintos insecticidas y sus metabolitos que se pueden generar en dichas combinaciones.

Keywords: Hydrological Model, Pesticides, Metabolites

The overall objective of this work is to calibrate a hydrological model to allow the simulation of different scenarios of no point source pollution by pesticide in an agricultural watershed to create a methodology for a sustainable management of an important drinking water source in Panama, David River. Rice and coffee culture has been identified as the main anthropogenic activity, been necessary to evaluate the impacts of pesticides used in rice and coffee culture on the aquatic systems. The purpose of this paper is to evaluate pesticides transport phenomenon using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) software. Based on the results of water samples, in three different months (October, December de 2006 and May 2007), and the calibration of the hydrological model, that represents the principal equation using by SWAT. Compounds found in river water, were Propanil, Pendimethalin, Endosulfan, Dieldrin y Lindano; these pesticide were analyzed using solid-phase "electrical micro conductivity" extraction technique with detection by gas chromatography with mass spectrometry (GC-MS). Different scenarios of critical runoff were projected. The results of the hydrological model calibration have a R^2 of 0.80 and in the simulation of pesticide the principal impacts were generated by Pendimetaline and 2,4-D. Further monitoring studies are recommended, especially from different insecticides and their metabolites.

Introducción

La modelación de la contaminación no puntual, se compone de distintas ecuaciones matemáticas, de modo de representar los procesos de precipitación-escorrentía, erosión transporte disuelto y adsorbido de los compuestos (Maidment, 1993; Novotny & Olem, 1994). De acuerdo a la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura.(FAO, 2006) entre los modelos de simulación de fuentes de contaminación no puntuales o difusas mas reconocidos, por su importancia en la aplicación de procesos hidrológicos, sedimentos, plaguicidas y nutrientes, además de su nivel de precisión temporal y espacial; se encuentra el SWAT (Soil and Water Assessment Tool), Herramienta de Evaluación de Suelo y Agua, desarrollado por el

Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) (Arnold et al., 2002). El SWAT integra un número considerable de submodelos; sin embargo, su fundamento es el balance hídrico para determinar la entrada, salida y almacenamiento de agua en la cuenca, este balance se calcula con la ecuación (1):

$$SWt = sw + \sum (Ri - Qi - ETi - Pi - QRi) \quad (1)$$

Donde: SWt es el contenido de agua en el suelo en el día t, sw es el agua aprovechable por las plantas o el contenido de agua en el suelo a 0.1-bar menos el contenido de agua a 15-bar, t es el tiempo en días, R es la precipitación diaria, Qi la cantidad de escorrentía diaria, ETi la evapotranspiración diaria, P la percolación diaria y QRi el flujo de retorno o flujo base; todas las unidades en mm.

La presente investigación se basa en Maidment (1993) y Legates and McCabe (1999); dividiendo la cuenca del Río David en Unidades de Respuesta Hidrológica (UHRs) y modela cada una de las UHRs, permitiendo conocer su respuesta al final de cada UHRs, al igual que la respuesta al final de la cuenca total (Dominguez et al, 2005). Utilizando las UHRs se puede realizar escenarios de plaguicidas aplicados en distintas áreas de cultivos y su comportamiento en suelo y su posterior llegada al río. Los compuestos encontrados en aguas del río y analizados por un Cromatógrafo de Gases Agilent Modelo 6890 con receptor de microconductividad eléctrica, fueron los plaguicidas Propanil, Endosulfan, Pendimetalina, Dieldrin, Lindano y 2,4 D (Olmos 2007).

Diferentes escenarios críticos de máxima escorrentía fueron proyectados. Entre los resultados de las simulaciones en los distintos escenarios, hay presencia de compuestos carcinogénicos, siendo estos el caso del Dieldrin y el 2,4-D. Se recomienda implementar el Sistema de Gestión de Cuencas en el río David, en el cual en la próxima fase se calibren los plaguicidas encontrados en la cuenca, y además se relacionen con datos epidemiológicos del Ministerio de Salud.

Objetivo

El objetivo principal de esta investigación es calibrar un modelo hidrológico que permita simular escenarios de contaminación difusa por plaguicidas utilizados en la cuenca alta, media y baja, con el propósito de que sea aplicado en la Planificación de las mejores prácticas de manejo en la cuenca del río David, la cual es una importante fuente de agua potable en la República de Panamá.

Metodología:

Implementación de Arc View 3.2 en el Diagnóstico Físico de la Cuenca: De acuerdo al Instituto de Investigación del Sistema Ambiental por sus siglas en inglés ESRI (Environmental System Research Institute, 1997), el procedimiento para implementar los Sistemas de Información Geográfica (SIG); fase preliminar a la modelación hidrológica; se divide en cuatro etapas, las cuales se definen como sigue:

- Se referencia y digitaliza la red hídrica de la cuenca
- Se referencia geográficamente los mapas o cartas en Arc View 3.2 para así digitalizar, y obtener uso de suelo (agrícola, ganadería de pastoreo y otros), y tipo de suelo basado en la metodología abalada y descrita del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) mediante el método de Bouyoucos.
- Se referencia y digitaliza las curvas de nivel del área de estudio
- A partir de las curvas de nivel se genera el modelo de elevación digital (MDE), el cual se comprueba con los resultados de la red hídrica, observando la similitud entre las líneas de la red hídrica digitalizada y las depresiones observadas en el MDE en tres dimensiones.

Modelación Hidrológica: se realiza a través de la recopilación de datos generados a partir del SIG y de la base de datos de las estaciones de ETESA número 108-03-02 y Rovira, ubicadas en la parte baja y alta de la cuenca respectivamente; ambas estaciones de Tipo A.

Basado en la metodología descrita por Maidment (1993) y Legates and McCabe (1999) se divide la cuenca del Río David en Unidades de Respuesta Hidrológica (UHRs) modelando cada una de las UHRs, lo que permite conocer su respuesta al final de cada una, al igual que la

respuesta al final de la cuenca total (Dominguez et al., 2005). La información se obtuvo y se introdujo de acuerdo al Diagrama de flujo 1.

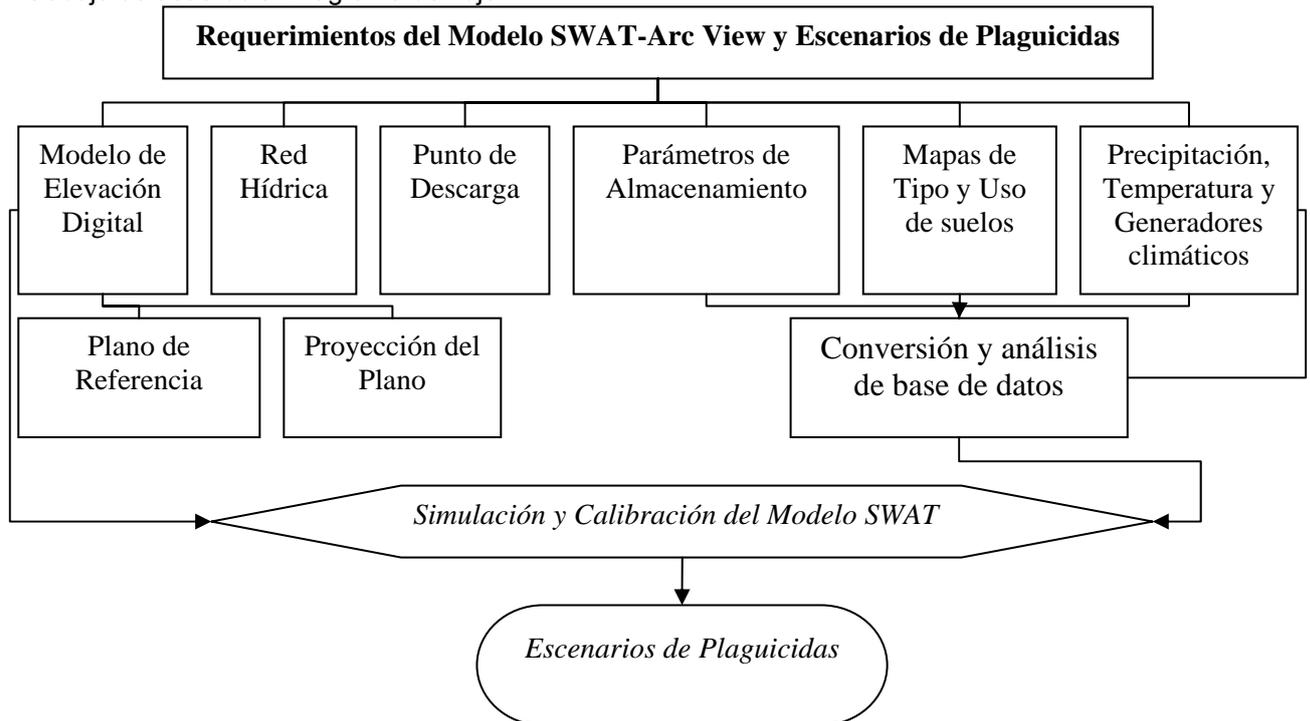


Diagrama de flujo 1. Requerimientos del Modelo SWAT - Arc View y Escenarios de Plaguicidas.

Resultados y Discusión

A partir del modelo hidrológico SWAT, se obtiene una definición del área de la cuenca del Río David a partir de la dirección y el flujo representado según las pendientes del MDE. Como resultado se obtienen 46 UHRs que conforman la cuenca del río David.

De la calibración que se realiza específicamente para el año 1996 (288 simulaciones) se obtiene la Figura 1, la cual muestra la correlación para distintos eventos entre los años 1994 – 1997. Los eventos utilizados son aquellos que han sido poco intervenidos por rellenos de datos por el método de Pearson, debido a que datos rellenos generan un caudal diferente al real y alejan la respuesta a la realidad y posterior correlación obtenida de la simulación del modelo hidrológico.

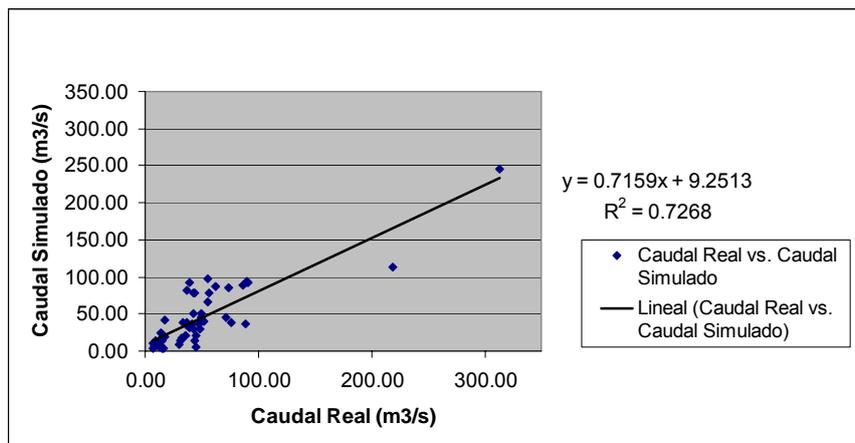


Figura 1. Correlación para los años 1994 – 1997.

Como muestra la Figura 1, la correlación para los años 1994 hasta 1997, es de $R^2 = 0.73$, valor de correlación aceptable, considerando los datos faltantes y rellenos realizados en su mayoría para los años 1994, 1995, 1996 y 1997 según lo observado por Oñate (2003). A partir de estos

resultados se trabaja en base al año 1996, el cual posee la mayor cantidad de datos reales. De los cambios realizados a los parámetros de curva número, surlag, tiempo de concentración, flujo base o flujo de recarga subterránea (GWQMN), coeficiente de evapotranspiración (ESCO); derivados del análisis de sensibilidad combinado 2^k , donde K es el número de parámetros de mayor influencia, siendo en total 4 los fundamentales en cuanto a la ecuación de escorrentía; en el año 1996 se obtiene los resultados mostrados en la figura 1.2 para los meses de mayor precipitación:

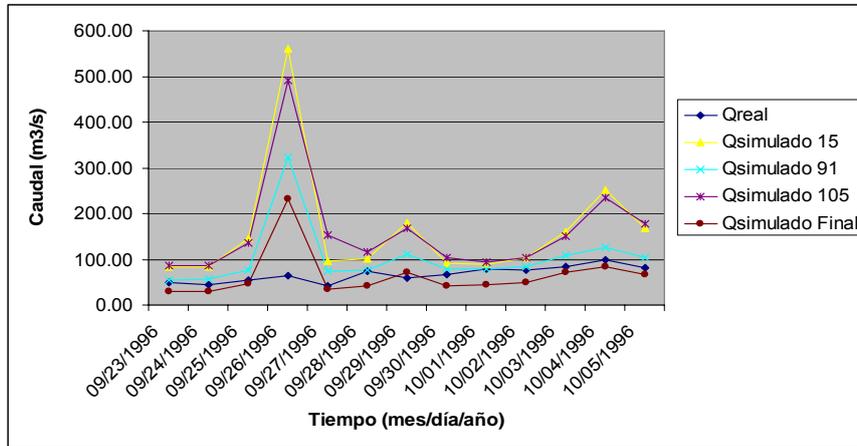


Figura 2. Escenarios para la calibración.

La Figura 2 muestra los cuatro escenarios más representativos de la calibración que permiten ir ajustando los parámetros de entrada al modelo SWAT para la cuenca del río David, la cual muestra una similitud entre Qreal (caudal real) y las diferentes simulaciones (Qsimulado) hasta alcanzar una correlación R^2 entre 0.7981 a 0.8005, los cuales se mantiene dentro de los sugeridos por Torres et al. (2005), Aitken, (1973), Karvonen et al., (1999). En la figura 2 se observa para el evento de precipitación-escorrentía superficial, que los primeros días del evento se mantienen cercano a los valores reales; sin embargo, el flujo de los valores pico presentes, no puede ser disminuido de mejor manera, sin pérdida en la correlación. La interpretación del modelo en cuanto a la diferencia del flujo pico, puede ser causada por la implementación de usos de suelo actuales (año 2005 – 2006), mientras se trabaja en base a comparaciones de caudales del año 1996. Lo planteado sugiere una diferencia de 10 años de desarrollo económico y social, lo cual se refleja como mayor área pavimentada, crecimiento urbanístico, usos pecuarios en la región entre otros; que inciden en una menor permeabilidad del suelo, aumento en la escorrentía y subsiguiente aumento de caudal en la región. Lo que coincide con autores como Mays (1996). Aunando la inconsistencia de los valores de precipitación obtenidos de los datos de ETESA, lo cual disminuye el factor de correlación del modelo, que coincide con lo mencionado por Ndomba & Mtalo (2005), Arnold (2002) y Oñate (2003), el último sobre calibración del Modelo SWAT en la cuenca binacional del Río Catamayo entre Ecuador y Perú. Se observa sin embargo una correlación de $0.7981 \approx 0.8$, con un valor de flujo pico de mayor similitud con el valor real de caudal. Por otra parte, segregando de la Figura 2 el último evento de precipitación observado (el cual cubre 5 días de evento de lluvia entre el 1 al 5 de octubre de 1996) se obtiene una correlación de 0.8001 con respecto a lo medido en la estación limnimétrica de ETESA (Figura 3).

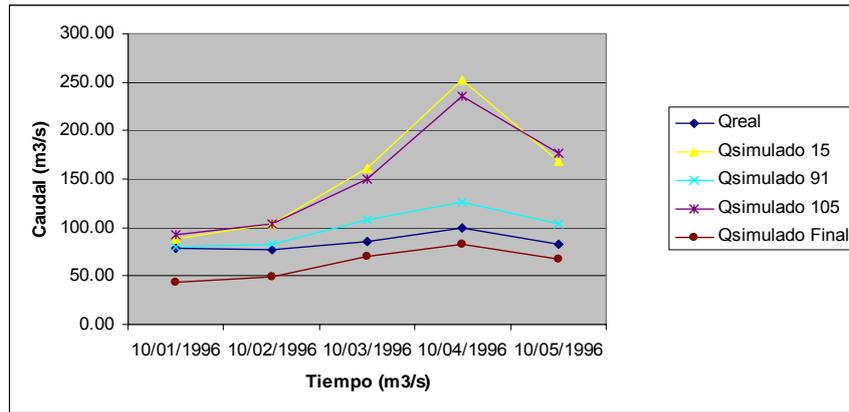


Figura 3. Evento del 1 al 5 de octubre de 1996.

En la Figura 3 se observa que el flujo pico ocurre para el día 4 de octubre de 1996; y que los Qsimulado91 y Qsimuladofinal se asemejan al Qreal. Observándose una tendencia de cercanía de valores simulados a valores reales. En la Figura 4 se observan las diferentes líneas de tendencia para las cinco simulaciones realizadas en la Figura 3.

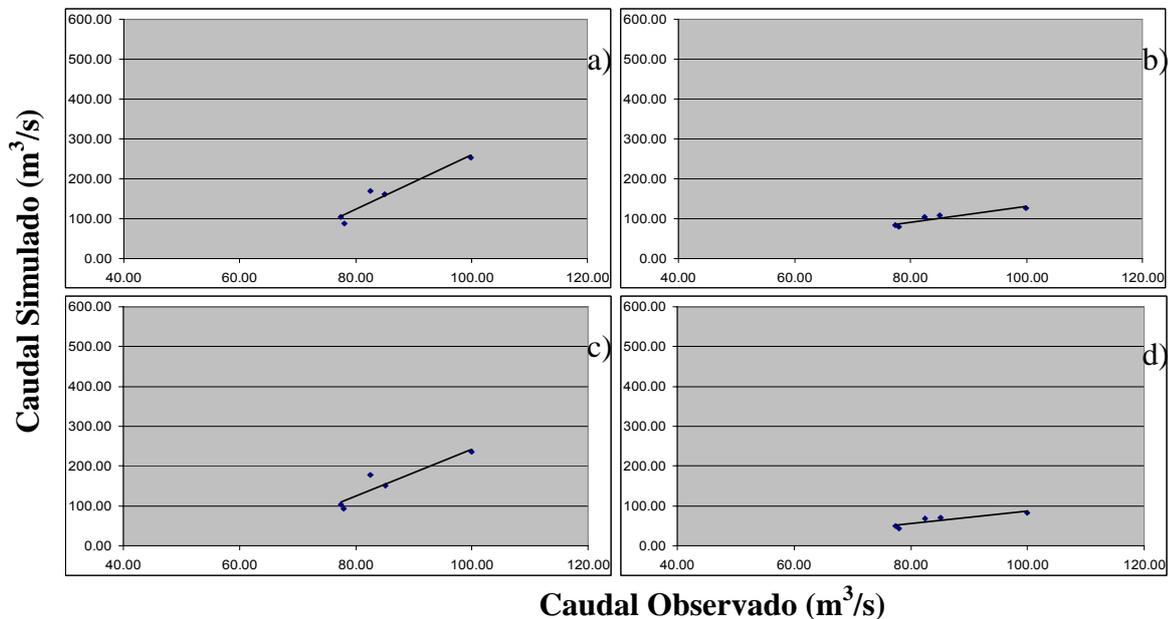


Figura 4. Línea de Tendencia y Correlación por Simulación para el evento del 1 al 5 de octubre de 1996. a) $R^2 = 0.9210$ para Qsimulado15 para el segundo evento; b) $R^2 = 0.8573$ para Qsimulado91 para el ultimo evento; c) $R^2 = 0.8558$ para Qsimulado105 para el ultimo evento; d) $R^2 = 0.8005$ para QsimuladoFinal para el ultimo evento.

El último evento de calibración (QsimuladoFinal) en la Figura 3 se encuentra representada en la correlación mostrada en la Figura 4 d). Observándose una correlación mayor a 0.8. Se observa en la Figura 4 que para a) se tiene valor de correlación de 0.9210, sin embargo existe un flujo pico superior al flujo real u observado. En cambio la d) de la misma Figura tiene una correlación de 0.8005, con un valor pico de flujo de mayor ajuste al valor real de caudal. Los valores de caudal para la gráfica d) QsimuladoFinal son menores a los caudales reales presentes en la Figura 3.

El modelo SWAT muestra una correlación para ambos eventos escogidos para la calibración de $R^2 \approx 0.8$, esto sugiere que el modelo se ajusta a las condiciones de estudio y su calibración para el año 1996 se da por concluido este proceso.

A partir de los resultados de la calibración de los eventos de lluvia, se procede a realizar los escenarios de plaguicidas, con el valor obtenido en QsimuladoFinal. El objetivo de ejecutar estas corridas es encontrar valores que serían menores a los que pueden ser generados en la situación real, y nos sugirieran la llegada o no al río de plaguicidas en una situación similar.

Resultados preliminares de muestras tomadas en distintos sitios de la cuenca del Río David (medio agua en 6 puntos, y envase de mezcla de plaguicidas en cultivos), y analizados por un Cromatógrafo de Gases Agilent Modelo 6890 con receptor de microconductividad eléctrica, revelan la presencia de los plaguicidas Propanil, Endosulfan, Pendimetalina, Dieldrin, Lindano y 2,4 D Olmos, (2007). Se realiza la ejecución y análisis de los escenarios en base a estos plaguicidas de acuerdo a sus características físico-químicas.

Según los resultados obtenidos para simulaciones de escenarios de plaguicidas bajo condiciones establecidas de cantidad del mismo en follaje y enriquecimiento en suelo se obtiene los siguientes resultados descrita en la Tabla 1.

Tabla 1. Resultados de Escenarios de Plaguicidas y su Comportamiento en los Medios de Transporte.

Plaguicida	Comportamiento en Suelo	Comportamiento en Agua	Cantidad que llega al Río (mg)
Endosulfan	Se adhiere al suelo	Poco soluble en agua	0.7e-4 a 8.48 mg
Propanil	Poca adherencia al suelo	Soluble en agua	3.76 a 27.85 mg
Pendimetalina	Se adhiere al suelo	Poco soluble en agua	1511 a 13360 mg
Dieldrin	Se adhiere al suelo	Poco soluble en agua	5.2e-4 a 246 mg
Lindano	Se adhiere al suelo	Soluble en agua	0.12 a 241.5 mg
2,4-D	Poca adherencia al suelo	Soluble en agua	137 a 619 mg

De acuerdo a lo observado en la Tabla 1 se observa que los plaguicidas de menor llegada son Endosulfan y Propanil, ambos tienen comportamiento parecidos en cuanto a llegada al río, teniendo similitud en las UHRs en la cual se obtiene llegada al río. El Endosulfan y el Propanil tienen comportamiento de transporte distinto, el primero depende del sedimento es un plaguicida que se adhiere fuertemente a suelos de partícula pequeña (textura de franco arcillosa). Christodoulatos y Mohiuddin, (1996), y el último una moderada a alta solubilidad en agua dependiendo de la escorrentía superficial. Un comportamiento parecido se observa para los plaguicidas Dieldrin y Lindano, ambos se adhieren al suelo, sin embargo el Lindano tiene mayor solubilidad en agua que el Dieldrin, observándose una parecida llegada al río en cantidades cercanas a 250 mg y un similar movimiento en UHRs debido principalmente a su moderada a fuerte adherencia en suelos. Son la Pendimetalina y el 2,4-D los plaguicidas de mayor presencia y llegada a las aguas del río David basándonos en las simulaciones, observándose una cantidad cercana a las 13360 para la Pendimetalina y 619 para el 2,4-D. El comportamiento y transporte de ambos plaguicidas es completamente distinto, la Pendimetalina se adhiere al suelo y por ende depende del sedimento para llegar al río, por su lado el 2,4-D es soluble en agua y por ende su transporte en la cuenca se debe a la escorrentía superficial.

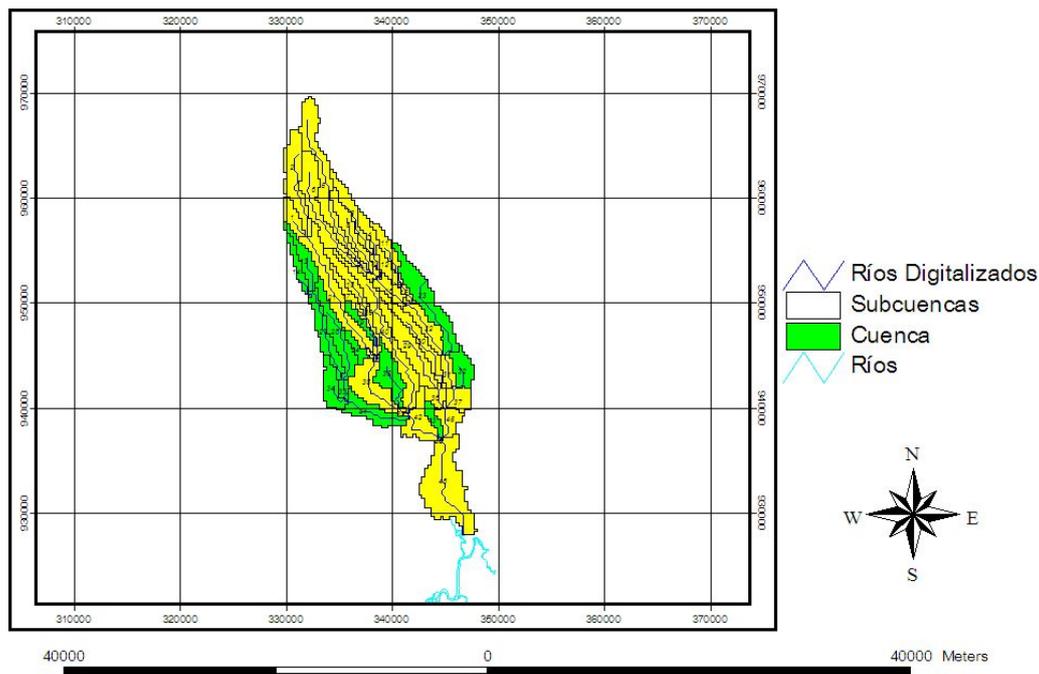


Figura 5. Escenarios de transporte de Pendimetalina en la Cuenca del Río David.

Es la Pendimetalina el de mayor llegada al río, debido en gran parte a la parte baja de la cuenca del río David, la cual es de textura de suelo Franco Arcillosa, aunque su llegada al río se da a lo largo y ancho de la cuenca la cual es de textura Franco Arenosa como se observa en la Figura 5.

Conclusiones y Recomendaciones

Se debe comprender claramente, que estos son escenarios posibles, no son escenarios calibrados en campo con datos reales. La intención es conocer como se proyectaría el transporte, y si son capaces de llegar los plaguicidas objeto de este estudio, bajo el escenario hidrológico calibrado, características fisicoquímicas del suelo y las condiciones de uso de suelo actuales.

Entre los plaguicidas simulados en los distintos escenarios, hay presencia de compuestos carcinogénicos, siendo estos el caso del Dieldrin y el 2,4-D. La presencia de estos plaguicidas en la cuenca ha sido comprobada por Olmos (2007), y su transporte es más que probable por medio de la escorrentía simulada por este estudio. Como otra fase de la investigación, se realizó una encuesta socioeconómica en la cuenca, que incluía, recabar información de tipo epidemiológica y de uso de plaguicidas. Los resultados mostrados en Mojica y Rodríguez, (2007), arrojaron una incidencia del 19 % de casos de cáncer en la cuenca del río David. Sin embargo, las evidencias no son suficientes para relacionar directamente los casos con el uso de plaguicidas.

Se recomienda implementar el Sistema de Gestión de Cuencas en el río David, en el cual en una etapa posterior se calibren los plaguicidas encontrados en la cuenca, y además se relacionen con datos epidemiológicos del Ministerio de Salud.

Con este proyecto se comprueba la posible implementación de diversos modelos hidrológicos en cuencas con características volcánicas montañosas con condiciones meteorológicas e hidrológicas similares o muy parecidas a las observadas en la cuenca del río David.

Agradecimientos: A la Secretaria Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT) por financiar esta investigación a través del Proyecto de Fomento a la Investigación y Desarrollo ID 147-2005.

Bibliografía

- Aitken, A. (1973). Assessing Systematic Errors In Rainfall-Runoff Models. *Journal of Hydrology* 20:121-136.
- Arnold, J. et al., (2002). *Soil and Water Assessment Tool User's Manual*. Texas Water Resources Institute College Station. Texas.
- Christodoulatos, C., Mohiuddin, M. (1996). Generalized models for prediction of pentachlorophenol adsorption by natural soils. *Water Environmental Research* 68:370-378.
- Domínguez, V.M., Franco, N., Mojica, V., Caballero, M., Santamaría, E., Rodríguez, X. (2005). Informes de Avance (1,2) proyecto Implementación de un Sistema de Gestión de Cuencas tomando como base de respuesta, la unidad ecosistémica del Río David. Proyecto presentado a la Secretaría Nacional de Ciencia y Tecnología (SENACYT). Panamá.
- Environmental System Research Institute. (ESRI). (1997). *Understanding GIS. The ARC/INFO Method*. John Wiley & Sons, Inc., New York, U.S.A.
- Karvonen, T., Koivusalo, H., Jauhiainen, Palko, J., Wepling, K. (1999). A hydrological model for predicting runoff from different land use areas. *Journal of Hydrology* 217: 253 – 265.
- Legates, D., McCabe, G., (1999). Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research* 35:233-241.
- Maidment, D. (1993). *Handbook of hydrology*. The McGraw-Hill Companies, Inc., New York, U.S.A.
- Mays, L.W. (1996). *Water Resources Handbook*. McGraw-Hill. New York, U.S.A.
- Mojica, V., Rodríguez, X. (2007). Modelación hidrológica con escenarios de contaminación difusa, para la planificación ambiental en la cuenca del río David. Tesis para optar al grado de Licenciado en Ingeniero Ambiental. Universidad Tecnológica de Panamá.
- Ndomba, P., Mtalo, F. (2005). The Suitability of SWAT in Sediment Yield Modeling for Ungauged Catchments: A Case of Simiyu River Subcatchment, Tanzania. 3rd International SWAT Conference.
- Novotny, V., Ollem, V. (1994). *Prevention, Identification, and Management of Diffuse Pollution*. Van Nostrand Reinhold. New York.
- Olmos, J. (2007). Avances de la Tesina, Determinación Analítica por Cromatografía de Gases de Compuestos Orgánicos clorados de Media a Larga vida media en Agua, Tomando como Caso de Estudio la Cuenca del Río David. Trabajo de Graduación para optar al Título de Magister Profesional en Ingeniería Ambiental. Panamá, Panamá.
- Oñate, F., Aguilar, G., (2003). Aplicación del Modelo SWAT para la Estimación de Caudales y Sedimentos en la Cuenca Alta del Río Catamayo. Perú.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura. (FAO). (2006). *Sistema de Información Geográfica conexión con los modelos de simulación y aplicación a las materias relacionadas con la erosión* Pág. 1-6
- Torres, E., Oropeza, J., Fernandez, D. (2005). *Aplicación del Modelo SWAT en la Cuenca el Tejocote Altacamulco*. México.