

Comportamiento de los sedimentos fluviales en Honduras. Rendimiento y pérdida de suelo Zona Central y Oriental

Roberto Fredy Ávalos Lingan*

RESUMEN

El Ministerio de Recursos Naturales y Ambiente hasta 1984 manejaba una fuerte campaña de medición de sedimento en suspensión en sus principales estaciones hidrométricas. Por otra parte la Empresa Nacional de Energía Eléctrica (ENEE) manejaba también hasta los años 90 una fuerte medición de sedimento en las cuencas de su interés. La ENEE en los años 2000 a retomado dichas mediciones. Toda la información recolectada, a la fecha, presenta mucha discontinuidad en el tiempo y en frecuencia de medición. La información rescataable ha sido pocas veces investigada; al grado que los estudios sedimentológicos de los proyectos hidroeléctricos se basan en criterio de rendimiento y pérdida de suelo, según la experiencia de los consultores.

De lo mencionado se creyó necesario investigar, con la información disponible, los rendimientos y pérdida de suelo para la zona central y oriental del país. Esto permitirá disponer de alguna base científica para evaluar los valores utilizados por los consultores.

La hipótesis que el rango de rendimiento se encuentra entre 500 y 1000 (Ton/año/km²) es aceptada como resultado de la presente investigación.

Palabras Clave: *Sedimento, Sedimento en Suspensión, Sedimento de fondo, Muestreo Integral, Caudal Líquido, Caudal Sólido, Relación, Rendimiento y Pérdida de Suelo.*

ABSTRACT

Up to 1984 the Ministry of Natural and Environmental Resources carried and intensive measurement campaign of suspending sludge in its main hydrometric stations. On the other hand up to the 90's the Electrical National Company (ENEE)

*Roberto Fredy Ávalos Lingan
Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de Honduras

also carried an intensive sludge measurement in the water basins of interest. By the year 2000 the (ENEE) has collected such measurements. All the information gathered up to now presents discontinuity in time and in measurement frequency. Recoverable information has been investigated a few times to the point sedimentological studies of the hydroelectrical projects are based on the criterion of the usefulness and loss of the ground according to the consultant's experience.

As mentioned before it was necessary to investigate with the available information the usefulness and loss of the ground for the central and western zones of the country. This will provide to access some scientific evidence to evaluate the figures used by the consultants.

The hypothesis that the usefulness ranges between 500 and 1000 (ton/year/km²) is accepted as results in the present investigation.

Keywords: *Sludge, suspending sludge, bottom sludge, integral sampling, liquid volume, solid volume, relation, ground usefulness and loss.*

INTRODUCCIÓN

Cada inicio del período lluvioso se observa en las diferentes cuencas hidrográficas del país que las aguas de los ríos y quebradas transportan agua con una fuerte turbidez. Dependiendo esto, principalmente, de la lluvia (cantidad, intensidad y duración), del tipo y estado del suelo, de la cobertura vegetal y de la morfología de la cuenca. De acuerdo a la publicación realizada por La Secretaría de Recursos Naturales y Ambiente (Balance Hídrico de Honduras, 2004), en esta se menciona que la lluvia promedio en Honduras es alta comparado con la evapotranspiración potencial. El valor promedio de la lluvia es de 1880 mm/año y la evapotranspiración potencial de 1315 mm/año. Calificándole como un país de clima húmedo y subhúmedo con una fuerte riqueza hídrica.

La lluvia es el principal agente en la producción de sedimento en la cuenca y los caudales en los cursos de agua en la erosión del lecho. Tomando en cuenta la situación actual de las cuencas del punto de vista de cobertura vegetal y constitución y estado del suelo, y lo mencionado en el párrafo anterior, el territorio hondureño se encuentra sometido a un fuerte potencial de erosión.

El objetivo de la presente investigación es determinar, a partir de la información disponible, los rendimientos de sedimento en ton/año/km² y la pérdida de suelo en mm/año; para la zona central y oriental del país.

Como resultado podemos mencionar que la parte oriental de país tiene un rendimiento de 685.586 ton/año/km² y una pérdida de suelo de 0.857 mm/año y la parte central de 843.344 ton/año/km² y una pérdida de suelo de 1.054 mm/año.

ANTECEDENTE

De acuerdo a la información obtenida se sabe que desde lo años 60 el Departamento de Hidrología y Climatología de la Dirección de Recursos Hídricos (DGRH) del Ministerio de Recursos Naturales y Ambiente realizaba muestreos de sedimento en los principales ríos del país y que mediante su laboratorio de sedimento, de ese tiempo, obtenían las concentraciones y la producción de sedimento. Aparentemente esto duró hasta mediados de los años 84; información de sedimento antes de esos años no fue posible obtener.

Por otra parte, la Empresa Nacional de Energía Eléctrica (ENEE) también desde los años 60 inició muestreos de sedimentos integral y puntual en sus estaciones donde

se proyectaba una central hidroeléctrica. Disponía de un laboratorio de sedimento para la medición de concentraciones. A la fecha actual el laboratorio se ha modernizado; no solamente para concentraciones de sedimento, sino también de calidad de agua y otras variables más.

A través del tiempo los muestreos de sedimento en las estaciones hidrométrica de la ENEE disminuyeron; pero actualmente se ha retomado el plan de operaciones de muestreo. Cabe mencionar que ambas instituciones gubernamentales solamente han medido o miden sedimento en suspensión.

En el Estudio de Factibilidad del Proyecto El Cajón (1973), Volumen 2 Hidrología, la Empresa Motors-Columbus de Suiza tomaron los datos de sedimento disponibles a esa fecha del río Humuya y a su vez ellos también realizaron algunos muestreos. Llegando finalmente a determinar un rendimiento de 733.25 ton/año/km².

La ENEE en 1987 realizó un análisis de sedimento de sus estaciones hidrométricas que disponían mayor información. Para lo cual aplicó el método del Bureau of Reclamation, considerando las curvas de sedimento ajustadas a las líneas de concentración establecidas por la ENEE y las curvas de duración de los caudales diarios. Lamentablemente no se pudo disponer de los datos ni del informe; pero si de algunas curvas de sedimentos.

En mayo de 1991 la Consultora alemana LAHMEYER dentro de los estudios de los proyectos hidroeléctricos Remolino y Sico II, determinó para el río Patuca en la estación hidrométrica Cayetano el rendimiento de 133.0 ton/año/km². Calificando este resultado como muy bajo debido básicamente a la calidad de la información existente y a su discontinuidad. Finalmente esta Empresa trabajó con rangos de rendimiento de 500 a 900 ton/año/km².

MARCO CONCEPTUAL

Apesar que hay algo de información de sedimento en suspensión muestreados por las instituciones anteriormente mencionadas; cuyos planes de muestreos quizás no fueron realizados bajo ningún criterio científico; pero es la información que actualmente se dispone. Ya que a la fecha no es posible determinar en forma exacta los rendimientos y pérdida de suelo para las diferentes cuencas del país; queda la pregunta en qué rango se puede encontrar los rendimiento y pérdida de suelo en Honduras?.

Son los proyectos hidroeléctricos que han hecho realidad las mediciones de

sedimento que actualmente existe en el país. Básicamente esto es utilizado para determinar el volumen muerto de los embalses. El especialista y el diseñador se ponen de acuerdo para discutir los resultados y proponer un valor razonable. Conocer las pérdidas de suelo de las cuencas y de los cursos de agua es importante para el desarrollo sostenible y sustentable del país; recordemos que son en las primeras capas del suelo donde se encuentra la riqueza agrícola y no mencionar sus capacidades físicas que se ponen en riesgo. Esto permitirá establecer científicamente planes operativos urgentes para la conservación de los suelos.

HIPÓTESIS

La hipótesis a probar es: Para la zona Central y Oriental los rendimientos se encuentran entre 500 y 1000 ton/año/km².

METODOLOGÍA

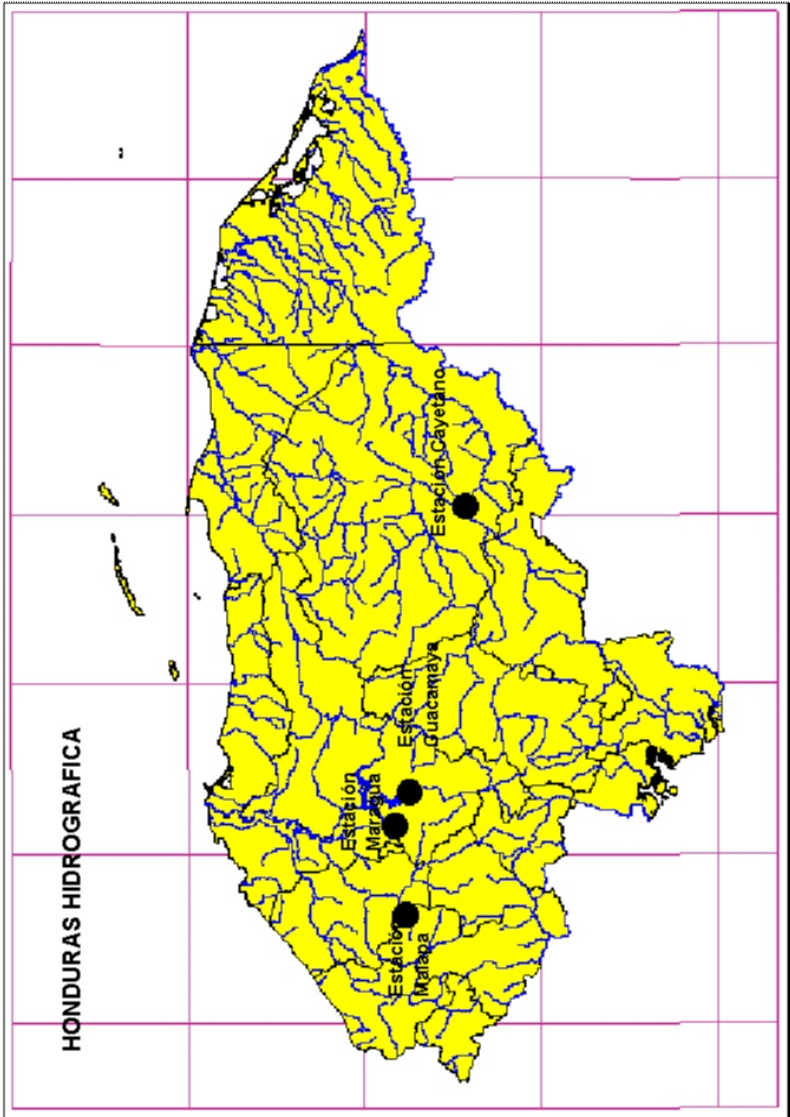
En base a la información disponible las muestras para la zona central es representada, en esta investigación, por la información disponible de los ríos Malapa, Guacamaya, Maragua, de sus estaciones hidrométricas correspondientes; tomando consideración únicamente las muestras obtenidas por muestreo integral. Para el caso de la zona oriental se pudo contar con los datos de sedimento de muestreo integral del río Patuca justo después de la unión de los ríos Guayape y Guayambre en la estación hidrométrica Cayetano. Cabe mencionar que las estaciones hidrométricas utilizadas pertenecen y son manejadas por la ENEE. El Plano 1 muestra la ubicación de los sitios de muestreo.

La calidad de la realización de los muestreos y los análisis de laboratorio está regida por normas internacionales, en especial, por la Organización Mundial Meteorológica y por parte de los fabricantes de equipo. En cuanto a la frecuencia de muestreo las normas dicen que hay que realizarlos durante todo el año; pero con una frecuencia mayor en los meses lluviosos; debidos a que son los tiempos de mayor sedimento. La cantidad fijada de cuantos muestreos hay que realizar en cada mes/meses seco o lluvioso no está bien establecida. La ENEE trata de cumplir con estas normas, cuyo cumplimiento en cuanto a la frecuencia están sujetas a circunstancias y planes propios de esa institución; como por ejemplo prioridades.

Cabe señalar que no se dispone de una serie con un número de datos uniformes de sedimento en suspensión en cada estación hidrométrica mencionada. Los análisis a aplicar serán realizados para el periodo disponible de cada una de ellas. Para

determinar los rendimientos y pérdida de suelo de las cuencas con información disponible, la metodología consistirá en encontrar alguna relación entre los caudales líquidos QL (m^3/s) y sólidos QS (ton/día) justo en el periodo en que se realizaron los muestreos. Esto permitirá encontrar una relación matemática que las relacione y después de esto, extrapolarla o interpolarla de acuerdo a la información de caudales líquidos diarios disponibles. El peso específico del sedimento en suspensión es considerado en esta investigación con un valor de $1.25 \text{ ton}/m^3$.

Plano 1



APLICACIÓN Y RESULTADOS

1. Generalidades

La metodología fue aplicada a las estaciones hidrométricas de Cayetano Guacamaya, Malapa y Maragua. Se probó con cada una de ellas varios tipos de relación entre QL vs QS, a mencionar relación lineal, relación polinomial de diferente orden. Logarítmica potencial y exponencial. Los mejores ajustes se obtuvieron utilizando un ajuste potencial, es decir $QS=c*QL^n$. Por consiguiente esta misma metodología fue aplicada a la información disponible de cada estación hidrométrica; permitiendo una uniformidad del tratamiento de la información y por supuesto una mejor interpretación de los resultados.

2. Río Patuca

Al sitio de la estación hidrométrica Patuca en Cayetano la cuenca correspondiente cubre un área hidrográfica de 10566.9 km². La información recolectada de sedimento para esta investigación abarca el periodo de Marzo 2004 a Agosto 2007.

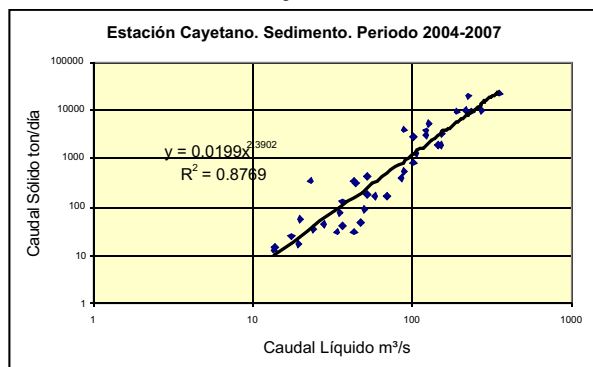
La relación encontrada entre QL (m³/s) y QS (ton/día) es la siguiente:

$$QS = 0.0199 * QL^{2.3902}$$

El coeficiente de correlación determinado es de 0.94.

La Figura 1 muestra el ploteo de la información en Log-Log y el trazado de la ecuación que relaciona ambas variables. Utilizando los caudales líquidos diarios para el periodo 2004 y 2006 y la ecuación encontrada, el promedio obtenido de los rendimientos es de 133.445 (ton/año/km²) y lo concerniente a las pérdidas de suelo fue de 0.167mm/año.

FIGURA 1: Estación Cayetano. Ploteo de QS vs QL



Como la estación hidrométrica de Cayetano tiene información de caudales líquidos desde 1973; la ecuación $QS = f(QL)$ fue extrapolada de 1973 al 2006. Haciendo un total de datos de 33 años. El Cuadro 1 muestra los resultados obtenidos.

En el Cuadro 1 se observa los rendimientos y pérdida de suelo para cada año y también al final del cuadro un promedio y un total. El promedio corresponde a los sedimentos en suspensión y el total al sedimento total; es decir los sedimentos en suspensión más el de fondo.

De acuerdo al texto Diseño de Pequeñas Presas, publicado por el Bureau of Reclamation, se menciona que cuando no se dispone de información el sedimento de fondo, puede ser representado por el 10 al 15 % del sedimento en suspensión, en nuestro caso consideramos un 15%.

3. Río Humuya

Al sitio de la estación hidrométrica Humuya en Guacamaya la cuenca correspondiente cubre una cuenca hidrográfica de 2570.0 km². La información recolectada para esta investigación abarca el periodo de Agosto 1992 a Noviembre 2002.

La relación encontrada entre QL (m³/s) y QS (ton/día) es la siguiente:

$$QS = 0.0704 * QL^{2.5492}$$

Con un coeficiente de correlación de 0.90.

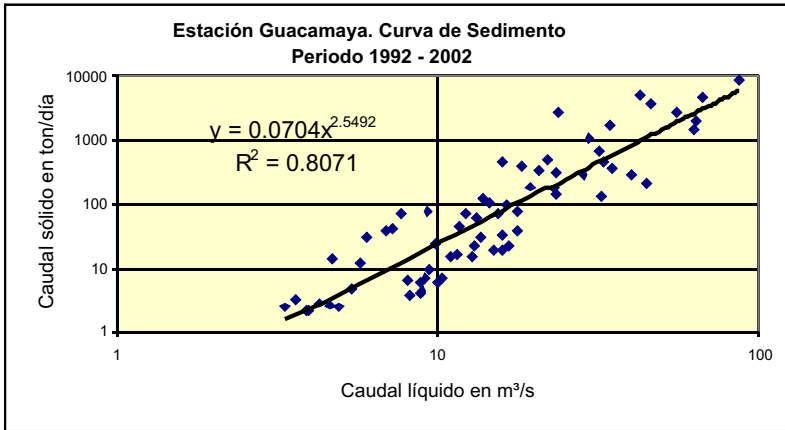
La Figura 2 muestra el ploteo de la información en Log-Log y el trazado de la ecuación que relaciona ambas variables.

Para el periodo 1992 - 2002 el rendimiento obtenido fue de 700.368 ton/año/km² y la pérdida de suelo de 0.875 mm/año.

Como se pudo disponer de caudales diarios de la estación hidrométrica de Guacamaya desde 1987 al 2006 la ecuación fue también aplicada para dicho periodo. El Cuadro 2 presenta los resultados.

Año	Rendimiento	Pérdida Suelo
	(ton/año/km ²)	(mm/año)
1973	111.263	0.139
1974	147.750	0.185
1975	859.247	1.074
1976	137.662	0.172
1977	215.518	0.269
1978	326.393	0.408
1979	2284.035	2.855
1980	554.592	0.693
1981	372.186	0.465
1982	623.205	0.779
1983	301.777	0.377
1984	304.238	0.380
1985	70.835	0.089
1986	527.349	0.659
1987	407.178	0.509
1988	635.954	0.795
1989	260.183	0.325
1990	314.737	0.393
1991	721.555	0.902
1992	291.764	0.365
1993	1154.212	1.443
1994	128.703	0.161
1995	1409.723	1.762
1996	396.404	0.496
1997	394.449	0.493
1998	5098.543	6.373
1999	1463.812	1.830
2000	74.677	0.093
2001	24.651	0.031
2002	141.861	0.177
2003	114.705	0.143
2004	69.254	0.087
2005	282.806	0.354
2006	48.285	0.060
Promedio	596.162	0.745
S. Fondo(15%)		
Total	685.586	0.857

FIGURA 2: Estación Guacamaya. Ploteo QS VS QL



CUADRO 2: Río Humuya en la Estación Guacamaya. Rendimiento y Pérdida de Suelo

Año	Rendimiento	Pérdida Suelo
	(ton/año/km ²)	(mm/año)
1987	150.6035798	0.188254475
1988	1554.783772	1.943479714
1989	630.8049274	0.788506159
1990	709.4182196	0.886772774
1991	308.1359937	0.385169992
1992	2038.584667	2.548230833
1993	305.5494008	0.381936751
1994	240.4778871	0.300597359
1995	1791.775612	2.239719515
1996	557.7196896	0.697149612
1997	373.4576691	0.466822086
1998	1800.001537	2.250001921
2000	340.7901051	0.425987631
2001	74.95226168	0.093690327
2002	132.1481716	0.165185215
2003	217.5991135	0.271998892
2004	141.0399826	0.176299978
2005	1608.406153	2.010507692
2006	957.2654461	1.196581808
Promedio	733.343	0.917
S. Fondo(15%)		
Total	843.344	1.054

4. Río Maragua

Al sitio de la estación hidrométrica Maragua en Maragua la cuenca correspondiente cubre una cuenca hidrográfica de 252.3 km². La información recolectada para esta investigación abarca el periodo de Agosto 1992 a Noviembre 2004.

La relación encontrada entre QL (m³/s) y QS (ton/día) es la siguiente:

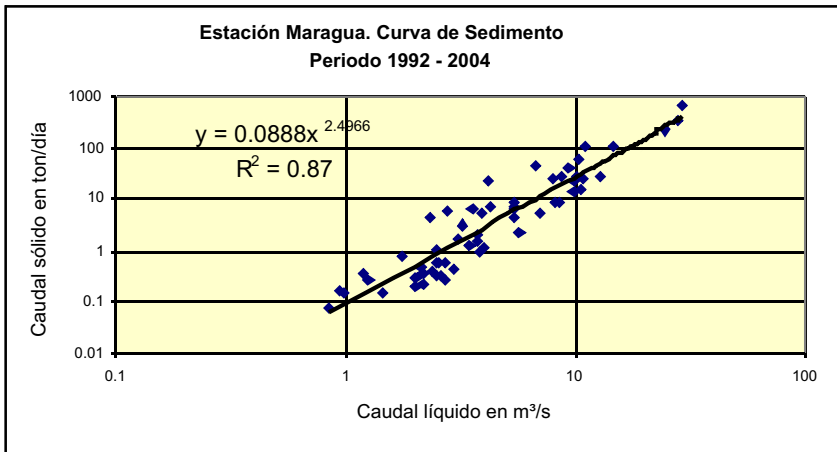
$$QS = 0.0888 * QL^{2.4966}$$

Con un coeficiente de correlación de 0.933.

La Figura 3 muestra el ploteo de la información en Log-Log y el trazado de la ecuación que relaciona ambas variables. Para el periodo 1992 - 2004 el rendimiento obtenido fue de 122.527 ton/año/km² y la pérdida de suelo de 0.153 mm/año.

Como se pudo disponer de caudales diarios de la estación hidrométrica de Maragua desde 1988 al 2006 la ecuación fue también aplicada para dicho periodo. El Cuadro 3 presenta los resultados.

FIGURA 3: Estación Maragua. Ploteo de QS vs QL



CUADRO 3: Río Maragua en la estación Maragua. Rendimiento y Pérdida de Suelo

Año	Sedimento (ton/año)	Rendimiento (ton/año/km ²)	Pérdida Suelo (mm/año)	
1988	26733.43151	105.9589041	0.13244863	M
1989	8795.515522	34.86133778	0.043576672	
1990	42239.01421	167.4158312	0.209269789	
1991	2239.815169	8.877586878	0.011096984	
1992	32695.24362	129.5887579	0.161985947	
1993	27199.12729	107.8047059	0.134755882	
1994	41713.27926	165.3320621	0.206665078	
1995	50322.53639	199.4551581	0.249318948	
1996	42045.32421	166.648134	0.208310167	
2001	29721.49783	117.802211	0.147252764	M
2002	3636.048358	14.41160665	0.018014508	M
2003	6805.769304	26.97490806	0.033718635	
2004	7794.927326	30.89547097	0.038619339	
2005	55939.75653	221.7192094	0.277149012	
2006	41672.1907	165.1692061	0.206461508	M
Promedio	27970.23182	110.861	0.139	
S. Fondo (15%)	4195.534772			
Total	32165.76659	127.490	0.159	

Nota

M Serie completada porque no tiene información en algunos meses del periodo seco.

5. Río Malapa

Al sitio de la estación hidrométrica Malapa en Malapa la cuenca correspondiente cubre una cuenca hidrográfica de 110.33 km².

La información recolectada para esta investigación cubre el periodo de 1991 al 2006. La relación encontrada entre QL (m³/s) y QS (ton/día) es la siguiente:

$$QS = 0.6833 * QL^{1.7487}$$

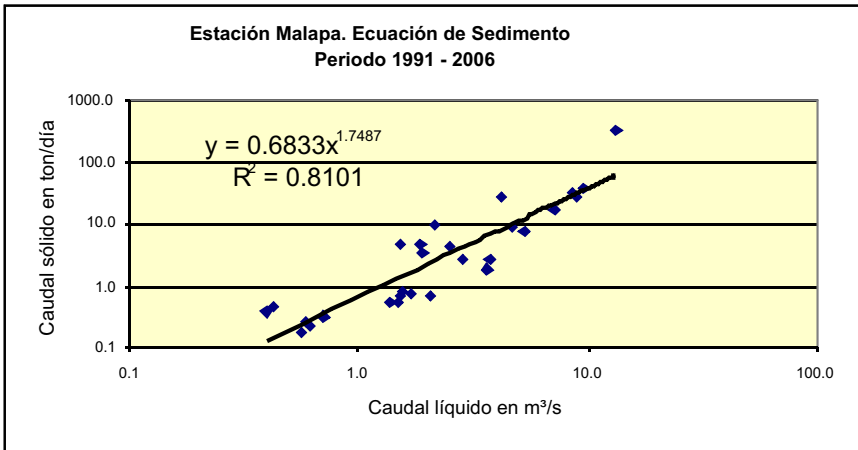
Con un coeficiente de correlación de 0.90.

La Figura 4 muestra el ploteo de la información en Log-Log y el trazado de la ecuación que relaciona ambas variables. Para el periodo 1991- 2006 el

rendimiento obtenido fue de 71.509 ton/año/km² y la pérdida de suelo de 0.089 mm/año.

Como se pudo disponer de caudales diarios de la estación hidrométrica de Maragua desde 1988 al 2006 la ecuación fue también aplicada para dicho periodo. El Cuadro 4 presenta los resultados.

FIGURA 4: Río Malapa. Ploteo QS vs QL



ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN

Debido que no se tiene una serie larga de información de sedimento en suspensión se trató de utilizar toda la información que fue posible obtener; esto evitó seleccionar un período común de análisis para cada estación investigada.

A parte de esto se pudo observar que por lo general la mayor cantidad de información es obtenida en los meses secos. Provocando esto una subestimación de los rendimientos (ton/año/km²) y pérdida de suelo (mm/año); por ejemplo los casos más notorios son los resultados obtenidos en los ríos de Malapa (afuente al embalse de la hidroeléctrica El Nispero) y Maragua (afuente al embalse El Cajón). De averiguaciones en la ENEE se dice que estos ríos tienen un mayor rendimiento y pérdida de suelo.

CUADRO 4: Río Malapa en la estación Malapa. Rendimiento y Pérdida de Suelo

Año	Sedimento	Meses	Pérdida Suelo	Rendimiento
	(ton/año)	Faltantes	(mm/año)	(ton/año/km ²)
1988	10514.009		0.119	95.296
1989	11199.178		0.127	101.506
1990	10222.571		0.116	92.654
1991	5494.083		0.062	49.797
1992	5588.366		0.063	50.651
1993	4491.765		0.051	40.712
1994	2872.759		0.033	26.038
1995	24006.000		0.272	217.584
1996	10724.673		0.122	97.205
1997	4575.768	10,11 y 12		
1998				
1999				
2000				
2001				
2002				
2003	3666.668	1, 2 y 3		
2004	485.531	del 7 al 12		
2005	4621.396	1, 2 3 4 5 y 8		
2006	8938.989		0.101	81.020
Suma	94052.392			
Promedio	9405.239		0.107	85.246
S. Fondo(10%)	940.524			
Total	10345.763		0.117	93.771

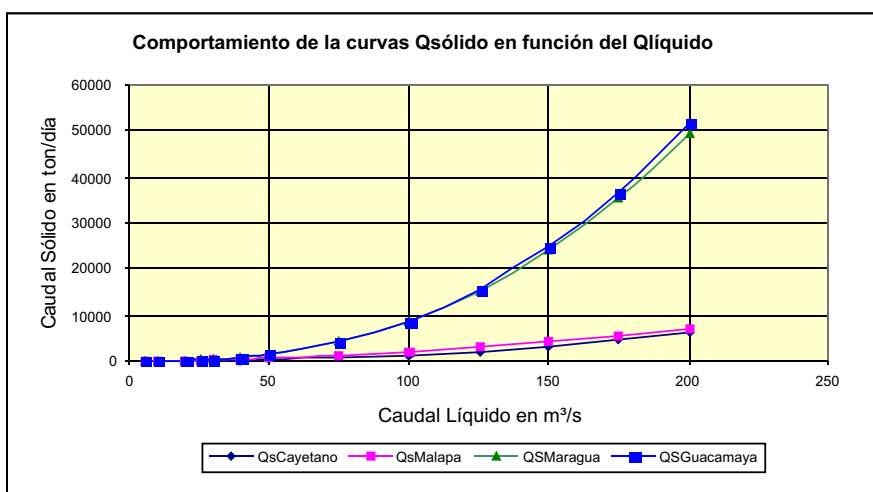
El extrapolar las relaciones hacia años anteriores no nos asegura que el comportamiento de los sedimentos sean iguales a los años recientes. Pero si sería interesante conocer la evolución de los rendimientos a través de periodos anteriores.

Si comparamos las relaciones obtenidas $QS = f(QL)$ (ver Figura 5) se observa que las tendencias entre Guacamaya y Maragua son muy parecidas y de igual forma la de Cayetano se asemeja a Malapa. En el caso de Maragua y Guacamaya ambos son afluentes al embalse El Cajón. La coincidencia entre Cayetano y Malapa aparentemente es estadístico.

De acuerdo a la información disponible las estaciones de Guacamaya y Cayetano son las que presentaron mayor número de información y además, cubren cuencas de mayor amplitud que las otras dos. Al estado actual de la información y para esta investigación los resultados obtenidos en Cayetano y Guacamaya pueden considerarse interesante para juzgar la hipótesis de investigación.

En esta investigación la cuenca del río Humuya en Guacamaya queda como representativa para la zona central del país y la de Cayetano para la zona oriental. Los resultados obtenidos en los rendimiento muestran que ambas zonas tienen un rendimiento que cae entre 500 y 1000 ton/año/km².

FIGURA 5: Comparación de relaciones $QS = f(QL)$



CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos y de su interpretación se concluye lo siguiente:

1. Los datos disponibles de sedimento obtenido por muestreo integral, de las estaciones analizadas en la presente investigación, han sido muestreadas en su mayor parte durante los meses secos. De igual forma la frecuencia de muestreo y su cantidad es variable en cada estación hidrométrica.
2. La extrapolación hacia años anteriores de las relaciones $QS = f(QL)$ no son completamente válidas. Porque el sedimento no dependen únicamente del caudal líquido sino también de otras variables, a mencionar como ejemplo suelo y cobertura vegetal.

3. Las cuencas de los ríos Malapa y Maragua necesitan una mayor cantidad de información para analizar sus rendimientos y pérdida de suelo.
4. De acuerdo al objetivo, a la cantidad y calidad de información disponible durante el desarrollo de la investigación y aceptando que las extrapolaciones favorecen en disponer de una mayor cantidad de información sin asegurar su trascendencia en el tiempo y que el número de muestra es pequeño, se concluye que la hipótesis planteada es aceptada; es decir, que los rendimientos de sedimento de la zona central y oriental del país se encuentran entre 500 y 1000 ton/año/km².

AGRADECIMIENTO

Se agradece a la Empresa Nacional de Energía Eléctrica del país por haber proporcionado la información de sedimento para las estaciones utilizadas en esta investigación; sin cuya información hubiera sido imposible llevarla a cabo.

BIBLIOGRAFÍA

- Avalos Lingan, R. Análisis y Producción de Sedimento para el Proyecto Patuca 3. Tegucigalpa: ENEE; 2007.
- Honduras. Secretaría de Recursos Naturales y Ambiente. Dirección General de Recursos Hídricos. Balance Hídrico de Honduras. Tegucigalpa: 2004.
- Honduras. ENEE y Consultora GERACON. Estudio de Factibilidad Proyecto Patuca 3. Tegucigalpa: 1997.
- Honduras. ENEE y Consultora LAHMEYER. Estudio de Factibilidad de los Proyectos Naranjito y Remolino Sico. Tegucigalpa: 1991.
- Honduras. Información de Caudales diarios y los Sedimentos diarios de las estaciones Malapa, Maragua, Guacamaya y Cayetano.
- Honduras, ENEE y Motor Columbus, Proyecto El Cajón. Estudio de Factibilidad. Volumen 2. Tegucigalpa. Oct. 1973.