

ANÁLISIS PRELIMINAR DE LAS INFLUENCIAS EDÁFICAS Y METEOROLÓGICAS EN LA HISTÉRESIS DE LA RELACIÓN ENTRE CAUDALES Y CONCENTRACIONES DE SEDIMENTOS EN UNA CUENCA TROPICAL

J. P. García¹, J.V. Giraldez^{1,2} y T. Vanwalleghem¹

¹Depto. de Agronomía, Universidad de Córdoba, Edif. Da Vinci, Ctra. Madrid km 396, 14071 Córdoba. e-mail: z22gamoj@uco.es (J.P. García); ag1gicej@uco.es (J.V. Giraldez); ag2vavat@uco.es (T. Vanwalleghem).

²Instituto de Agricultura Sostenible, CSIC, Avda. Menéndez Pidal s/n. 14004 Córdoba. e-mail: ag1gicej@uco.es (J.V. Giraldez).

RESUMEN. En un estudio del comportamiento hidrológico de la cuenca del río Tonusco, afluente del río Cauca que posteriormente vierte al río Magdalena, en la zona de Antioquia (Colombia), se han observados distintas ramas de histéresis en la relación entre los caudales y las concentraciones de sedimentos en el agua.

Aunque situada en la zona tropical, esta cuenca sufre un periodo de baja pluviosidad lo que ha generado un bosque tropical seco en la misma. La variación entre la cubierta vegetal estacional, unido a la ocurrencia de periodos con abundantes chubascos, en unas laderas muy pendientes causa pérdidas de suelo apreciables.

Sobre esta variación estacional intranual se superpone también una variación interanual causada por la ocurrencia de episodios de El Niño con la oscilación sur, ENSO.

Se presentan los resultados con una discusión sobre las causas predominantes de erosión de suelo y transporte de sedimentos.

ABSTRACT. This research was a hydrological study of the Tonusco River Basin, (Antioquia, Colombia), a tributary of the Cauca River and Magdalena River. Hysteresis cycles have been observed in the relationships between discharge and sediment concentration in the Tonusco River Basin. Although the basin is located in the tropical region, it has a season with lower rainfall, which leads to the formation of a tropical dry forest. The basin has high levels of soil loss associated to the seasonal change of vegetation, the high slopes and the intense rainfall periods. The weather of the region also is affected by the Niño Southern Oscillation (ENSO) resulting in soil loss variations.

1.- Introducción

El análisis de la generación y transporte de sedimentos en una cuenca permite estimar el estado de degradación del suelo y del agua, así como su evolución. Esta información es esencial para el desarrollo de programas de gestión racional del territorio.

La producción de sedimentos y solutos en una cuenca depende varios factores muy similares a los de formación de suelo como clima, geomorfología, litología, vegetación y fauna, y sistemas de manejo, a los que hay que añadir el propio factor edáfico.

En las estaciones de aforos que miden la descarga de agua, así como la concentración de sedimentos y solutos se suelen

observar distintos patrones en la relación entre las magnitudes medidas, en particular con la introducción de sensores que registran los datos de forma continua. A veces los caudales líquidos circulan con mayor rapidez que las ondas de concentración de sedimentos, o, por el contrario, el sedimento puede superar la velocidad del flujo de agua. En ambos casos, las ramas de la fase de avance y la de decaimiento forman bucles de histéresis caracterizadas inicialmente por Wood (1977) en Inglaterra y Williams (1989) en Estados Unidos, relacionando caudales líquidos con concentraciones de sedimentos. Posteriormente se han detectado estos ciclos de histéresis en las relaciones entre caudales y concentración de otras sustancias disueltas o dispersas en el agua de ríos y arroyos (*e.g.* Krueger et al, 2007). Comoquiera que sea la forma de los bucles mencionados, su ocurrencia indica la influencia temporal de los diferentes factores, y son, por tanto, importantes para caracterizar el comportamiento de la cuenca, y, en particular, de la generación de escorrentía y de sedimentos.

En esta comunicación se muestran los resultados preliminares de un estudio de la cuenca del río Tonusco, afluente del río Cauca, y luego del río Magdalena, que desemboca en el Mar Caribe. La cuenca está situada entre los municipios de Giraldo y Santa Fe de Antioquia, en Colombia. En este estudio se muestran unos ciclos de histéresis en las relaciones entre caudal líquido y concentración de sedimentos.

2.- Materiales y métodos

El río Tonusco nace en la cordillera Tonusco Arriba, cerca al páramo de las Alegrías, (6°34'21"N, 76°0'40"W) y desemboca en el río Cauca (6°30'49"N, 75°49'11"W, Saneambiente, 2011). En su cuenca están los municipios de Santa Fe de Antioquia y Giraldo, figura 1.

La elevación en la cuenca oscila entre 450 y 3025 m sobre el nivel medio del mar con una pendiente media de 39.4 % en la extensión total que es 393 km². Los suelos de la cuenca están poco desarrollados, perteneciendo a los subórdenes Andepts y Orthents (I.G Agustín Codazzi, 1983). La cuenca está ocupada por bosques naturales, un 21% de la superficie, mezclas entre praderas y espacios naturales, un 35%, u otros cultivos, 28%.

La precipitación media anual oscila entre 1000 y 2200 mm

entre las diferentes estaciones de la cuenca con dos máximos anuales en abril-mayo y octubre-noviembre y un periodo seco más intenso entre diciembre y febrero. El clima de la cuenca es del tipo Aw (sabana tropical, Peel y col., 2007). El caudal medio del río Tonusco en la unión con el río Cauca es $7.12 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$.

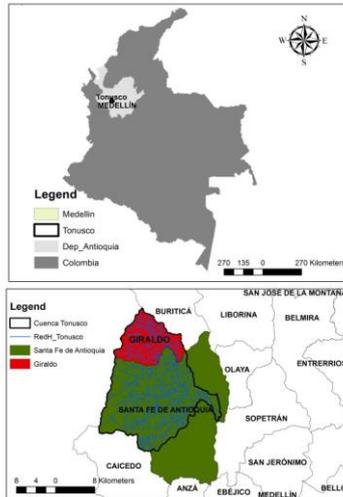


Fig. 1. Localización de la cuenca del río Tonusco.

Con respecto a la geología del terreno, en la parte alta la litología predominante corresponde a la de rocas metamórficas, aunque en el sector sur de la cuenca, cerca al paramo de las alegrías, se tienen mezclas de rocas ígneas y metamórficas y en las zonas bajas, rocas ígneas. En la parte media de la cuenca la litología comúnmente encontrada se corresponde con las rocas sedimentarias (areniscas, arcillolitas, grawacas) y rocas metamórficas en los sectores más al sur. En la región baja de la cuenca, se tiene predominantemente rocas sedimentarias clasificándose como areniscas, arcillolitas, conglomerados en las zonas más altas y areniscas, arcillas pizarrosas en la parte baja. También en la parte alta de la zona más baja de la cuenca, asociadas al cauce principal del río se tienen rocas ígneas. En la figura 2, se presenta la clasificación UCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos) de los suelos de la cuenca, a partir de información suministrada por el IGAC (2019). Se observa como en la parte alta de la cuenca predominan los suelos rocosos, en la parte media los suelos de texturas finas a medias y en la parte baja los suelos arenosos.

En la cuenca se seleccionaron diferentes estaciones meteorológicas y limnimétricas para medir las precipitaciones, caudales y concentraciones de sedimentos en el río, figura 3. La Tabla 1 muestra los datos usados. Las estaciones meteorológicas IDEAM, registran la precipitación mediante el uso de pluviómetros, mientras que las estaciones limnimétricas se aforan los caudales midiendo la altura la lámina de agua con sensores al paso por un canal rectangular. Para el registro de concentraciones

de sólidos suspendidos, se toman muestras diarias en la estación limnimétrica, para su posterior análisis en los laboratorios.

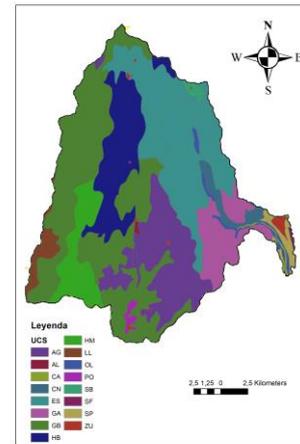


Fig. 2. Clasificación de suelos UCS, para la cuenca del río Tonusco, según datos del IGAC, escala 1:100000.

Se analizaron las relaciones entre la precipitación, el caudal y la concentración de sedimentos transportados por el río, a escala anual, mensual y diaria; identificándose la formación de bucles, o ciclos de histéresis. Aunque hay una gran variedad de estos bucles (e.g. Evans y Davies, 1998), se reconocen varios tipos (e.g. Rose y col., 2018, Table 2), ascendentes y descendentes en la concentración, y con sentido de giro horario, antihorario, o con doble bucle, en forma de ocho.

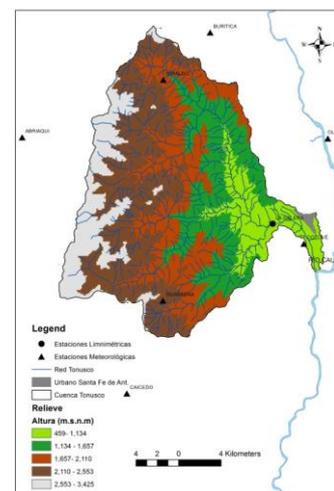


Fig. 3. Estaciones de medida de datos climáticos e hidroquímicos.

Con respecto a los ciclos de histéresis a escala diaria, se seleccionaron episodios de precipitación en los cuales se tuviera generación de escorrentía y arrastre efectivo de sedimentos, pues en muchos casos, aunque hay registros de lluvia, no hay precipitación efectiva por procesos de infiltración.

Para evaluar la influencia de las condiciones climáticas en

los ciclos de histéresis, se utilizaron las descripciones climatológicas de la región realizadas por Arango y Velázquez (2016), Velez y Rhenals (2008) y los análisis de balance hidrológico de una cuenca vecina al Tonusco, con un régimen climático casi idéntico, desarrollados por García et al (2019).

Tabla 1. Registros de datos meteorológicos (M) y limnimétricos (L).

Estación	Periodo analizado	Registros
Cotové (M)	1975-2015	12691
Guasabra (M)	1975-2015	13171
Giraldo (M)	1970-2015	13473
Abriaquí (M)	1974-2015	13366
Buriticá (M)	1970-2015	13240
La Galera- (L - Aforo)	1970-2015	13312
La Galera - (L- Sedimentos)	1970-2015	11286

Para cuantificar la magnitud de estos bucles de histéresis se estimaron unos índices propuestos por Lawler y col. (2006), y modificados ligeramente por Lloyd y col. (2015).

2.1.-Determinación de los valores de los índices de Histéresis de Lawler.

En los bucles con giro horario la concentración de sedimentos crece y decrece con el caudal, pero con menores valores para un mismo caudal en la fase de retroceso que en la fase de avance. El índice de histéresis correspondiente (*HI*), se estima a partir de la concentración de sedimentos en la fase de avance, C_{av} , y en la fase de decaimiento, C_{dc} , medidos en un valor intermedio del caudal Q_{md} , determinado por una relación lineal entre el caudal mínimo, Q_{mn} y máximo, Q_{mx} , con la ayuda de un coeficiente δ .

$$Q_{mid} = \delta(Q_{max} - Q_{min}) + Q_{min} \quad (1)$$

El índice es

$$HI_{mid} = \frac{TU_{RL}}{TU_{FL}} - 1 \quad (2)$$

Donde TU_{RL} es el valor de la turbidez con respecto al caudal medio del ciclo (Q_{mid}), en la cresta del sedimentograma; TU_{FL} es la turbidez asociada a Q_{mid} , cuando el caudal del agua vuelve a los valores previos a la crecida. Para el presente estudio, debido a la probada relación directa entre las turbideces y las concentraciones de sedimentos, se reemplazarán las variables referenciadas anteriormente por SST_{RL} y SST_{FL} .

En los bucles antihorarios la concentración de sedimentos es más elevada en la fase de retroceso que en la de crecida, por lo que se usa una ecuación distinta.

$$HI_{mid} = 1 - \frac{TU_{FL}}{TU_{RL}} \quad (3)$$

2.2.- Determinación de los índices de histéresis de Lloyd y col.

El índice de histéresis de Lloyd y col. (2016) se determina como el promedio de la diferencia entre producto entre las concentraciones normalizadas de sedimentos en la curva superior e inferior con el caudal normalizado.

$$HI_{Lloyd} = \frac{\sum_{i=1}^n (SST_{i superior}^* Q_i^* - SST_{i inferior}^* Q_i^*)}{n} \quad (4)$$

con $i \in [1\%, 100\%]$

Los valores de la concentración de sedimentos se normalizan con los valores máximos y mínimos, (SST_i^*),

$$SST_i^* = \frac{SST_i - SST_{min}}{SST_{max} - SST_{min}} \quad (5)$$

y de la misma forma se hace con los caudales (Q_i)

$$Q_i^* = \frac{Q_i - Q_{min}}{Q_{max} - Q_{min}} \quad (6)$$

3.- Resultados y Discusión

3.1.- Relaciones entre la precipitación, el caudal y la concentración de sedimentos.

Se seleccionaron 16 diferentes episodios causados por pulsos aislados de precipitación, teniendo en cuenta los casos con generación de escorrentía y arrastre de sedimentos. En la figura 4, se presentan 6 de los sedimentogramas obtenidos, para el periodo comprendido entre 1998 y 2011.

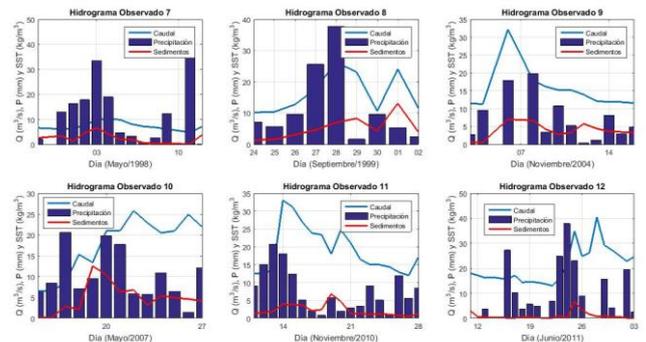


Fig. 4. Algunos de los sedimentogramas de los episodios de precipitación seleccionados entre las series de registros de la Estación La Galera, 1977-2015.

En la figura 5 se muestra las relaciones entre caudales y concentraciones de sedimentos. La mejor curva de ajuste fue una función exponencial con coeficientes de correlación, R^2 , entre 0.4 y 0.92.

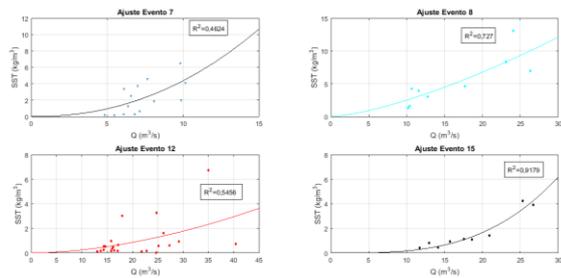


Fig. 5. Algunos ajustes de funciones potenciales a los datos de caudales y concentraciones de sedimentos de los episodios de lluvia de la figura 4.

La variabilidad de los ajustes puede deberse a la influencia de los procesos de arranque y transporte de los sedimentos, así como a las interacciones entre ellos.

Se seleccionaron los episodios con mayores coeficientes de correlación para profundizar su análisis.

3.2.- Identificación de ciclos de histéresis.

La relación entre caudal y concentración de sedimentos a escala anual, figura 6. puede servir para explorar la posible influencia de la Oscilación del Sur y El Niño, en las siglas inglesas, ENSO. En dichos episodios existen alteraciones de los regímenes de precipitación de la zona andina Colombia, asociados a la alteración de los vientos alisios y las zonas de inter-convergencia tropical de vientos, por el calentamiento o enfriamiento excesivo de regiones meridionales del océano pacifico, teniéndose reducciones en la precipitación promedio anual en fenómenos denominados “El Niño” y aumentos en los denominados “La Niña”. En la región estudiada, durante los fenómenos del Niño se tienen reducciones de la lluvia anual entre los 200 mm y 400 mm con respecto al promedio y en los fenómenos de la Niña se tienen aumentos entre 180 mm y 420 mm sobre el promedio anual.

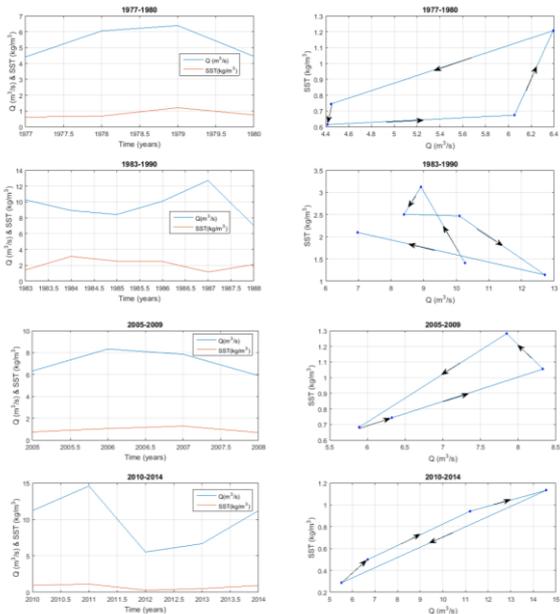


Fig. 6. Hidrogramas y sedimentogramas obtenidos con valores promedio

anual de caudales y concentración de sedimentos, (ver izquierda), y relaciones entre valores promedio anual de caudal y concentración de sedimentos, (ver derecha), en el río Tonusco entre los periodos 1977-1980, 1983-1990, 2005-2009 y 2010-2014; seleccionados teniendo en cuenta, las transiciones entre años con periodos ENSO y regímenes normales.

Los años en los que se han registrado fenómenos ENSO, (NOAA, 2019), en e periodo de estudio se recogen en la tabla 2.

Tabla 2. Periodos anuales en los que se manifiestan fenómenos ENSO (NOAA, 2019).

Fenómeno	Años
El Niño	1976-1977, 1982-1983, 1986-1987, 1991-1992, 1997, 2002, 2009 y 2015-2016
La Niña	1988, 1995-1996, 1998-2000 y 2010-2011

Para la mayoría de los periodos en los que se presentaron transiciones entre ocurrencia de fenómenos del “Niño” y años con regímenes hidrológicos normales, se generaron bucles con sentido de giro antihorario. Una causa probable para el sentido de giro identificado, es el cambio en las dinámicas de precipitación año tras año, viéndose una reducción de las mismas en los periodos iniciales y con ello de los caudales y las concentraciones de sedimentos, para luego presentarse su aumento gradual con el restablecimiento de las lluvias en periodos hidrológicos normales. Este es el caso de los periodos comprendidos entre 1977-1980 y 2005-2009.

En años de transición fenómeno de “La Niña” y periodos hidrológicos normales, se identificaron sentidos de rotación horaria de los ciclos, que pueden ser resultado del aumento proporcional de las lluvias, caudales y concentraciones de sedimentos en los años iniciales y la caída gradual de estos parámetros con el restablecimiento de las condiciones hidrológicas en los años siguientes. Este es el caso del periodo comprendido entre los años 2010 y 2014.

En la transición entre los fenómenos del Niño y la Niña se identifican bucles con forma de ocho, pues se presentan los sentidos de giro horario y antihorario, probablemente asociados a la variación de las lluvias anteriormente descrita. Este es el caso del periodo comprendido entre 1983 y 1990.

La figura 7 expone la relación entre caudal y concentración de sedimentos a una escala mensual.

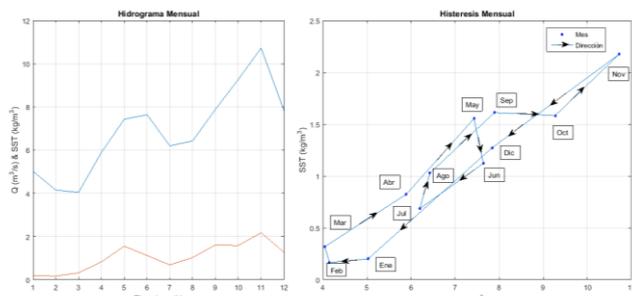


Fig. 7. Hidrograma y sedimentograma obtenido con valores promedio mensual de caudales y concentración de sedimentos, (ver izquierda) y relación entre los valores medios mensuales de caudal y concentración de sedimentos en el río Tonusco (ver derecha), para cada mes del año, en la estación La Galera, entre 1977 y 2015.

Se observan desfases claros entre caudales y concentraciones en los diferentes meses del año. El primer valor máximo de la concentración ocurre en el mes de mayo, mientras que el primer caudal máximo aparece en el mes de junio. El siguiente valor máximo de concentración, algo más elevado que el anterior ocurre en el mes noviembre, esta vez, coincidiendo con el valor máximo de caudal del fin de año.

Teniendo en cuenta la distribución bimodal de la precipitación interanual (Arango y Velázquez, 2016), se observa que los dos primeros meses del año, en los que la precipitación es menor, los caudales y las concentraciones de sedimentos decrecen, llegando a valores mínimos en febrero. En el mes de marzo, aparecen los primeros chubascos en la parte alta de la cuenca, que pueden algunas generar escorrentía y arrastre de sedimentos, que, sin embargo, no son suficientes para aumentar los caudales de la fuente, debido a que en los meses antecedentes se tuvieron precipitaciones mínimas y altas tasas de evaporación por las altas temperaturas que se presentan en la zona, de manera, que los suelos están muy secos y la mayor parte de las aguas lluvias se infiltran. Durante los meses de abril y mayo, se producen las mayores precipitaciones del año en toda la región detectándose una tendencia creciente de los caudales y el transporte de sedimentos. En el mes de junio, aunque el caudal sigue creciendo, una leve reducción en las lluvias hace que la escorrentía y producción de sedimentos bajen. La tendencia en las precipitaciones medias, durante los meses de julio y agosto, es a la reducción, por lo que los caudales disminuyen y con esto la producción de sedimentos. El aumento de las lluvias en septiembre, hace que los caudales y el transporte de sedimentos aumenten de forma drástica, por lo cual, se genera un micro bucle, durante el trimestre descrito.

La precipitación alcanza nuevamente niveles máximos en los meses de octubre y noviembre, siendo el primero, el de mayores registros, sólo superado en algunas ocasiones mayo. Debido a la saturación de los suelos, el alto nivel piezométrico de los acuíferos y con esto la producción de

niveles máximos en el caudal de escorrentía, los caudales de la fuente alcanzan los niveles máximos del año. Aunque los niveles de precipitación máximos ocurren en octubre, los caudales y las concentraciones de sedimentos no son máximas en este periodo, sino en el mes de noviembre, probablemente, porque los niveles máximos de escorrentía no corresponden con los niveles máximos de los caudales base, y además, producen agotamiento de la producción de sedimentos en la cuenca, por lo tanto, ocurre recesión del hidrograma y del sedimentograma, que se evidencia con la formación de un bucle en forma de ocho. En el mes de diciembre las precipitaciones se siguen reduciendo, por lo que bajan los caudales y la concentración de sedimentos efectivamente transportados. Según lo anterior, se evidencia que el sentido predominante de la histéresis es el horario y que hay una relación directa con la precipitación.

El sentido horario del ciclo de histéresis causado por la escorrentía de la primera estación lluviosa del año parece indicar que el agua descarga la masa de sedimento depositado en el periodo menos lluvioso precedente cuando los menores caudales no pueden acarrear todo el sedimento generado. Esta observación coincide con la de Tuset y col. (2016). En otros casos, dicho patrón puede ser debido a que los chubascos más intensos ocurren en las proximidades de la unión del río Tonusco con el río Cauca, que es donde está localizada la estación de aforos. En el río Tonusco, durante la primera estación lluviosa, en los meses de abril y mayo, parte del sedimento procede de las zonas próximas a los cauces que quedaron parcialmente desprotegidas durante la etapa precedente más seca.

En el doble ciclo con forma de ocho, Sander y col. (2011) sugieren que puede haber un cambio en el tamaño de las partículas arrastradas por la corriente, más finas al principio y más gruesas al final, que justifique la variación en el patrón de la relación caudal y descarga. Este aspecto necesita una investigación más detallada. En el río Tonusco se presenta en el mes de octubre, en el cual, aunque aumenta el caudal, la concentración de sedimentos se reduce con respecto al mes anterior, de menor escorrentía.

En el ciclo con sentido anti-horario, parece que los sedimentos se generan en una zona alejada de la estación de aforos por lo que tardan en llegar a ella coincidiendo con la fase de decaimiento (Tuset y col., 2016). House y Warwick (1998), y posteriormente Chanut y col., (2002) han propuesto una explicación más sólida basada en los balances de agua y solutos en el cauce del río. Yang y Lee, (2018), explican la formación de ciclos basados en el estudio de los tiempos de viaje del agua y los sedimentos. Con respecto a los episodios a escala diaria, de los cuales se muestran algunos en la figura 8, se identifica uno con una marcada forma de ocho y otros cinco con una porción que sigue este ciclo. El primer ciclo de estos ocurrió en noviembre de 1984, y los otros en diciembre de 1990,

mayo de 1998, noviembre de 2010, junio de 2011 y noviembre de 2014. Este tipo de ciclos tienden a ocurrir en el último trimestre del año, aunque pueden aparecer en otros periodos por la variabilidad espacial de la precipitación.

Los eventos que presentan tendencia de histéresis horaria, son los de junio de 1978, mayo de 1998, noviembre de 2010, abril de 2012, septiembre y octubre de 2014, y mayo de 2015. Esta situación indica una relación directa entre la escorrentía y el arrastre de sedimentos, la cual, se focaliza en el segundo trimestre del año, cuando comienza la primera temporada de lluvias.

Hay ciclos anti-horarios en octubre de 1977, diciembre de 1990, noviembre de 2004, junio de 2011, noviembre de 2014.

Como se puede observar, a escala diaria se sigue una tendencia parecida a la observada a escala mensual, pues los ciclos anti-horarios ocurren en su mayoría a final de año, asociados a la variabilidad espacial de la precipitación y escorrentía, que son muy notables en la parte alta de la cuenca, además de la caída drástica de la precipitación entre diciembre y enero.

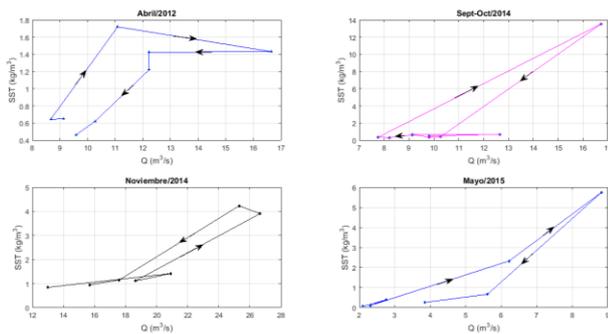


Fig. 8. Algunos ciclos de histéresis a escala diaria, obtenidos para los episodios de lluvia seleccionados en la figura 4.

También, fueron graficados algunos ciclos de histéresis representativos, con su respectivo hidrograma, como se puede observar en la figura 9, con el fin de identificar en la escala temporal, los diferentes ciclos de histéresis, tal y como lo realizan Yang y Lee (2018).

3.3.- Evaluación de los ciclos de histéresis

Inicialmente se calculó el índice de histéresis de Lawler y col. (2006), con las ecuaciones 1-2-3. Los resultados obtenidos a escala mensual se exponen en la tabla 3.

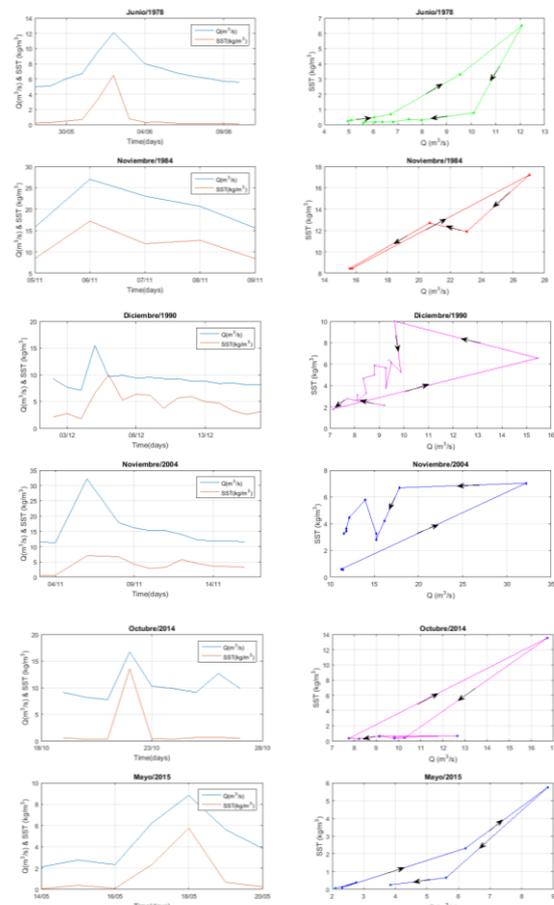


Fig. 9. Hidrogramas, Sedimentogramas y ciclos de histéresis de eventos diarios seleccionados.

Tabla 3. Índices de histéresis mensuales de Lawler y col. (2006).

Periodo	Q_{mid}	SST_{FL}	SST_{RL}	Índice HI_{mid}	Sentido
	m^3s^{-1}	$kg m^{-3}$			
Completo	7.87	1.30	1.61	0.167	Horario
Ene-Abr	5.46	0.35	0.70	1.00	Horario
May-Ago	6.89	0.85	1.30	0.625	Horario
Sept-Dic	7.87	1.62	1.30	-0.246	Anti-horario

En la tabla 3 se observa que, a escala mensual predomina la tendencia horaria sobre las demás. Al realizar el análisis por trimestre la tendencia horaria se mantiene en los primeros tres trimestres, con una tendencia anti-horaria en el último trimestre, coincidiendo con lo detectado previamente.

La mayor magnitud del índice horario obtenido corresponde a la del primer trimestre, en donde hay una clara relación entre la generación de escorrentía por el aumento gradual de las lluvias y el arrastre de sedimentos. Posteriormente el índice disminuye con la precipitación, durante el final del segundo trimestre y todo el tercer trimestre. Por último, se obtiene un índice de magnitud negativa asociado a un ciclo anti-horario, por la recesión

anteriormente descrita al final del año.

Los índices de histéresis para los episodios diarios, (tabla 4), muestran tendencias horarias y antihorarias en 7 y 5 casos respectivamente. Con respecto a los ciclos en forma de ocho las tendencias dominantes son:

- noviembre de 1984: Horaria
- diciembre de 1990: Antihoraria
- mayo de 1998: Horaria
- noviembre de 2010: Horaria
- junio de 2011: Antihoraria
- noviembre de 2014: Antihoraria.

Los resultados coinciden con las observaciones previas, en meses en los que cambian los regímenes de húmedos a secos, por la reducción de las lluvias. Además, se debe tener en cuenta la variabilidad espacial de la precipitación, la cual es mucho mayor durante todo el año en las partes altas y alejadas a la red de drenaje principal, sobre todo en los meses de mayo, octubre y noviembre, evidenciando posibles amortiguamientos en los hidrogramas y sedimentogramas.

Los valores de los índices para ciclos horarios oscilan entre 0.04 y 4.56, siendo los de mayor magnitud aquellos correspondientes al primer semestre del año.

Los valores de los índices para ciclos anti-horarios oscilan entre -0.84 y -0.27, con los más bajos en los meses de octubre y noviembre, lo que indica una mayor magnitud del ciclo de histéresis anti-horario, como es la tendencia del periodo.

Tabla 4. Índices de histéresis diarios de Lawler y col. (2006).

Periodo	Q _{mid}	SST_FL	SST_RL	HI _{mid}	Sentido
	m ³ s ⁻¹	kg m ⁻³			
Octubre 1977	9.13	0.84	0.61	-0.38	AH
Junio 1978	8.52	0.45	2.50	4.56	H
Nov. 1984	21.4	12.50	13.00	0.04	H
Dic. 1990	12.3	8.20	4.90	-0.67	AH
Mayo 1998	8.37	1.98	5.38	1.72	H
Nov. 2004	21.8	6.90	3.75	-0.84	AH
Nov. 2010	24.1	4.10	4.90	0.20	H
Junio 2011	28.4	4.20	3.30	-0.27	AH
Abril 2012	12.9	1.41	1.62	0.15	H
Sept-Oct 2014	12.9	5.80	7.90	0.36	H
Nov. 2014	19.8	2.08	1.60	-0.30	AH
Mayo 2015	5.47	0.62	1.91	2.08	H

H: horario, AH: Antihorario

Los resultados son consistentes con los del análisis precedente.

Los ciclos de mayor índice de giro horario son los de junio de 1978 y mayo de 1998, mientras que para las tendencias

antihorarias son las de octubre de 1977 y noviembre de 2004.

En la tabla 5 se muestran los índices de Lloyd y col. (2015) calculados a escala mensual. Estos presentan una gran variabilidad. Las diferencias en los resultados se deben a la escala de detalle que tienen ambos métodos, como han señalado Krueger y col. (2012) y Aich y col. (2014).

Tabla 5. Índices de histéresis mensuales de Lloyd y col. (2015).

Periodo	Índice HI _{Lloyd}	Sentido
Completo	0.0751	Horario
Ene-abr	0.0121	Horario
May-Ago	0.0816	Horario
Sept-Dic	-0.0735	Anti-horario

Para los índices de histéresis evaluados a escala diaria, se repite la tendencia anterior, pero los valores obtenidos muestran una gran variación entre ambos métodos. Sólo se parecen entre sí los datos de los episodios noviembre de 1984, noviembre de 2010, junio 2011 y abril de 2012, lo que representa la tercera parte de los casos. En la tabla 6, se pueden consultar los resultados.

Tabla 6. Índices de histéresis diarios de Lloyd y col. (2015).

Periodo	Índice HI _{Lloyd}	Sentido
Octubre 1977	-0.170	Anti-Horario
Junio 1978	0.125	Horario
Noviembre 1984	0.029	Horario
Diciembre 1990	-0.071	Anti-Horario
Mayo 1998	0.214	Horario
Noviembre 2004	-0.077	Anti-Horario
Noviembre 2010	0.167	Horario
Junio 2011	-0.266	Anti-Horario
Abril 2012	0.120	Horario
Sept-Oct 2014	0.033	Horario
Noviembre 2014	-0.121	Anti-Horario
Mayo 2015	0.073	Horario

Con respecto a los análisis mensuales y diarios, se observa que la tendencia en la mayoría de los casos estudiados a escala mensual pertenece al tipo horario. Esto indica que los sedimentos la mayor parte del tiempo, se generan en las zonas aledañas al cauce.

Los estudios anuales, muestran una tendencia de giro antihoraria predominante, tendencia que según los análisis realizados podría estar asociada a la ocurrencia del fenómeno del Niño más frecuente durante los años de estudio, que el de la Niña

4.- Conclusiones

Se observó que los ciclos de histéresis a escala anual dependen de la ocurrencia de los fenómenos ENSO, favoreciéndose ciclos antihorarios en periodos de cambio entre fenómeno del “Niño” y años hidrológicos normales, pues el aumento de la precipitación asociada depende del caudal y la concentración de sedimentos transportados.

Con respecto al ciclo de histéresis a escala mensual, se comprobó que existe una relación directa con la variabilidad de la precipitación media mensual y espacial. En periodos de cambio entre estaciones secas y lluviosas son frecuentes los ciclos horarios, mientras que en la transición entre periodos húmedos y secos hay recesiones del hidrograma y con esto ciclos anti-horarios. La inversión del sentido del ciclo de histéresis genera un bucle en forma de ocho.

A escala diaria los ciclos de histéresis muestran un comportamiento similar en algunos casos a las tendencias mensuales. La mayoría de ciclos en forma de ocho coinciden con los meses de octubre y noviembre, con hidrogramas decayendo.

También, se ha comprobó que el sentido y la forma de los ciclos de histéresis, están asociados a la variabilidad espacial de la lluvia en la cuenca.

Los resultados obtenidos en los índices de histéresis calculados son coherentes con las observaciones de las gráficas realizadas, aunque se presenta una alta varianza en algunos de los resultados obtenidos para cada una de las diferentes metodologías. El índice de Lloyd y col. (2015), parece más adecuado que el de Lawler y col. (2006) pues evalúa los ciclos con mayor detalle.

5.- Bibliografía

- Aich, V., A. Zimmermann y H. Elsenbeer, 2014. Quantification and interpretation of suspended-sediment discharge hysteresis patterns: How much data do we need? *Catena*, 122, 120-129.
- Arango, Y., y Velázquez, C., 2016. “Dinámica del Clima y la vegetación en los Últimos 200 años del Holoceno en el Humedal La Bramadora , Antioquia-Colombia. ”. Medellín: Tesis doctoral Escuela de Geociencias. Universidad Nacional de Colombia.
- Chanat, J.G., K.C. Rice y G.M. Hornberger, 2002. Consistency of patterns in concentration-discharge plots. *Water Resour. Res.*, 38, 10.1029/2001WR000971.
- Eder, A., & col, y., 2010. Comparative calculation of suspended sediment loads with respect to hysteresis effects. *J. Hydrol.*, 389: 168-176.
- Evans, C. y T.D. Davies, 1998. Causes of concentration/discharge hysteresis and its potential as a tool for analysis of episode hydrochemistry, *Water Resour. Res.*, 34, 129-137.
- García, J. P., T. Vanwalleghem, J.V. Giráldez, J. Morató, y J. Montoya, 2019. Determination of Environmental Flows for the Barbuda Stream in the municipality of Olaya, Antioquia, Colombia. *Rev. Fac. Ing., Universidad de Antioquia*, 91:1-32.
- House, W.A. y M.S. Warwick, 1998. Hysteresis of the solute concentration/discharge relationship in rivers during storms. *Wat. Res.*, 32, 2279-2290.
- I.G. Agustín Codazzi, 1983. *Mapa de suelos*. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Subdirección de Agrología y Botánica, Ministerio de Hacienda y Crédito Público, Bogotá.
- Krueger, T., J. Freer, J.N. Quinton y C.J.A. Macleod, 2007. Processes affecting transfer of sediment and colloids, with associated phosphorus, from intensively farmed grasslands: a critical note on modelling of phosphorus transfers. *Hydrol. Proc.* 21, 557-562.
- Krueger, T., J.N. Quinton, J. Freer, C.J.A. Macleod, G.S. Bilotta, R.E. Brazier, J.M.B. Hawkins y P.M. Haygarth, 2012. Comparing empirical models for sediment and phosphorus transfer from soils to water at field and catchment scale under data uncertainty. *Eur. J. Soil Sci.*, 63, 211-222.
- Lawler, D.M., G.E. Petts, I.D.L. Foster, y S. Harper, 2006. Turbidity dynamics during spring storm events in an urban headwater river system: the Upper Tame, West Midlands, UK. *Sci. Tot. Environ.*, 360, 109-126.
- Lloyd, C.E.M., J.E. Freer, P.J. Johnes, y A.L. Collins, 2015. Testing an improved index for analysing storm discharge-concentration hysteresis. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 20, 625-632.
- Peel, M.C., B.L. Finlayson, y T.A. McMahon, 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 11, 1633-1644.
- Rose, L.A., D.L. Karwan, y S.E. Godsey, 2018. Concentration-discharge relationships describe solute and sediment mobilization, reaction, and transport at event and longer time scales. *Hydrol. Proc.*, 32, 2829-2844,
- Sander, G. C., T. Zheng, P. Heng, Y. Zhong y D.A. Barry, 2011. Sustainable soil and water resources: Modelling soil erosion and its impacts on the environment. *Proc. 19th Int. Congr. Model. Simul., Perth Australia, 12-16 dec.* <http://mssanz.org.au/modsim2011>, 45-56.
- Saneambiente , 2011. “Estudios y Diseños del Plan Maestro de Acueducto y Alcantarillado de los Municipios de San Jerónimo, Santa Fe de Antioquia, Sopetrán, Olaya y el corregimiento de Sucre, Informe Diagnostico Municipio de Olaya”. San Jerónimo.
- Tuset, J., D. Vericat y R.J. Batalla, 2016. Rainfall, runoff and sediment transport in a Mediterranean mountainous catchment, *Sci. Tot. Environ.*, 540, 114-132.
- Williams, G. P., 1989. Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in Rivers. *J. Hydrol.*, 111: 89-106.
- Wood, P. A., 1977. Control of variation in suspended sediment concentration in the river Rother West Sussex, England. *Sedimentol.*, 24: 437-445.
- Yang, C.-C., y K.T. Lee, K., 2018. Analysis of flow-sediment rating curve hysteresis based on flow and sediment travel time estimations. *Int. J. Sedim. Res.*, 33, 171–182.

