

**ESTIMACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL FENÓMENO ENOS SOBRE
LA VARIABILIDAD DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN LA
CUENCA DEL RÍO MAGDALENA ENTRE LOS AÑOS 1980 – 2010**

SARA MARIA MIRA PUERTA

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título
de Geóloga

Asesor: PhD. Juan Darío Restrepo Ángel

MEDELLÍN
UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE CIENCIAS

2018

CONTENIDO

1. Introducción	4
1.1 El ENOS en Colombia	6
1.2 Área de estudio: Cuenca del río Magdalena	8
1.2.1 Geología y geomorfología general de la cuenca	8
1.2.2 Patrones hidro climáticos de la cuenca	12
2. Objetivo	14
3. Metodología	14
2.1 Datos	14
2.2 Regresiones lineales entre transporte de sedimentos y el índice SOI	17
2.3 Series de tiempo (1980 – 2010)	18
2.4 Georreferenciación espacial de la relación entre transporte de sedimentos y el ENOS	18
3. Resultados	19
3.1 Transporte de sedimentos (1980 – 2010)	19
3.2 Regresiones lineales entre transporte de sedimentos (Qs) y el ENOS	23
3.3 Series de tiempo del transporte de sedimentos y el índice SOI (1980 - 2010)	26
3.4 Georreferenciación de los modelos de regresión lineal y las series de tiempo para la cuenca del río Magdalena en el periodo 1980 – 2010	31
4. Discusión	34
5. Conclusiones	35
6. Bibliografía	36

TABLAS

Tabla 1	22
Tabla 2	26

FIGURAS

Figura 1	9
Figura 2	11
Figura 3	13
Figura 4	15
Figura 5.1	20
Figura 5.2	21
Figura 5.3	22
Figura 6.1	24
Figura 6.2	25
Figura 7	27
Figura 8.1	28
Figura 8.2	29
Figura 9	30
Figura 10	32
Figura 11	33

RESUMEN

En la cuenca del río Magdalena, la más importante de los Andes colombianos, el fenómeno del ENOS tiene un control del 37% sobre la variabilidad del transporte de sedimentos, según modelos de regresión lineal que relacionan datos de 30 años (1980 – 2010) del índice SOI (Southern Oscillation Index) y del transporte de sedimentos. En los modelos de regresión se evidencia que en el río Cauca, principal tributario del río Magdalena, el ENOS controla el 31% de la variabilidad del transporte de sedimentos, y en el río Carare, el segundo tributario que más transporta sedimentos en la cuenca, el 47%; ambos tributarios representan el 83% del área evaluada de la cuenca. El comportamiento del transporte de sedimentos en la cuenca del Magdalena, en ese mismo intervalo de tiempo, está asociado a anomalías positivas en presencia de La Niña y anomalías negativas en presencia de El Niño. Particularmente en Calamar, estación de aforo que representa la sumatoria de todos los procesos de erosión y depositación de sedimentos que ocurren en la cuenca. El transporte de sedimentos puede presentar anomalías, respecto al promedio interanual (407 ton/día), de hasta 350% durante la fase La Niña y de hasta -110% durante la fase El Niño. Todo lo anterior evidencia la influencia del ENOS sobre la variabilidad del transporte de sedimentos en la cuenca del río Magdalena entre los años 1980 – 2010.

1. Introducción

La producción de sedimentos de una cuenca es un proceso controlado por parámetros morfológicos como el área, la forma y el relieve; factores climáticos como la precipitación y la temperatura; variables antrópicas como el uso del suelo y elementos geológicos como las unidades litológicas y los rasgos estructurales (Milliman y Syvitsky, 1992; Pelletier, 2012).

Los estudios en cuencas hidrográficas globales que han buscado entender la relación entre la producción de sedimentos con su contexto climático y antrópico, encontraron que estos factores ejercen un control importante sobre los procesos de erosión, demostrando la sensibilidad del comportamiento de los sedimentos a estímulos externos (Walling, 1994; Vorosmarty y Meybeek, 2000). Por ejemplo, el estudio espacio-temporal de la relación entre el clima y el flujo de los sedimentos en el tramo superior de la cuenca del río Yangtze (China), permitió proyectar escenarios donde las tendencias de erosión aumentan en condiciones de abundante precipitación y altas temperaturas (Zhu et al., 2008). Esta sensibilidad frente al cambio climático ha sido también parte de la conclusión de estudios en otros ríos a nivel mundial, como el río Naran, en Paquistán (Azim et al, 2016), el río Sunflower, principal tributario del río Yazoo, en el estado de Mississippi (Parajuli et al, 2016), y los ríos Guadalupe y Sao Lorenço en Portugal (Serpa et al, 2015).

Por otro lado, se ha encontrado que los cambios en el uso del suelo tienen un impacto sobre el incremento de la producción de sedimentos, pues las tasas de erosión se incrementan a medida que la intervención antrópica es mayor (Covault et al, 2013; Warrick et al, 2013; Parajuli et al, 2016), sobre todo cuando la cuenca tiene suelos arenosos, limosos o arcillosos, dado que el grado de erosión también depende de la textura del suelo (Milliman y Syvitsky, 1992; Pelletier, 2012). Por ejemplo, el seguimiento temporal (1980-2000) de la evolución del uso del suelo en la cuenca del río Huaihe (China) puso en evidencia que en las áreas donde el uso del suelo cambió de zonas boscosas a cultivos agrícolas, la producción de sedimentos aumentó de 137.2 ton/km² en 1988 a 329.6 ton/km² en 1993 y disminuyó hasta 229.5 ton/km² en 2002, cuando estas áreas se cambiaron a arrozales. Así mismo, cuando en otras áreas el uso del suelo cambió de arrozales a cultivos agrícolas, la producción de sedimentos incrementó de 570.5 ton/km² en 1988 a 617.3 ton/km² en 1993 y disminuyó hasta 229.5 ton/km² para el 2002, cuando estas mismas áreas cambiaron a ser zonas urbanas (Cai et al, 2012). Adicionalmente, al asociar el aumento de la producción de sedimentos con los cambios en la precipitación en zonas con actividades antrópicas y en zonas de bosque no intervenidas, se ha podido concluir que la producción de sedimentos tiende a aumentar más erráticamente en las zonas con actividades antrópicas que en las zonas de bosque, evidenciando que dichas actividades potencian el aumento de las tasas de erosión (Cai et al, 2012).

Todo lo anterior indica la importancia de implementar actividades de reforestación para mitigar la degradación de los suelos de las cuencas y para disminuir la carga de sedimentos en los ríos (Serpa et al, 2015), como por ejemplo los programas de reforestación en la cuenca del río Waipoaoa (Nueva Zelanda), donde se encontró que las actividades de reforestación durante 28 años, en las áreas donde hubo actividades de pastoreo extensivo, hicieron que las tasas de erosión y la carga de sedimentos del río descendieran en 51% y 12%, respectivamente (Marden et al, 2014).

Los estudios sobre la producción de sedimentos en el río Magdalena han mostrado que la generación de sedimentos es controlada principalmente por el caudal y las descargas máximas de agua (Restrepo et al, 2006), y por las actividades antrópicas como la deforestación. La tala de bosques en la cuenca aumentó en un 44% para el periodo 1980-2000 (Restrepo y Syvitski, 2006), y para el periodo 1980-2010, menos del 15% del bosque original estaba presente (Restrepo et al., 2015). Mediante un modelo numérico BQART de los factores naturales y humanos que controlan la producción de sedimentos en el río Magdalena, se encontró que cerca del 30% de la generación de sedimentos en el Magdalena es debida a las actividades de deforestación en el periodo 1980-2010. Durante este intervalo de tiempo, las tasas de erosión se incrementaron en un 33% (Restrepo et al., 2015).

Para la cuenca del Magdalena, el 9% de la variabilidad del flujo de sedimentos es debida a los patrones de deforestación (Restrepo et al, 2015). Según esto, es claro que el uso del suelo no es el único factor que afecta el comportamiento de los sedimentos. Sin embargo, la tendencia ascendente de la carga de sedimentos en la cuenca del Magdalena para el periodo 1980-2010, no puede ser atribuida solo a factores climáticos teniendo en cuenta que en solo el 29% de las estaciones meteorológicas analizadas, se presentó un incremento sobre las tendencias interanuales de precipitación (Restrepo y Escobar, 2018).

La variabilidad temporal del caudal y de los sedimentos en el Magdalena está ya bien demostrada para la última década. Por ejemplo, las tendencias interanuales durante el periodo 2000 – 2011, respecto a los años antes del 2000, indican incrementos del caudal del 24% y en el transporte de sedimentos del 33%. Para el Canal del Dique los aumentos en caudal y transporte son del orden de 28% y 48%, respectivamente (Restrepo et al, 2018). Mediante modelos SARIMA para el Canal del Dique ha sido posible predecir un incremento en el caudal y el flujo de sedimentos del 164% y 222%, respectivamente para el año 2020, mientras que el flujo de sedimentos en la Bahía de Cartagena tendrá un incremento del 317% para este mismo año (Restrepo et al, 2018). No obstante, todas estas tendencias indican que tanto procesos antrópicos como climáticos, además de las propiedades geológicas, han estado ejerciendo control en la producción de sedimentos, pero la identificación del control climático en términos de anomalías no es aún clara en la cuenca.

1.1 El ENOS en Colombia

En términos generales, el clima de Colombia es de tipo bimodal: épocas de sequía durante los meses diciembre-febrero y junio-agosto, y épocas de humedad durante los meses abril-mayo y octubre-noviembre (Poveda, 2004). El comportamiento del clima en los andes colombianos se debe a la interacción de varios factores, incluyendo: (1) la ubicación tropical, (2) el paso anual de la zona de convergencia intertropical, la cual migra según el patrón de los vientos Alisios del norte y sur, (3) la variación altitudinal de la cordillera de los Andes como barrera orográfica, (4) los frentes de humedad de la cuenca del Amazonas, y (5) la presencia de dos océanos, al norte el Mar Caribe, y al Oeste el Pacífico, haciendo que el clima regional sea un sistema complejo y altamente variable (Poveda, 2004). Sin embargo, el ENOS (El Niño-Oscilación del Sur) es el fenómeno climático que afecta en mayor medida los patrones hidroclimáticos de Colombia sobre otras teleconexiones que también son asociadas a la región ecuatorial, como la OAN (Oscilación del Atlántico Norte) y la ODP (Oscilación Decadal del Pacífico) (Poveda y Mesa, 2000).

El fenómeno del ENOS se compone de dos fases: La Niña, fase positiva, y El Niño, fase negativa. En el país, el comportamiento de La Niña está relacionado con épocas de mayor precipitación. Por el contrario, fases de El Niño se asocian con épocas de mayor sequía (Poveda y Mesa, 1996, Poveda, 2004). Además, se ha observado que, cuando el fenómeno se presenta en las regiones de El Niño 3 y El Niño 4 (regiones extremas del fenómeno en fase negativa), hay una mayor correlación del ENOS con el comportamiento de la precipitación en los Andes colombianos, donde su respuesta es más rápida e intensa hacia el occidente, y más lenta y débil hacia el oriente andino (Poveda y Mesa, 1997).

El impacto del ENOS sobre la variabilidad de los procesos hidrológicos de algunos ríos de Colombia ha sido identificado (Amarasekera et al; 1997, Restrepo y Kjerfve, 2000a; Restrepo y Kjerfve, 2000b). Por ejemplo, la variabilidad de la descarga fluvial anual del río Amazonas es explicada en algo menos del 10% por el fenómeno (Amarasekera et al, 1997), pero para otros ríos como el río San Juan y el río Magdalena, la variabilidad de la descarga fluvial anual se explica por el ENOS en un 64% y 69%, respectivamente (Restrepo y Kjerfve, 2000a y b). En general, para los ríos que desembocan en el Mar Caribe existe una fuerte interrelación entre las tendencias de caudales en periodos largos de tiempo y las periodicidades hidrológicas anuales, interanuales (3-7 años) y cuasi decadales (8-12 años) (Restrepo et al, 2014). Específicamente, las oscilaciones cuasi decadales desde 1990 hasta el 2010 del caudal coinciden con las oscilaciones interanuales del ENSO que se registran en las franjas de los años 1998-2002 y 2009-2010, indicando que la actividad hidrológica de alta intensidad ocurrió en fase con los caudales anormalmente altos (Restrepo et al, 2014).

El fenómeno del ENOS durante las fases extremas de El Niño y La Niña se correlaciona muy bien con la variabilidad hidroclimática de Colombia. Estas,

sumadas a los efectos de otras teleconexiones y de las interacciones suelo-atmósfera, causan la disminución o el incremento (en fase de El Niño y La Niña, respectivamente) de la precipitación, los caudales, la humedad del suelo y la evapotranspiración en el país, evidenciando que El Niño produce estaciones con condiciones más secas y La Niña con condiciones más húmedas. Adicionalmente, el impacto del ENOS está fuertemente asociado al ciclo interanual de los procesos hidroclimáticos del país, siendo más intenso durante diciembre-febrero y más débil entre marzo-mayo (Poveda y Álvarez, 2011). Por otro lado, la precipitación y el caudal muestran que los efectos del fenómeno se debilitan a medida que van apareciendo de oriente a occidente del país (Poveda y Mesa, 1997; Poveda y Álvarez, 2011). Todo lo anterior indica que el ENOS es una medida valiosa para estimar la variabilidad de los procesos hidroclimáticos de la región y entender sus implicaciones en la biodiversidad y en el funcionamiento ecosistémico del país (Poveda y Álvarez, 2011).

A pesar de la importancia de estos estudios para el entendimiento de los procesos hidrológicos en función del ENOS, en particular para el Magdalena, aún no hay estudios sobre la influencia del ENOS en el transporte de sedimentos para la cuenca y que se enfoquen en preguntas relevantes como:

- ¿Cómo ha influido el ENOS en el transporte de sedimentos en la cuenca del río Magdalena?
- ¿Cuál ha sido la tendencia de la relación ENOS-sedimentos durante las últimas décadas?
- ¿Cómo es la distribución espacial del nivel de influencia del ENOS sobre el transporte de los sedimentos en la cuenca?
- ¿Cuán grande es el área donde el transporte de sedimentos está influenciado significativamente por el ENOS respecto al área total de la cuenca?
- ¿A qué se debe que haya áreas con mayor influencia del ENOS y en qué se diferencian éstas con las zonas menos afectadas por el fenómeno?

Las respuestas a los anteriores interrogantes se hacen necesarias para complementar las evidencias científicas sobre las causas, magnitud y variabilidad de la producción de sedimentos en la cuenca del Magdalena, la cuales han mostrado que: (1) el 55% de la cuenca presenta tendencias ascendentes en la generación de sedimentos en las últimas tres décadas (Restrepo y Escobar, 2018); (2) las actividades antrópicas en términos de deforestación explican cerca del 30% de la producción de sedimentos a escala regional (Restrepo et al, 2015); (3) el ENOS es la principal anomalía climática con mayor incidencia en la cuenca Magdalena (Poveda et al, 2000); y (4) que el comportamiento del clima potencia la erosión en suelos deforestados, incrementando los sedimentos que llegan a las zonas receptoras como canales, planos inundables y zonas costeras (Walling, 1994; Vorosmartri y Meybeek, 2000; Zhu et al, 2008; Cai et al, 2012; Marden et al 2014; Serpa et al, 2015; Azim et al, 2016; Parajuli et al, 2016; Restrepo et al., 2018).

Según todo lo anterior, conocer la influencia del ENOS sobre el comportamiento del transporte de sedimentos a escala de cuenca puede ayudar al entendimiento de cómo el fenómeno, que influye en mayor medida el comportamiento del clima colombiano (Poveda y Mesa, 2000), puede afectar la erosión del suelo. Esto es fundamental para estructurar políticas y planes de manejo ambiental que den cuenta de una delimitación asertiva de las zonas en las que se deben implementar medidas de mitigación, restauración o control de los recursos flora y agua en la cuenca del río Magdalena, teniendo en cuenta los nuevos estudios que estiman incrementos significativos de caudales y flujo de sedimentos para el año 2020 (Restrepo et al, 2018).

Así entonces, e intuitivamente, puede decirse que una de las actividades que deben evaluarse en los planes futuros de manejo ambiental de la cuenca del río Magdalena es la delimitación de zonas con mayor generación de sedimentos y el grado de influencia regional del ENOS en estos procesos de erosión. Este análisis espacial podrá indicar en dónde los planes de protección de suelos y reforestación, pueden ser implementados en la mitigación de altas tasas de producción de sedimentos. Como se menciona anteriormente, estos proyectos forestales han probado ser una de las medidas más efectivas para subsanar los efectos que el clima tiene sobre la erosión de suelos que han sido deforestados (Cai et al, 2012; Marden et al, 2014; Serpa et al, 2015), y se han basado en la evidencia que muestra el comportamiento de los sedimentos y la erosión, la cual es sensible a estímulos externos como el clima y las actividades antrópicas (Walling, 1994; Vorosmartri y Meybeek, 2000; Zhu et al., 2008; Cai et al, 2012; Covault et al, 2013; Warrick et al, 2013; Marden et al, 2014; Restrepo et al., 2015; Serpa et al, 2015; Azim et al, 2016; Parajuli et al, 2016; Restrepo et al, 2016).

1.2 Área de estudio: Cuenca del río Magdalena

La cuenca tiene un área de 257438 km² ocupando el 22.5% del área continental de Colombia donde vive el aproximadamente el 80% de su población (Restrepo, 2005). También, la cuenca está conformada por tres macro-secciones: (1) alto Magdalena, (2) medio Magdalena, y (3) bajo Magdalena. La primera se extiende desde el páramo de las Papas a 3680 msnm hasta los rápidos de Honda a 230 msnm, con una distancia horizontal de 565 km. La segunda comienza en Honda hasta El Banco, donde se sitúa la desembocadura del río Cesar, a una altura de 33 msnm. Finalmente, la última sección, que comienza en El Banco y finaliza en la desembocadura del río Magdalena en la Bahía de Cartagena y en Bocas de Ceniza, en Barranquilla.

1.2.1 Geología y geomorfología general de la cuenca

La cordillera de los Andes, conformada por la cordillera Oriental, Central y Occidental, es la unidad geomorfológica más representativa de la cuenca del río Magdalena (Figura 1). La evolución de las geoformas se asocia a mecanismos de exposición y a las unidades litológicas resultantes de eventos metamórficos como

compresiones y extensiones, eventos ígneos como plutonismo y vulcanismo, y eventos sedimentarios como regresiones y trasgresiones oceánicas (Toussaint, 1996; Potter, 1997; Vinasco, 2006; Barrero et al, 2007; Bustamante et al, 2010; Cochane et al, 2014; Spikings, 2015; Bustamante et al, 2016).

El vulcanismo y plutonismo fue característico del periodo Triásico y Jurásico, la presencia de mares continentales fueron protagonistas del Cretácico, y la actividad magmática fue nuevamente principal en el Cenozoico (Barrero et al, 2007; Restrepo-Pace y Cediél, 2010; Toussaint, 1996; Spikings, 2015). En el Cuaternario, la intensa erosión de la superficie dio origen a depósitos de las rocas más antiguas, reconfigurando la morfología de la cuenca nuevamente, como se ha comprobado mediante la correlación de microorganismos y depósitos sedimentarios recientes (Van Der Hammen y Hooghiemstra, 1997). Según Potter (1997), los comienzos del río Magdalena pueden ser evidenciados en depósitos del Mioceno en el Valle del Magdalena entre la cordillera Oriental y Occidental.

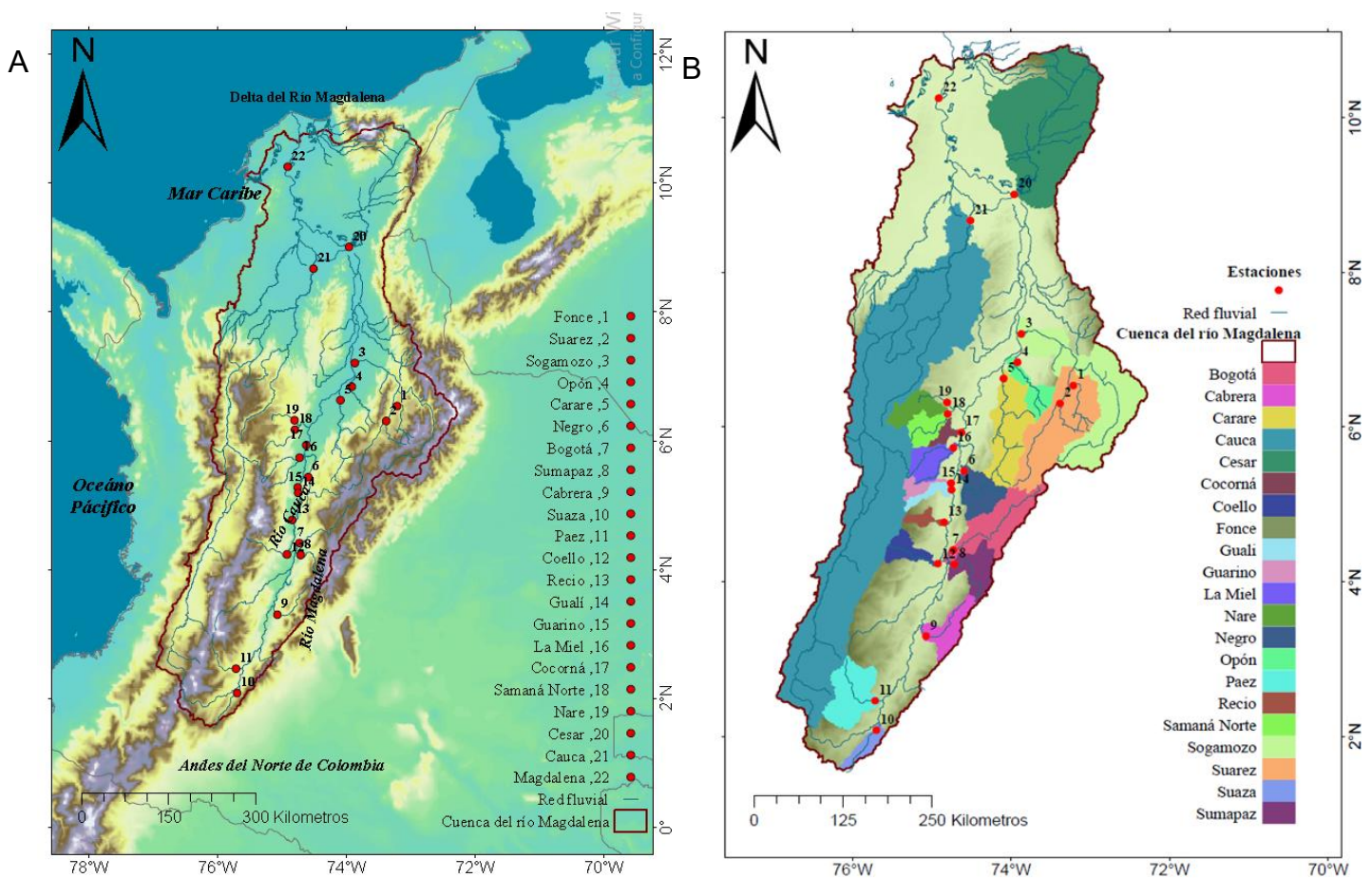


Figura 1. (A) Localización de la cuenca del río Magdalena (Colombia). **(B)** Mapa (1:2500000) de la ubicación de 23 estaciones de aforo del IDEAM para el transporte de sedimentos (Qs).

El levantamiento de las cordilleras, derivado de los procesos tectónicos, generó rupturas, fallas y pliegues en la corteza, cuyas características permiten diferenciar los terrenos o bloques geológicos. Si bien existe aún debate sobre la evolución tectónica de la zona noroccidental del país (Toussaint, 1996; Vinasco et al, 2006; Bustamante et al, 2010; Cochrane et al, 2014; Martens et al, 2014; Spikings et al, 2015; Bustamante et al 2016; entre otros), la actividad geodinámica dejó rastro de los principales límites y estructuras en la cuenca (Figura 2), tales como: (1) la forma alargada de la sección del Alto Magdalena, que a su vez está limitada por las fallas de Chuzma y Calarcá al oeste, y las fallas de Garzón - Suaza al este; (2) los límites de la sección del medio Magdalena, al norte la falla Bucaramanga - cuyo movimiento modifica el rumbo del río a la altura del municipio de El Banco -, al este el sistema de fallas Salinas y al oeste un sistema de fallas del cual hacen parte las fallas de Honda y de Cambao; y (3) los límites de la sección del bajo Magdalena - que además es una zona de subsidencia - al oeste la falla Romeral y al este el sistema de fallas de Santa Marta y Bucaramanga. Finalmente, la subcuenca del río Cauca, la cual es limitada por las fallas del sistema Romeral hacia el oriente y las fallas del sistema Cauca al occidente (Mojica y Franco, 1990; Barrero et al, 2007).

La descripción topográfica de la cuenca es difícil de generalizar, sin embargo, es posible distinguir que: el 55% de la cuenca corresponde a montaña alta (>3000 msnm), siendo la máxima altura de 5570 msnm en la Sierra Nevada de Santa Marta, media (3000 a 2000 msnm), y baja (2000 a 1000 msnm) (Restrepo, 2005). Por otro lado, las depresiones conforman el 15% del área total, siendo la altura mínima de la cuenca de 0 msnm en la desembocadura del río en Barranquilla y el canal del Dique. Las demás unidades geomorfológicas son terrazas fluviales, diques, bajos y llanuras de inundación con alturas menores a 500 msnm y pendientes suaves (<10°) (Restrepo, 2005). Si bien los perfiles son altamente variables para cada uno de los ríos tributarios del río Magdalena, las pendientes suelen ser altas en el alto Magdalena (>35°), medias a bajas en el Magdalena medio y bajas a llanas en el Magdalena bajo (Mojica y Franco, 1990) (Restrepo, 2005).

Según la variación altitudinal de la cuenca es posible identificar diversos ambientes climáticos que varían desde zonas costeras de alta humedad, como es el caso de Cartagena, hasta zonas de glaciación, como es el caso de la Sierra Nevada del Cocuy y la Sierra Nevada de Santa Marta, pasando por zonas de montaña media (Boyacá y Cundinamarca), montaña baja (Ibagué), valles planos (depresión Momposina) y llanuras aluviales cercanas a las zonas litorales de la cuenca.

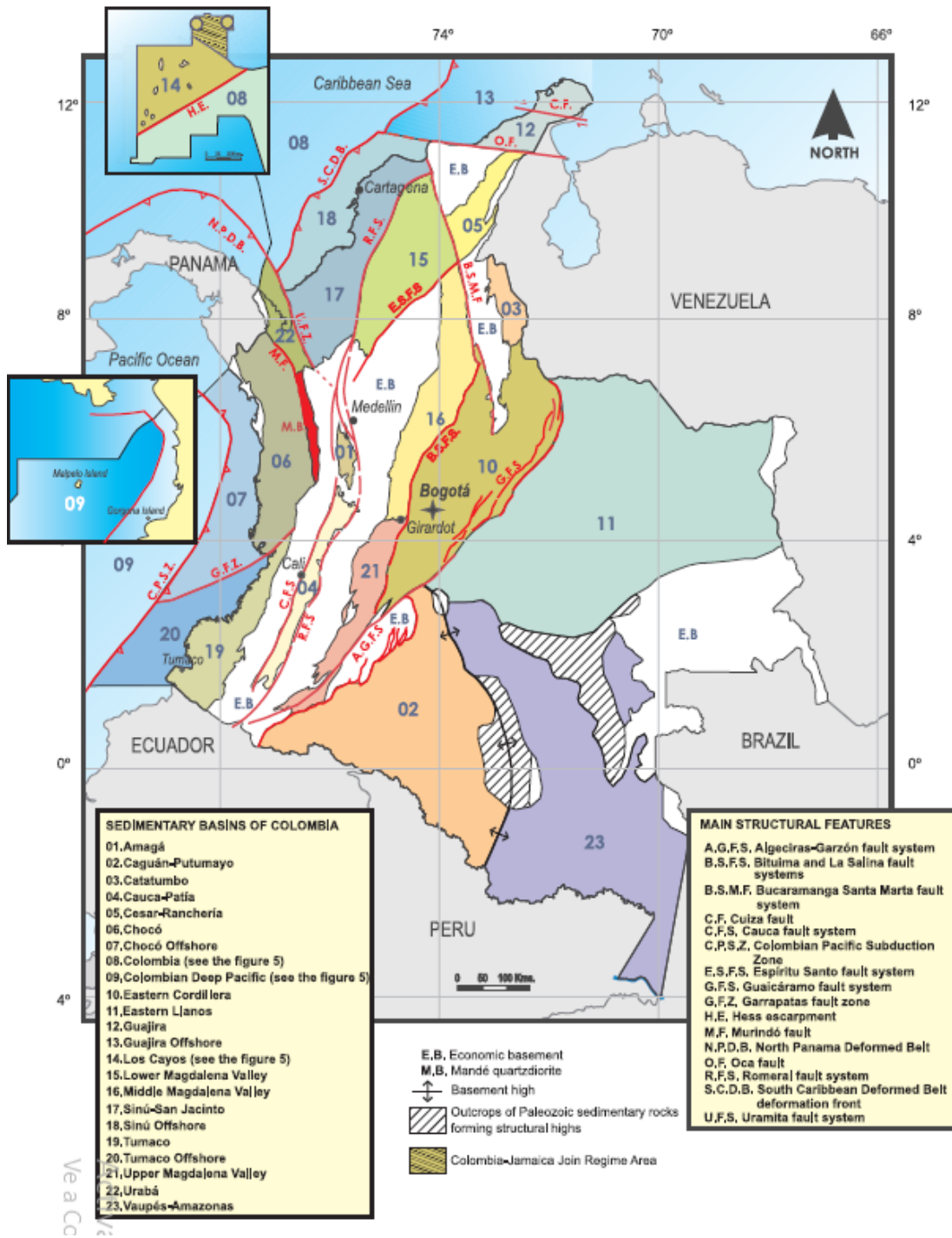


Figura 2. Mapa de territorios geológicos, cuencas sedimentarias y límites estructurales principales de Colombia (Tomado de Barrero et al., 2007).

1.2.2 Patrones hidroclimáticos de la cuenca

El clima de Colombia es altamente complejo dadas las características geográficas que intervienen en su comportamiento, esto incluye la presencia de tres cordilleras, la localización del país en la zona de convergencia intertropical y sus límites externos que alteran la hidroclimatología regional como las cuencas en la región Caribe, en el Orinoco, la cuenca del Amazonas, así como también el borde occidental del país con influencia del océano Pacífico (Poveda y Mesa, 2000). La temperatura es variable ya que en zonas de montaña alta y en sierras nevadas como la Sierra Nevada de Santa Marta y la Sierra Nevada del Cocuy, la temperatura puede descender a menos de 0°C; pero también hay zonas como el fondo del valle del Magdalena, donde se registran temperaturas medias anuales de aproximadamente 28°C, con variaciones diurnas de casi 10°, o zonas a nivel del mar donde las temperaturas promedio anuales alcanzan los 30°C (Snow, 1976; Mesa et al, 1997).

Los datos de precipitación que se han registrado en la cuenca del Magdalena tienen un promedio anual de 2050 mm, donde la mayor precipitación ocurre en los meses de marzo a mayo y octubre a noviembre (Poveda, 2004). Particularmente para las secciones del alto, medio y bajo Magdalena, las precipitaciones son de alrededor de 1535 mm a⁻¹, 2185 mm a⁻¹ y 1632 mm a⁻¹, y la escorrentía es de 901mm a⁻¹, 1259 mm a⁻¹ y 702 mm a⁻¹, respectivamente, de lo que es posible observar una proporcionalidad entre los valores de precipitación y escorrentía para cada sección de la cuenca (Restrepo, 2005).

La variabilidad a escala anual o semi-anual de la precipitación está dominada por la migración latitudinal de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) y consiste en dos temporadas lluviosas (abril-mayo y octubre-noviembre), y dos temporadas secas (diciembre-febrero y junio-agosto) (Cuartas y Poveda, 2002; Poveda, 2004). Particularmente para los Andes de Colombia, los periodos lluviosos son abril-mayo y octubre-noviembre, y los periodos secos diciembre-enero y julio-agosto (Poveda, 2004). Esta periodicidad se da debido a la posición de la ZCIT que se asocia con la intensidad de los vientos Alisios de norte y sur. Durante octubre-noviembre, la ZCIT se comienza a desplazar hacia el sur hasta el mes de enero (durante el verano del hemisferio sur), y durante abril-mayo, la ZCIT se desplaza hacia el norte hasta el mes de julio (durante el verano del hemisferio norte) (Poveda, 2004).

El ENOS, fenómeno climático con mayor influencia sobre los patrones hidroclimáticos de Colombia (Poveda y Mesa, 2000), tiene una componente cuasi-bianual con un tiempo de recurrencia entre 2 y 2.5 años o entre 4 y 5 años (Poveda, 2004). El Niño es la fase cálida dado que se presenta un aumento de las temperaturas superficiales del mar (Centro y oriente del Pacífico tropical), ocasionando grandes anomalías en los patrones de circulación de vientos, de presiones atmosféricas y, por ende, de los patrones de precipitación (Poveda, 2004). En términos generales, algunos efectos de El Niño y La Niña en Colombia

son, respectivamente: (1) disminución y aumento en la precipitación, (2) aumento y disminución en la temperatura del aire, (3) disminución y aumento en los caudales medios mensuales de los ríos, y (4) disminución y aumento de la humedad del suelo (Poveda, 2004).

La cuenca del río Magdalena posee aproximadamente el 10% de la oferta hídrica del país, donde de los 151 ríos tributarios que drenan al río, 42 son de segundo orden (IDEAM, 2001). Los tributarios del alto, medio y bajo Magdalena aportan, respectivamente, el 18.5%, 40.7% y el 40.8% al caudal total del río Magdalena estimado en la estación Calamar (punto de referencia para el bajo Magdalena) (Restrepo, 2005). Adicionalmente, se ha podido estimar que la subcuenca del río Cauca, con un área de drenaje de 59615 km² (el 23% del área de la cuenca del río Magdalena), aporta el 32.7% de caudal al total del río Magdalena, convirtiéndose en su principal tributario (Restrepo, 2005).

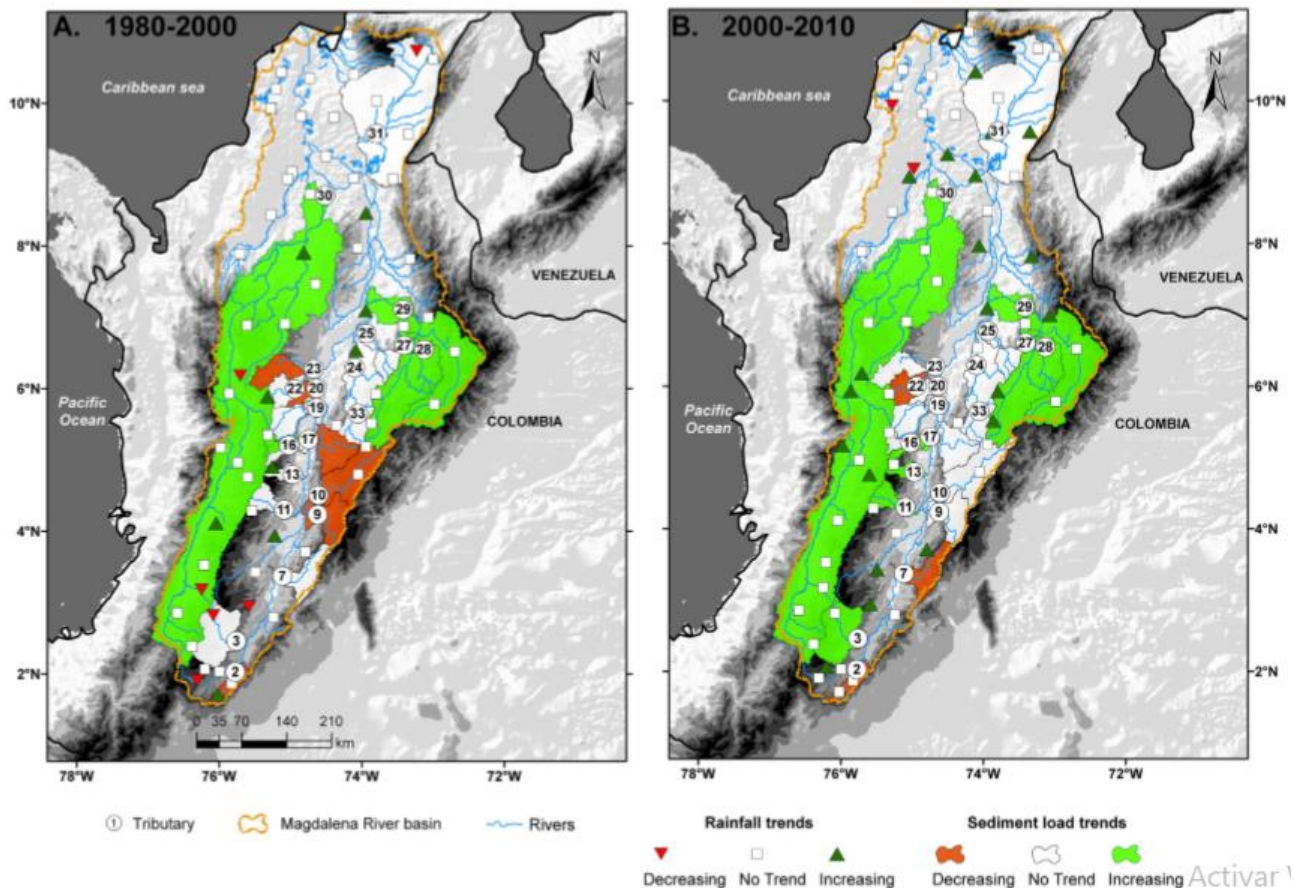


Figura 3. Distribución espacial de las tendencias del comportamiento de la precipitación y la carga de sedimentos durante los periodos **A.** 1980 – 2000, y **B.** 2000 – 2010 (Tomado de Restrepo y Escobar, 2016).

En la cuenca, las tendencias en el comportamiento de la precipitación y la carga de sedimentos han sido ascendentes en el periodo 1980-2010 (Figura 3). Específicamente en Calamar, el caudal medio interanual en el periodo 1940-1999 fue de $7156 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, y durante el periodo 2000-2011 ascendió a $7783 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, mientras que para el Canal del Dique, en el periodo 1972-1999 fue de $390 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, y entre los años 2000 y 2010 incrementó a $508 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (Restrepo et al, 2018). Así mismo, para la carga de sedimentos, en la estación Calamar entre los años 1972 y 1999, la media interanual fue de 390 ton/día, y entre los años 2000 y 2011 fue de 413898 ton/día, mientras que para la estación Dique, la media interanual para el periodo 1979-1999 fue de 16153 ton/día, y para el periodo 2000-2010 fue de 21184 ton/día (Restrepo et al, 2018).

Las tendencias ascendentes de precipitación, caudal y aporte de sedimentos en el bajo Magdalena a la altura de Calamar después del año 2000, resaltan la importancia de evaluar cuantitativamente, para toda la cuenca del río Magdalena, la influencia de los factores más importantes que controlan la variabilidad del transporte y generación de sedimentos, como las anomalías climáticas debidas al ENOS.

2. Objetivo

Estimar la influencia del ENOS en la variabilidad del transporte de sedimentos en la cuenca del río Magdalena durante el periodo de tiempo comprendido entre 1980 - 2010.

2.1 Objetivos específicos

Objetivo 1: Estimar para las principales cuencas tributarias del Magdalena cuánta variabilidad del transporte de sedimentos es debida al evento ENOS.

Objetivo 2: Analizar la variabilidad interanual entre las series de transporte de sedimentos y el ENOS para el periodo 1980 - 2010.

Objetivo 3: Identificar espacialmente la influencia del ENOS en el transporte de sedimentos en la cuenca del río Magdalena mediante la integración de las series de tiempo y los modelos de regresión lineal.

3. Metodología

3.1. Datos

La información que se usó en este trabajo incluye: (1) datos mensuales de transporte de sedimentos (Q_s en ton/día) para 23 estaciones de aforo aguas abajo (Figura 1) de los ríos tributarios más importantes de la cuenca Magdalena para el periodo 1980 - 2010 (IDEAM, 2014) y (2) datos mensuales del índice SOI (Southern Oscillation Index) del fenómeno del ENOS para el periodo 1980 - 2010, datos públicos obtenidos de la NOAA

(<https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/enso/indicators/soi/>). Este índice, que indica la intensidad de los eventos ENOS y toma valores negativos cuando se presenta un evento de El Niño y positivos cuando se presenta un evento de La Niña (Figura 4), se calcula según la metodología de la NOAA, como se muestra en las siguientes ecuaciones (1, 1a, 1b, 1c).

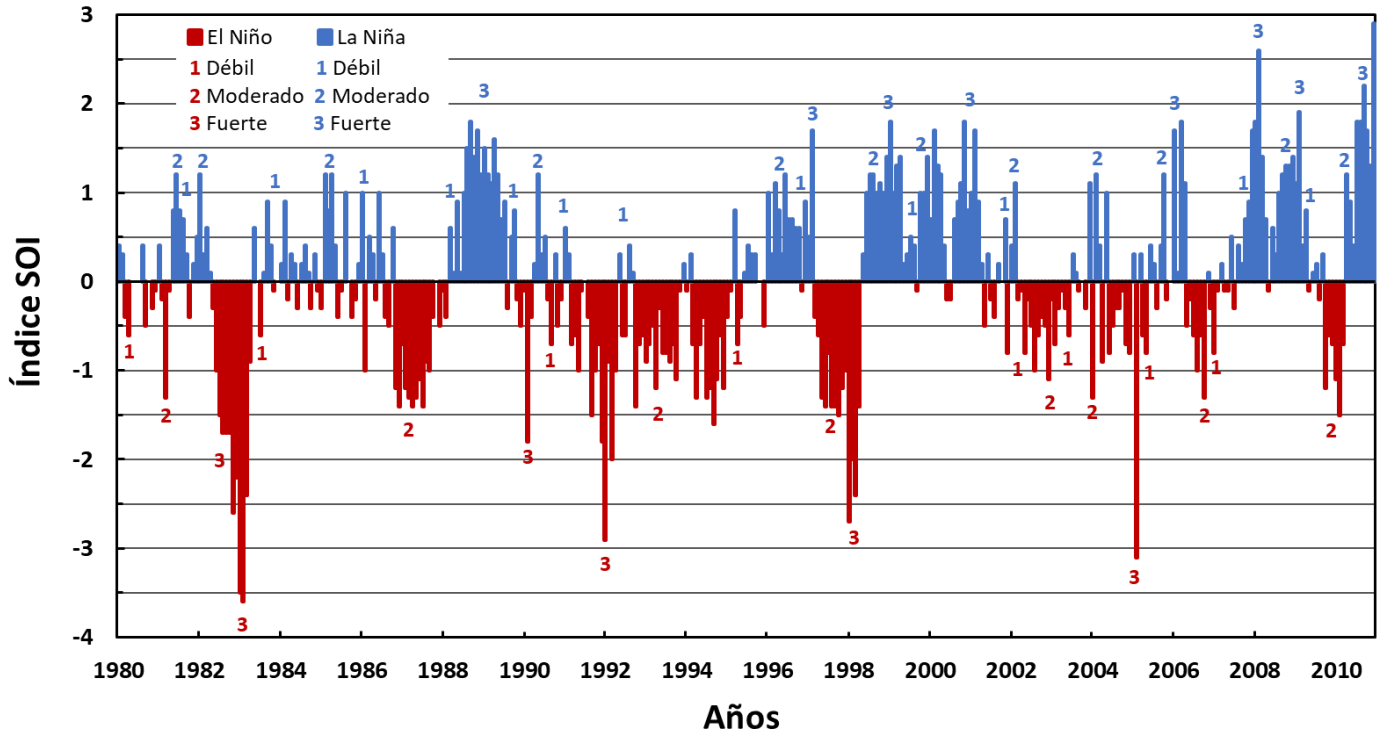


Figura 4. Serie de tiempo del fenómeno del ENOS entre los años 1980 y 2010. El símbolo 1 indica eventos débiles (SOI entre 0.5 – 1.0), 2 indica eventos moderados (SOI entre 1.0 – 1.5), y 3 indica eventos fuertes (SOI entre 1.5 – 4.0), para las fases de El Niño (rojo) y La Niña (azul). (Datos de <https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/enso/indicators/soi/>).

Ecuación (1)

$$SOI = \frac{(ST - SD)}{MSD},$$

donde:

SOI: Southern Oscillation Index (Índice de Oscilación del Sur).

ST: Tahiti estandarizado (ecuación 1a).

SD: Darwin estandarizado (ecuación 1b).

MSD: Desviación estándar mensual (ecuación 1c).

Ecuación (1a)

$$ST = \frac{(AT\ SLP - MT\ SLP)}{SDT},$$

donde:

ST: Tahiti estandarizado.

AT SLP: Presión a nivel del mar actual en Tahiti.

MT SLP: Presión a nivel del mar media en Tahiti.

SDT: Desviación estándar de la presión en Tahiti.

Ecuación (1b)

$$SD = \frac{(AD\ SLP - MD\ SLP)}{SDD},$$

donde:

SD: Darwin estandarizado.

AD SLP: Presión a nivel del mar actual en Darwin.

MD SLP: Presión a nivel del mar media en Darwin.

SDD: Desviación estándar de la presión en Darwin.

Ecuación (1c)

$$MSD = \sqrt{\frac{\sum(ST - SD)^2}{N}},$$

donde:

MSD: Desviación estándar mensual de la presión

ST: Tahiti estandarizado (ecuación i*).

SD: Darwin estandarizado (ecuación i**).

N: Número de meses sumados.

3.2. Regresiones lineales entre transporte de sedimentos y el índice SOI

Para estimar el grado de correlación entre el transporte de sedimentos y el fenómeno ENOS se generaron modelos de regresión lineal (2) (Peña, 2010). En la programación del modelo se estableció la variabilidad del transporte de sedimentos en términos del cambio del índice SOI (variable independiente) (Restrepo y Kjerfve, 2000a). Los valores de entrada utilizados correspondieron al resultado de: (1) aplicar un filtro de media móvil de 12 periodos a los datos mensuales del transporte de sedimentos y del índice SOI, para llevarlos a una frecuencia interanual y así tener una mejor observación según la periodicidad del fenómeno ENOS (Restrepo y Kjerfve, 2000a); y (2) realizar la normalización de los datos interanuales del transporte de sedimentos, como se muestra en la ecuación (3), para obtener su índice de variación (Restrepo y Kjerfve, 2000a). Este proceso se realizó para todas las estaciones de aforo analizadas para la cuenca del río Magdalena (Figura 1).

$$\text{Ecuación (2)} \quad Q_s = m(SOI) \pm b,$$

donde:

Q_s : Transporte de sedimentos estandarizado (3).

SOI: Índice SOI.

m : Pendiente del modelo o velocidad de cambio de la variable dependiente.

b : Intercepto del modelo o valor de “y” cuando no hay intervención de la variable “x”.

$$\text{Ecuación (3)} \quad Q_s = \frac{y - \mu}{\sigma},$$

donde:

Q_s : Transporte de sedimentos estandarizado.

y : Q_s (ton/día).

μ : Media de Q_s (ton/día).

σ : Desviación estándar de Q_s .

Finalmente, y para cada estación, cuyo modelo de regresión lineal alcanzó un grado de significancia estadística mayor o igual al 95% o un p-value ≤ 0.05 (Peña, 2010; Restrepo y Kjerfve, 2000a), se estimó: (1) la influencia del fenómeno ENOS en la variabilidad del transporte de sedimentos a partir coeficiente de determinación r^2 (Ecuación 4), y (2) desde la pendiente de la recta del modelo, la magnitud del cambio en el transporte de sedimentos a los diferentes estímulos del ENOS (Peña, 2010; Restrepo y Kjerfve, 2000a).

Ecuación (4)

$$r^2 = \frac{\sigma_{xy}^2}{\sigma_x^2 \sigma_y^2}$$

donde:

r^2 : Coeficiente de determinación.

σ_{xy}^2 : Covarianza (SOI, Qs).

σ_y^2 : Desviación estándar de Qs.

σ_x^2 : Desviación estándar de SOI.

3.3. Series de tiempo (1980 – 2010)

Con los datos temporales de cada estación se realizaron gráficas de series de tiempo, con el fin de observar el comportamiento del transporte de sedimentos normalizado de cada una de las estaciones de aforo (Figura 1), para el periodo 1980 - 2010. A estas gráficas se les superpuso la media móvil interanual (12 meses) con el fin de observar las tendencias y filtrar la variabilidad mensual. Las series de transporte fueron comparadas con la serie de tiempo del SOI (con la superposición de la media móvil interanual), teniendo en cuenta que se espera observar la influencia de un fenómeno del comportamiento interanual y no mensual (Peña, 2010; Restrepo y Kjerfve, 2000; Restrepo y Heber, 2016).

Se realizaron análisis exploratorios en las series de tiempo para identificar coincidencias de eventos ENOS con pulsos anómalos en el transporte de sedimentos entre el periodo 1980 - 2010.

3.4. Análisis de la relación entre el transporte de sedimentos y el ENOS haciendo uso de herramientas de georreferenciación.

Los resultados de la correlación entre Qs y el ENOS (Índice SOI), la variabilidad temporal de Qs y el comportamiento de la variabilidad temporal entre Qs y el SOI, fueron geo-referenciados para cada tributario mediante el programa ARCGIS 2016. Esta geo-referenciación permite evidenciar la variación espacial de la influencia del ENOS sobre diferentes territorios de la cuenca, y discutir en términos generales, cómo es el comportamiento de los sedimentos bajo la influencia del ENOS, respecto a otros procesos como la precipitación y el caudal, los cuales están también influenciados por el ENOS y se discuten en otros estudios (p.ej., Poveda y Álvarez, 2011; Restrepo y Kjerfve, 2000; Restrepo y Escobar, 2018). Adicionalmente, se puede visualizar en cuáles regiones del Magdalena las tendencias y magnitudes en el transporte de sedimentos tienen mayor similitud al comportamiento del fenómeno ENOS. Finalmente, la visualización espacial de los resultados permite observar cuáles eventos Niño y Niña afectaron en mayor magnitud las tasas interanuales de transporte de sedimentos de todas las subcuencas analizadas.

4. Resultados

4.1. Transporte de sedimentos (1980 – 2010)

En las figuras 5.1, 5.2 y 5.3 se muestran las series de tiempo de la variabilidad del transporte de sedimentos respecto al promedio mensual interanual de las 23 estaciones de aforo en la cuenca del río Magdalena (Figura 1).

En todas las series de tiempo se evidencian eventos donde el transporte de sedimentos supera en 1.5σ el promedio interanual (Tabla 1, Figura 5.1, 5.2 y 5.3). Los valores máximos de transporte de sedimentos se dieron durante los periodos: 1) sin embargo,

También, se puede observar que los valores mínimos de transporte de sedimentos no superan 1.5σ por debajo del promedio interanual para algunos tributarios, estos son: Suaza, Bogotá, Negro, Opón, Cabrera, Sumapaz, Coello, Recio, Gualí, Cocorná, Nare, Suarez y Guarinó. En contraste, los eventos en los que el mínimo transporte de sedimentos con -1.5σ respecto al promedio interanual, se presentan en las series de tiempo de los ríos: 1) Carare, Fonce, Sogamoso y Minero entre 1990 – 1993, 2) La Miel en 1998, 3) Paez y Samaná en el 2010, La Miel en 1998, Cauca, y 4) Cesár en 2005.

En general, para toda la cuenca (Figura 5.3) entre 1980 – 2010, el río Magdalena tiene un transporte de sedimentos que fluctuó entre 152558 y 838592 toneladas diarias y tuvo un promedio interanual de 406612 ton/día. El valor máximo y el valor mínimo superan una desviación estándar de ± 1.5 (± 195890 ton/día) en los años de 1989 y 1998, respectivamente (Tabla 1).

Adicionalmente, la tabla 1 muestra el transporte de sedimentos promedio y el área de cada subcuenca. Se observa que, en general, las cuencas de mayor área tienen mayor transporte de sedimentos. Por ejemplo, los 3 tributarios con mayor transporte de sedimentos suman un promedio de 198804 ton/día, y representan el 33% del área total de la cuenca del río Magdalena (Tabla 1), éstos son el río Cauca, Sogamoso y Carare.

Particularmente, los ríos Cauca (59615 km², 23% del área total) y Sogamoso (21513 km², 8% del área total) son las cuencas de mayor tamaño y su transporte de sedimentos promedio es de 138793 y 30399 ton/día, respectivamente (Tabla 1). Para el río Carare no se evidencia dicha relación entre área y transporte de sedimentos, pues éste es un río que transporta 29612 ton/día, casi la misma cantidad que transporta el río Sogamoso, y su cuenca es pequeña (4943 km², 2% del área total) respecto a otras subcuencas como Cesár (16657 km²) o Suarez (9312 km²), que teniendo más área, transportan cantidades menores de sedimentos de 365 y 4152 ton/día, respectivamente (Tabla 1).

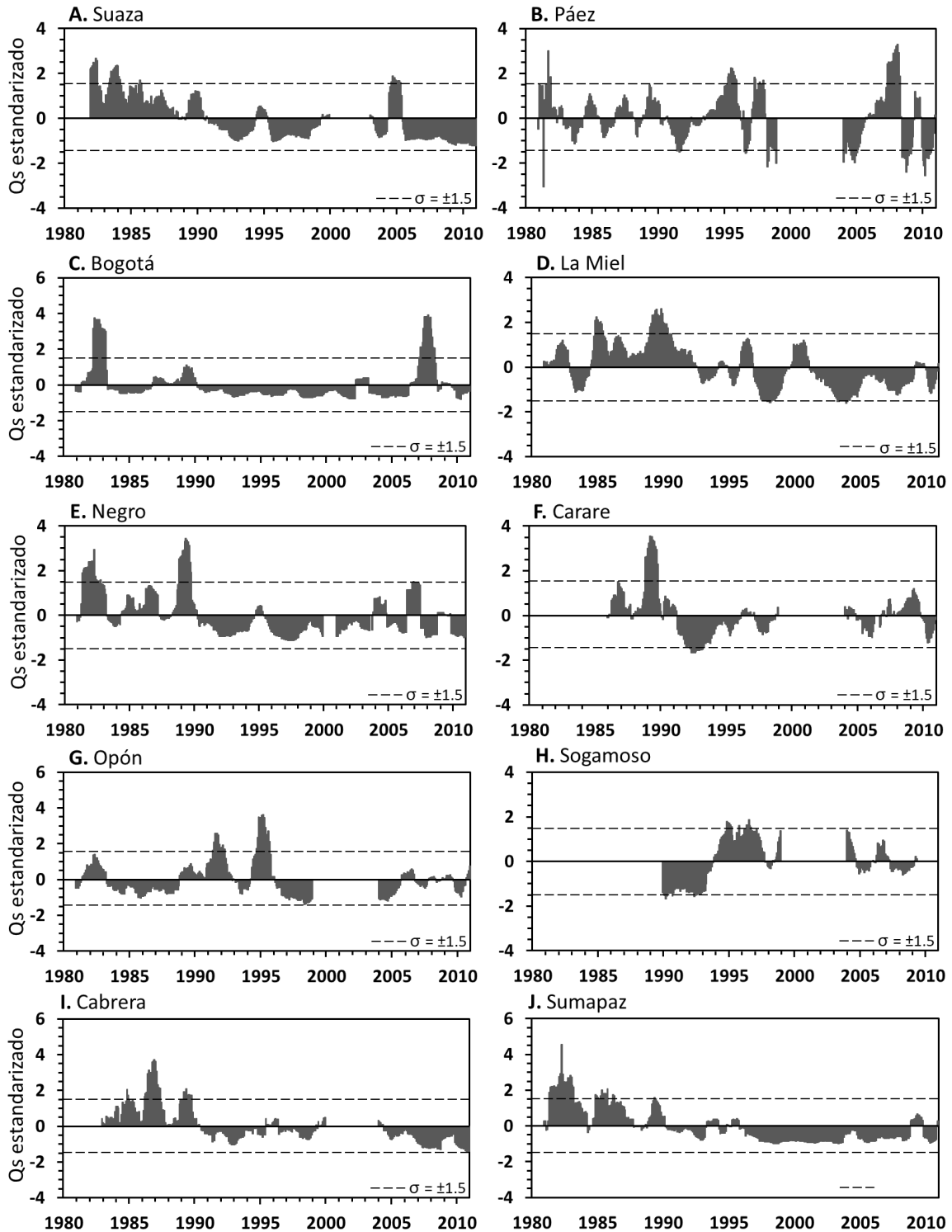


Figura 5.1. Desviación del transporte de sedimentos (Qs) respecto al promedio interanual (PI) según los registros de 23 estaciones de aforo (IDEAM, 2014) para el periodo 1980 – 2010 y valor del transporte de sedimentos para $\sigma = \pm 1.5$ (línea punteada).

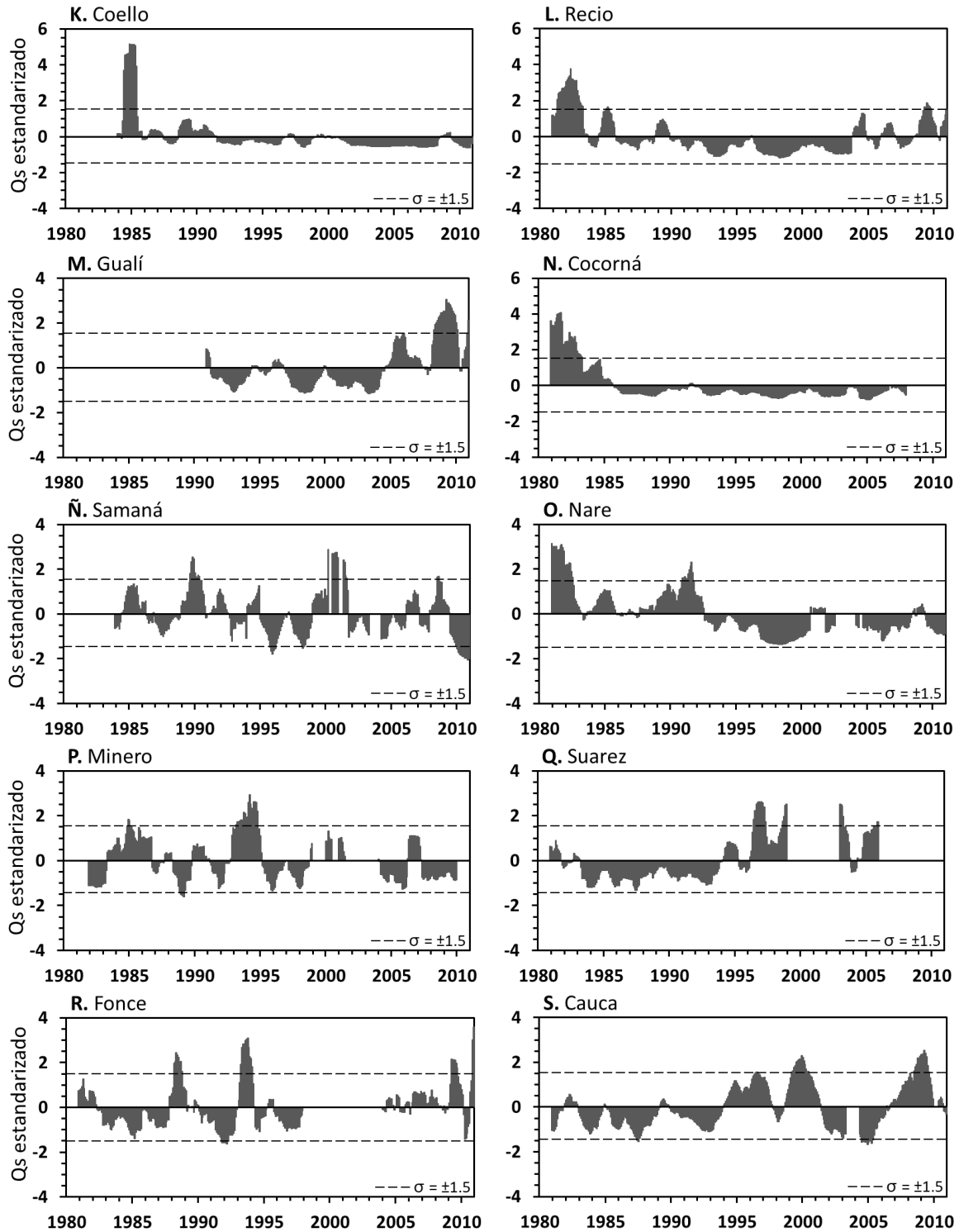


Figura 5.2. Desviación del transporte de sedimentos (Q_s) respecto al promedio interanual (PI) según los registros de 23 estaciones de aforo (IDEAM, 2014) para el periodo 1980 – 2010 y valor del transporte de sedimentos para $\sigma = \pm 1.5$ (línea punteada).

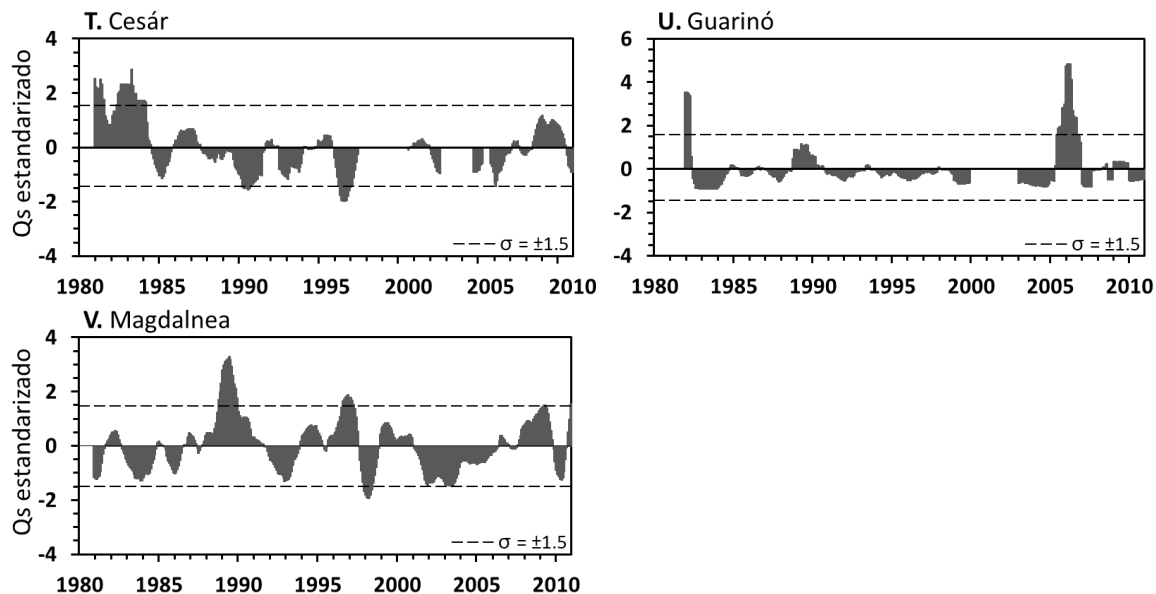


Figura 5.3. Desviación del transporte de sedimentos (Qs) respecto al promedio interanual (PI) según los registros de 23 estaciones de aforo (IDEAM, 2014) para el periodo 1980 – 2010 y valor del transporte de sedimentos para $\sigma = \pm 1.5$ (línea punteada).

Tabla 1. Tributario, área de la cuenca tributaria, y valores de transporte de sedimentos (Qs) interanual de promedio, máximo, mínimo y de $\pm 1.5 \sigma$.

Tributario	Área (km ²)	Qs promedio (ton/día)	Qs Máximo (ton/día)	Qs Mínimo (ton/día)	Qs $\sigma = \pm 1.5$ (ton/día)
Bogotá	5.544	3.624	19.852	229	6.212
Cabrera	2.446	4.293	13.812	617	3.829
Carare	4.943	29.612	75.545	7.946	19.409
Cauca	59.615	138.793	228.149	79.848	53.115
Cesár	16.657	365	776	82	214
Cocorná	799	1.038	5.332	211	1.586
Coello	1.580	3.175	28.530	202	7.370
Fonce	1.849	1.708	4.166	591	1.028
Guali	480	667	2.002	157	653
Guarinó	976	1.170	7.136	25	1.842
La Miel	2.121	5.786	12.545	1.625	3.877
Magdalena	257.438	406.612	838.592	152.558	195.890
Minero		15.617	41.661	1.467	13.257
Nare	5.711	5.604	16.906	708	5.386
Negro	4.604	15.943	61.191	1.112	19.694
Opón	1.698	8.879	24.881	2.710	6.612
Paez	4.078	8.508	20.938	3.036	6.362
Recio	610	428	1.499	83	428
Samaná	1.490	2.530	5.046	727	1.312
Sogamoso	21.513	30.399	53.034	9.915	18.146
Suarez	9.312	4.152	11.012	706	3.911
Suaza	989	1.290	3.885	97	1.455
Sumapaz	2.435	1.031	5.600	45	1.503

4.2. Regresiones lineales entre transporte de sedimentos (Qs) y el ENOS

Los resultados de los modelos de correlación entre el Qs y el ENOS se muestran en las figuras 6.1 y 6.2.

En los 23 modelos de regresión asociados a los puntos de aforo en la cuenca del río Magdalena (Figura 1), se encontró que sólo 13 estaciones tienen un valor-p menor que 0.05 (Tabla 2), indicando que para estas subcuencas los modelos de regresión son robustos y tienen un grado de significancia estadística mayor al 95%. Los 13 puntos de aforo mencionados corresponden a las subcuencas Carare, Cauca, Coello, Fonce, Gualí, Guarinó, La Miel, Magdalena, Minero, Negro, Páez, Recio y Samaná (Tabla 2). Las 10 estaciones restantes, Bogotá, Cabrera, César, Cocorná, Nare, Opón, Sogamoso, Suarez, Suaza y Sumapaz, no se tuvieron en cuenta en los análisis posteriores, ya que los modelos de regresión no tuvieron significancia estadística superior al 95%.

Se calculó la influencia del ENOS sobre el transporte de sedimentos de acuerdo con el coeficiente de determinación. Los resultados mostraron que en 7 de las 13 estaciones, el ENOS podía explicar menos del 10% de la variabilidad de los sedimentos (Tabla 2). Sin embargo, aunque los valores mínimo y máximo del coeficiente de determinación indiquen que el ENOS tiene una influencia del 3.5% y 47% sobre el transporte de sedimentos en las subcuencas Minero y Carare, respectivamente, es importante resaltar que en el punto de aforo en Calamar (Magdalena como se indica en la tabla 2), el cual es el que representa la sumatoria de todos los procesos de erosión y depositación de sedimentos en la cuenca, el ENOS tiene una influencia del 37% sobre la variabilidad del transporte de sedimentos.

De las estadísticas anteriores, se observa que el ENOS tiene una influencia del 33% en la subcuenca del río Cauca, la cual representa el 23% del área total de la cuenca del río Magdalena, y es en la que se transportan la mayor cantidad de sedimentos entre los años 1980 – 2010 (Tabla 1). También se observa que en la subcuenca del río Carare, el ENOS tiene una influencia del 47% sobre la variabilidad del transporte de sedimentos, lo cual es importante resaltar debido a que esta subcuenca, representando aproximadamente sólo el 2% del área total de la cuenca, es una de las que tiene mayor transporte de sedimentos entre las subcuencas tributarias presentadas en este estudio. Por último, como se mencionó anteriormente, el tributario Sogamoso es uno de los ríos que mayor transporte de sedimentos tiene en la cuenca, sin embargo, el modelo de regresión lineal realizado para este río no es robusto, pues su significancia estadística es menor al 95%, por ello, no se analizó el resultado de la influencia del ENOS sobre la variabilidad del transporte de sedimentos para este tributario (Tabla 2).

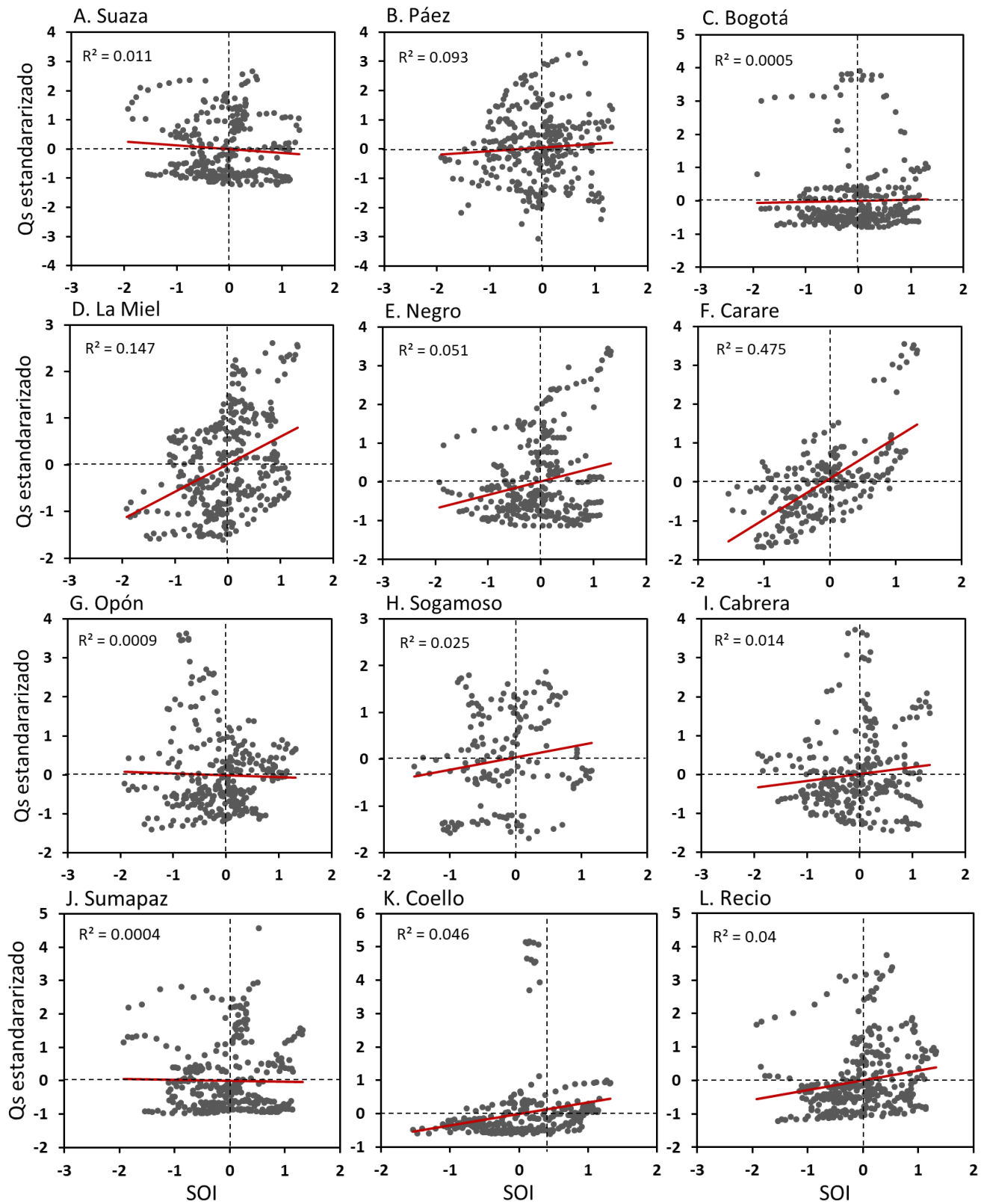


Figura 6.1. Regresiones lineales del transporte de sedimentos estandarizado versus el índice SOI para las 23 estaciones de aforo (Figura 1) en la cuenca del río Magdalena.

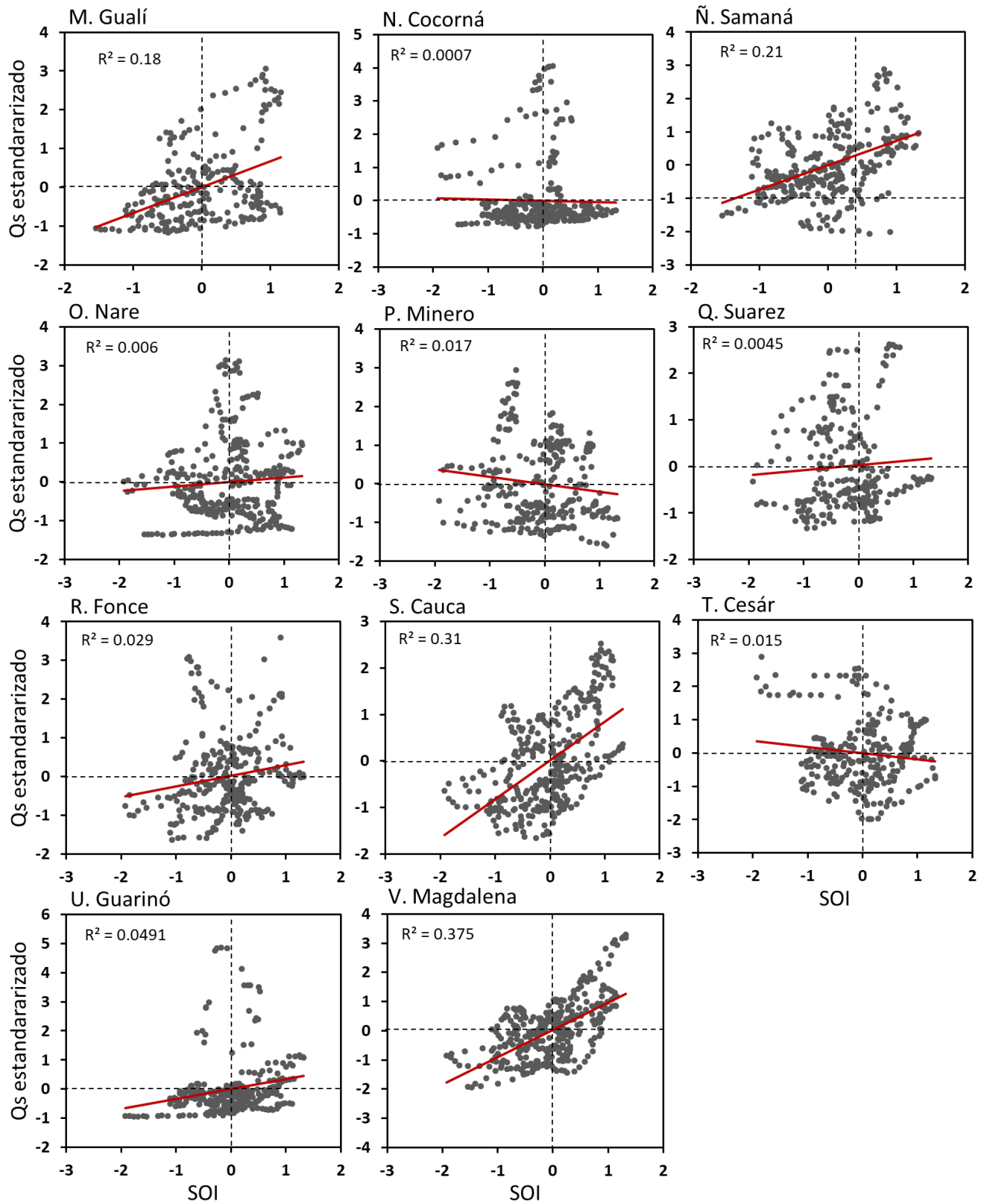


Figura 6.2. Regresiones lineales del transporte de sedimentos estandarizado versus el índice SOI para las 23 estaciones de aforo (Figura 1) en la cuenca del río Magdalena.

Tabla 2. Río tributario, coeficiente de determinación r^2 , Valor - p y ecuación del modelo de regresión lineal para el transporte de sedimentos (Q_s) y ENOS (SOI) durante el periodo 1980 - 2010.

Tributario	Coeficiente de determinación (r^2)	Valor - p	Ecuación del modelo de regresión lineal
Bogotá	0.0005	0.754	$Q_s = 0.01 (SOI) + 0.012$
Cabrera	0.014	0.094	$Q_s = 0.18 (SOI) + 0.014$
Carare	0.475	$2.804 e^{-28}$	$Q_s = 0.40 (SOI) + 0.013$
Cauca	0.31	$9.055 e^{-30}$	$Q_s = 0.84 (SOI) + 0.011$
Cesár	0.015	0.013	$Q_s = -0.18 (SOI) - 0.003$
Cocorná	0.0007	0.653	$Q_s = -0.04 (SOI) - 0.004$
Coello	0.046	0.000	$Q_s = 0.35 (SOI) - 0.008$
Fonce	0.029	0.000	$Q_s = 0.27 (SOI) + 0.019$
Guali	0.18	$1.300 e^{-12}$	$Q_s = 0.67 (SOI) + 0.006$
Guarínó	0.05	$8.996 e^{-5}$	$Q_s = 0.35 (SOI) + 0.006$
La Miel	0.147	$4.271 e^{-14}$	$Q_s = 0.59 (SOI) + 0.015$
Magdalena	0.375	$2.435 e^{-39}$	$Q_s = 0.94 (SOI) + 0.024$
Minero	0.017	0.002	$Q_s = -0.19 (SOI) - 0.015$
Nare	0.006	0.383	$Q_s = 0.113 (SOI) + 0.002$
Negro	0.051	$1.962 e^{-6}$	$Q_s = 0.35 (SOI) + 0.019$
Opón	0.0009	0.731	$Q_s = -0.05 (SOI) - 0.005$
Paez	0.093	$7.006 e^{-8}$	$Q_s = 0.12 (SOI) + 0.057$
Recio	0.04	$9.578 e^{-5}$	$Q_s = 0.29 (SOI) - 0.007$
Samaná	0.21	$6.599 e^{-8}$	$Q_s = 0.73 (SOI) - 0.009$
Sogamoso	0.025	0.119	$Q_s = 0.26 (SOI) + 0.042$
Suarez	0.0045	0.114	$Q_s = 0.11 (SOI) + 0.025$
Suaza	0.011	0.060	$Q_s = -0.13 (SOI) - 0.011$
Sumapaz	0.0004	0.667	$Q_s = -0.03 (SOI) - 0.001$

Además de lo anterior, la ecuación de los modelos de regresión lineal (Tabla 2) muestra que el coeficiente que acompaña la variable del ENOS (SOI) es positiva, lo que quiere decir que a medida que el índice SOI es positivo (o negativo), es decir, el fenómeno de La Niña (o El Niño) es más intenso, el transporte de sedimentos aumenta (o disminuye) para cada uno de los tributarios.

4.3. Series de tiempo del transporte de sedimentos y el índice SOI (1980 - 2010)

La serie de tiempo del índice SOI con filtro interanual para el fenómeno del ENOS (Figura 7) registra 3 eventos moderados y 5 eventos débiles de la fase La Niña. Los 3 eventos de intensidad moderada que se observan ocurrieron: el primero entre 1988 – 1990, el segundo entre 1999 – 2002, siendo el más prolongado, y el tercero en el 2009; adicionalmente, los 5 eventos débiles de La Niña ocurren en los años 1982, 1987, 2006, 2008 y 2010. Si bien la serie de tiempo con datos de promedio mensual del índice SOI (Figura 4) registra meses de eventos La Niña de intensidad fuerte, en el filtro interanual de esta serie no se reconocen eventos fuertes de La Niña (Figura 7).

Para la fase de El Niño se evidencian 2 eventos de intensidad fuerte: 1) 1982 – 1984 y 2) 1998 – 1999; también, la presencia de 2 eventos de intensidad moderada, el

primero entre 1987 – 1988 y el segundo entre 1992 – 1993; éste último disminuye su intensidad de moderado a débil entre los años 1993 – 1996, volviéndolo el evento más prolongado de El Niño con aproximadamente 5 años de duración. En los años posteriores al 2000, se identifican dos eventos de El Niño de intensidad débil que ocurren durante los años 2003 y 2005 (Figura 7).

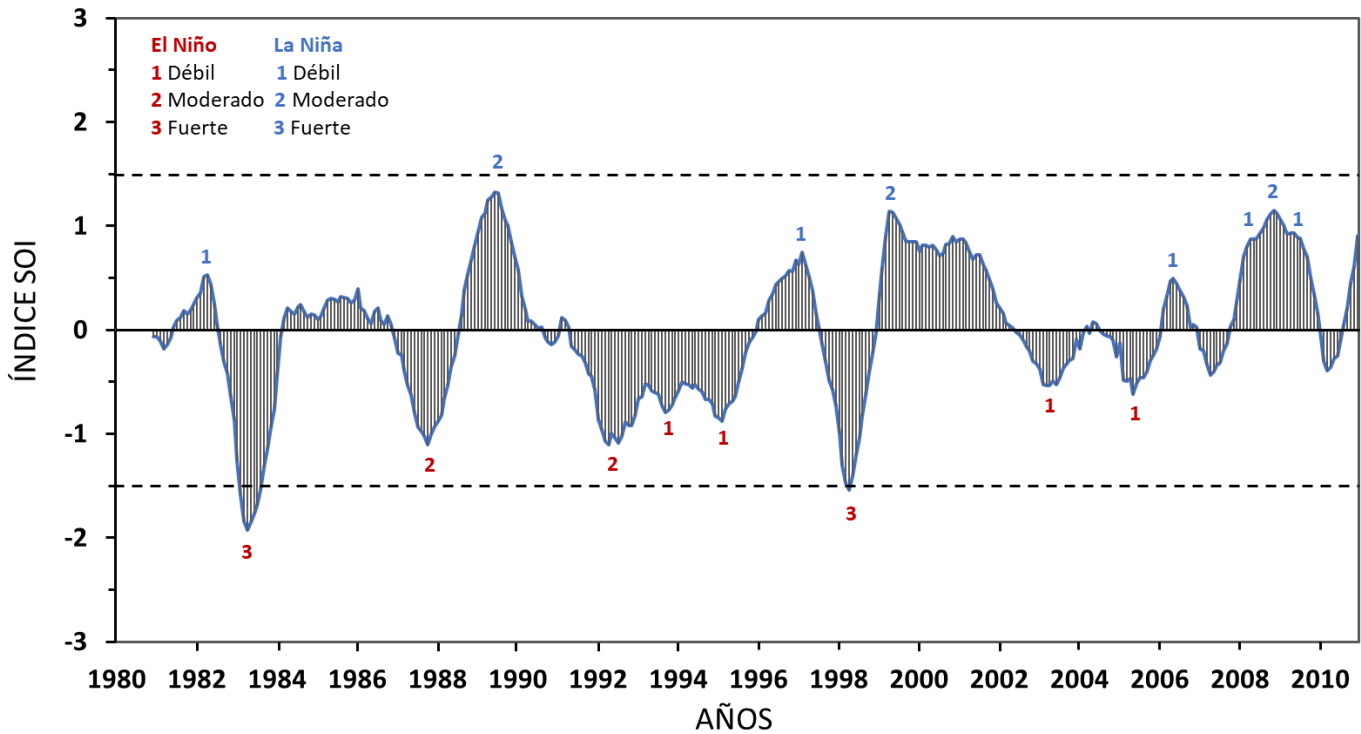


Figura 7. Serie de tiempo del índice SOI y periodos de intensidad fuerte (3), moderada (2) y débil (1) para las fases El Niño y La Niña.

El transporte de sedimentos se asocia al fenómeno del ENOS en las series de tiempo de las figuras 8.1 y 8.2 para las subcuencas tributarias donde el modelo de regresión lineal es robusto (Tabla 2). Es importante destacar que para algunas subcuencas, los registros del transporte de sedimentos y el índice SOI son muy similares entre los años 1980 – 2010, pues se muestra un aumento en el transporte de sedimentos a medida que el fenómeno ENOS cambia de fase de El Niño a La Niña.

En presencia de los eventos de La Niña moderados se observan aumentos del transporte de sedimentos superiores a 1.5σ en los ríos tributarios Carare, Cauca y Samaná, en los cuales el control del fenómeno ENOS es del 47%, 31% y 21%, respectivamente, sobre la variabilidad del transporte de sedimentos (Tabla 2). De igual forma, en presencia de los eventos de El Niño fuertes, se dan disminuciones del transporte de sedimentos superiores a -1σ en los ríos Cauca, La Miel y Samaná, de los cuales, en el río La Miel, la influencia del ENOS sobre la variabilidad del transporte de sedimentos es de aproximadamente el 15%.

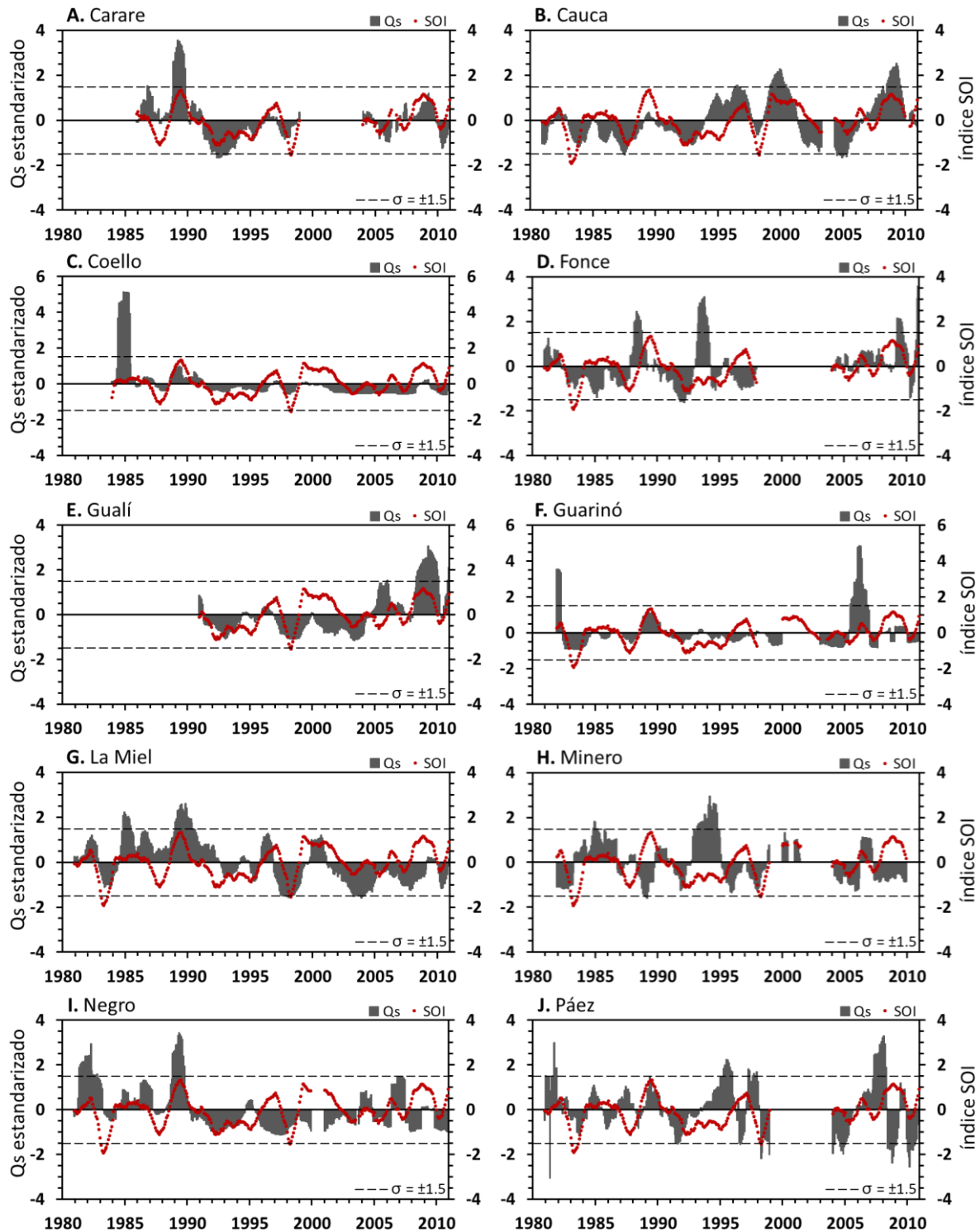


Figura 8.1. Series de tiempo del transporte de sedimento (Q_s estandarizado) (área gris) e índice SOI (línea punteada roja).

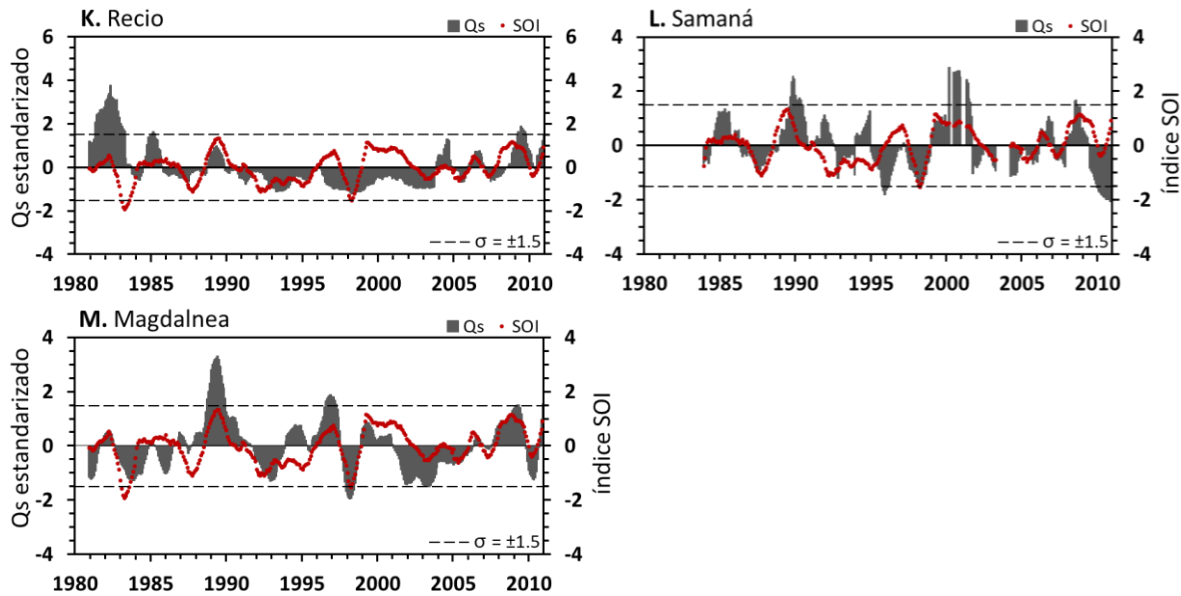


Figura 8.2. Series de tiempo del transporte de sedimento (Q_s estandarizado) (área gris) e índice SOI (línea punteada roja).

El aumento (disminución) del transporte de sedimentos en fase de La Niña (El Niño) se corrobora al analizar la variabilidad del transporte de sedimentos en presencia de ambas fases del ENOS con intensidades fuertes, moderadas o débiles (Figura 9). Se encuentra por ejemplo, que para el río Cauca (Figura 9.B), la variabilidad está entre (-80% – 40%) durante eventos fuertes de El Niño y entre (40% – 160%) durante eventos moderados de La Niña. Así mismo para el río Carare y Gualí (Figura 9.C y 9.E), los rangos de la variabilidad del transporte de sedimentos son negativos durante eventos de El Niño fuertes, moderados y débiles, y positivos en eventos de La Niña débiles y moderados.

Para los tributarios Fonce, Minero, Negro y Páez no es posible relacionar las series de tiempo del transporte de sedimentos con la serie del ENOS, pues ambas curvas (Figuras 8.1. 8.1.D, 8.1.H, 8.1.I y 8.1.J) no se encuentran visualmente en fase durante el periodo 1980 – 2010. Por ejemplo, el río Páez muestra una variabilidad entre (-100% – -20%) durante eventos de El Niño fuerte, sin embargo, la variabilidad en presencia eventos de La Niña moderados está en el rango de (-180% – 100%) con una mayor concentración de datos en rangos porcentuales negativos (Figura 9.F).

De acuerdo con lo anterior, para los tributarios Fonce, Minero, Negro y Páez, en los cuales el ENOS tiene un control del 2.9%, 1.7%, 5.1% y 4%, respectivamente, se muestra que la presencia de ambas fases del fenómeno climático no determina notoriamente la variabilidad del transporte de sedimentos entre los años 1980 – 2010, como si lo hace para tributarios como Cauca, Carare, Samaná y La Miel.

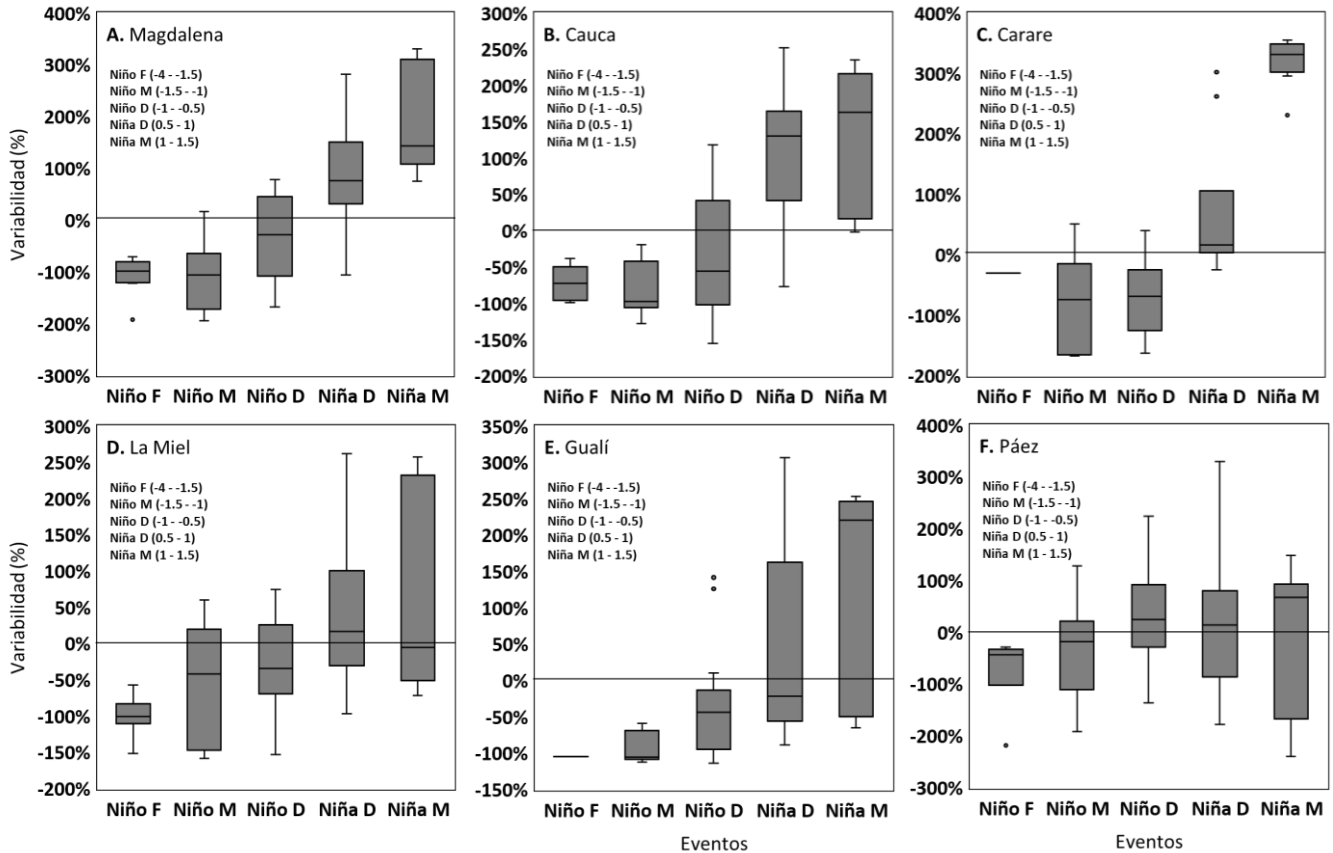


Figura 9. Variabilidad del transporte de sedimentos (%) respecto al promedio interanual en fases de El Niño y La Niña de intensidad fuerte, moderada y débil.

En general para toda la cuenca, se observa que la serie de tiempo de transporte de sedimentos del río Magdalena se encuentra en fase con la serie de tiempo del fenómeno ENOS (Figura 8.2.M).

En los periodos de La Niña con intensidad moderada, el transporte de sedimentos de la cuenca del río Magdalena incrementa en mas de 1.5σ , y en los periodos de El Niño con intensidad fuerte o moderada el transporte de sedimentos disminuye en mas de 1σ . Adicionalmente, se comprueba que en eventos de El Niño fuerte la variabilidad del transporte de sedimentos está entre un rango de valores negativos (-110% – -90%), y en eventos de La Niña moderados la variabilidad está en un rango de valores positivos (100% – 330%) (Figura 9.A).

Finalmente, teniendo en cuenta que en la cuenca Magdalena el ENOS tiene un control del 37% sobre la variabilidad del transporte de sedimentos entre los años 1980 – 2010, puede observarse que el transporte de sedimentos tiene una relación estrecha entre el comportamiento del ENOS.

4.4. Análisis de la relación entre el transporte de sedimentos y el ENOS haciendo uso de herramientas de georreferenciación.

Se generaron series de tiempo asociadas al transporte de sedimentos de 23 estaciones de aforo, las cuales representan el 62% del área total de la cuenca correspondiente a las cuencas referenciadas en las figuras 10 y 11.

Por otra parte, 12 de las 13 estaciones de aforo que tienen modelos de regresión lineal robustos, representan el 30% del área total de la cuenca del río Magdalena. La estación restante hace referencia a la estación de aforo Magdalena en Calamar, la cual representa el comportamiento general de todos los procesos hidrológicos que ocurren en la toda cuenca del río Magdalena (Figura 10).

Se encuentra que el ENOS tiene una influencia superior al 30% sobre la variabilidad del transporte de sedimentos en las cuencas Cauca y Carare, las cuales representan el 83% del área evaluada (Figura 10); también, el fenómeno climático tiene una influencia inferior al 5% en las subcuencas Recio, Fonce y Coello, cuya área corresponde al 5% del área evaluada. Según lo anterior, es importante notar que hay mayor influencia del fenómeno sobre las subcuencas de mayor tamaño. Además, se destaca que sobre la estación de aforo Magdalena, que representa toda la cuenca, el ENOS tiene un control del 37% sobre el transporte de sedimentos.

Por otra parte, en representación de la sección del alto Magdalena, la subcuenca del río Páez (1.6% del área evaluada) fue la única con un modelo de regresión lineal robusto. La ausencia de una relación estrecha entre la variabilidad del transporte de sedimentos y el fenómeno del ENOS, para este río (Figura 9.F y Figura 11.L), sugiere que en la parte alta del río Magdalena, el ENOS no es un factor determinante en el comportamiento del transporte de sedimentos al presentarse el fenómeno climático.

Adicionalmente, en las cuencas del medio Magdalena, particularmente Gualí y La Miel (total de 3.3% del área evaluada), la variabilidad del transporte de sedimentos depende del ENOS en más del 15%. En esta sección de la cuenca el ENOS es un factor determinante sobre el comportamiento del transporte de sedimentos. Esto porque: 1) las series de tiempo de ambas curvas (Qs y SOI) se encuentran en fase la mayor parte del periodo de 30 años (Figura 11.D, 11.F); y 2) puede verse que la variabilidad del transporte de sedimentos cambia coherentemente según la presencia de las fases El Niño o La Niña (Figura 9.D y 9.E). No obstante, los rangos de esta variabilidad tienen amplitudes de hasta 200% en eventos como La Niña de intensidad moderada, indicando que en la sección del medio Magdalena, hay mayor dispersión en la respuesta del transporte de sedimentos ante la presencia del ENOS.

Para la sección del bajo Magdalena, los modelos de regresión lineal de las subcuencas Cauca y Carare (83% del área evaluada) sugieren que en esta, el ENOS es un factor determinante para el proceso del transporte de sedimentos. Lo

anterior puede observarse en las series de tiempo (Figura 11.B y 11.H), donde el transporte de sedimentos y el ENOS se encuentran en fase durante el periodo 1980 – 2010; además, es posible evidenciar que en presencia de eventos fuertes, moderados y débiles del ENOS, la variabilidad del transporte de sedimentos tiene un comportamiento coherente con el fenómeno, pues como se observa en las figuras 9.B y 9.C, los rangos de variabilidad del transporte de sedimentos son positivos a medida que el ENOS cambia de fase de El Niño a La Niña.

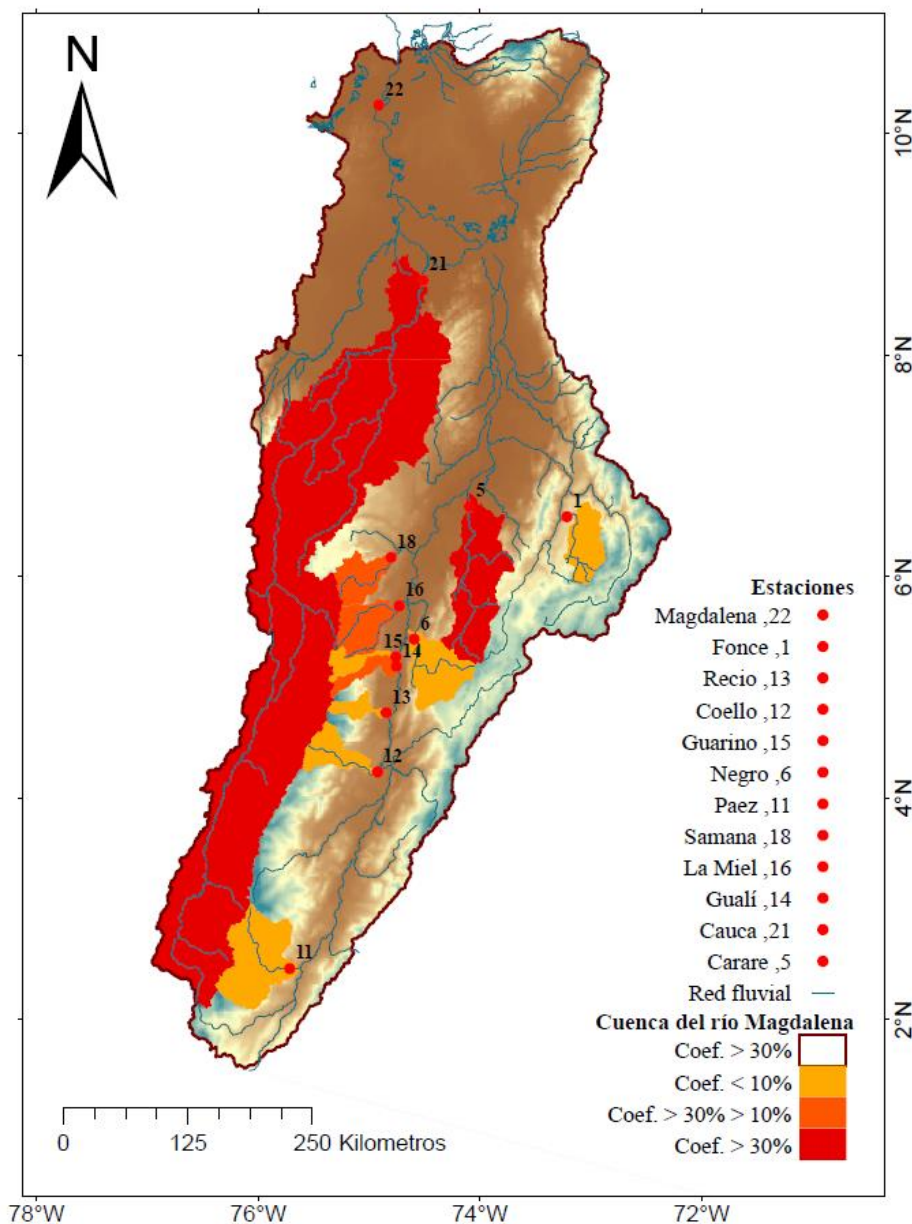


Figura 10. Mapa de la red de drenaje de la cuenca del río Magdalena mostrando la influencia del ENOS (%) sobre el transporte de sedimentos.

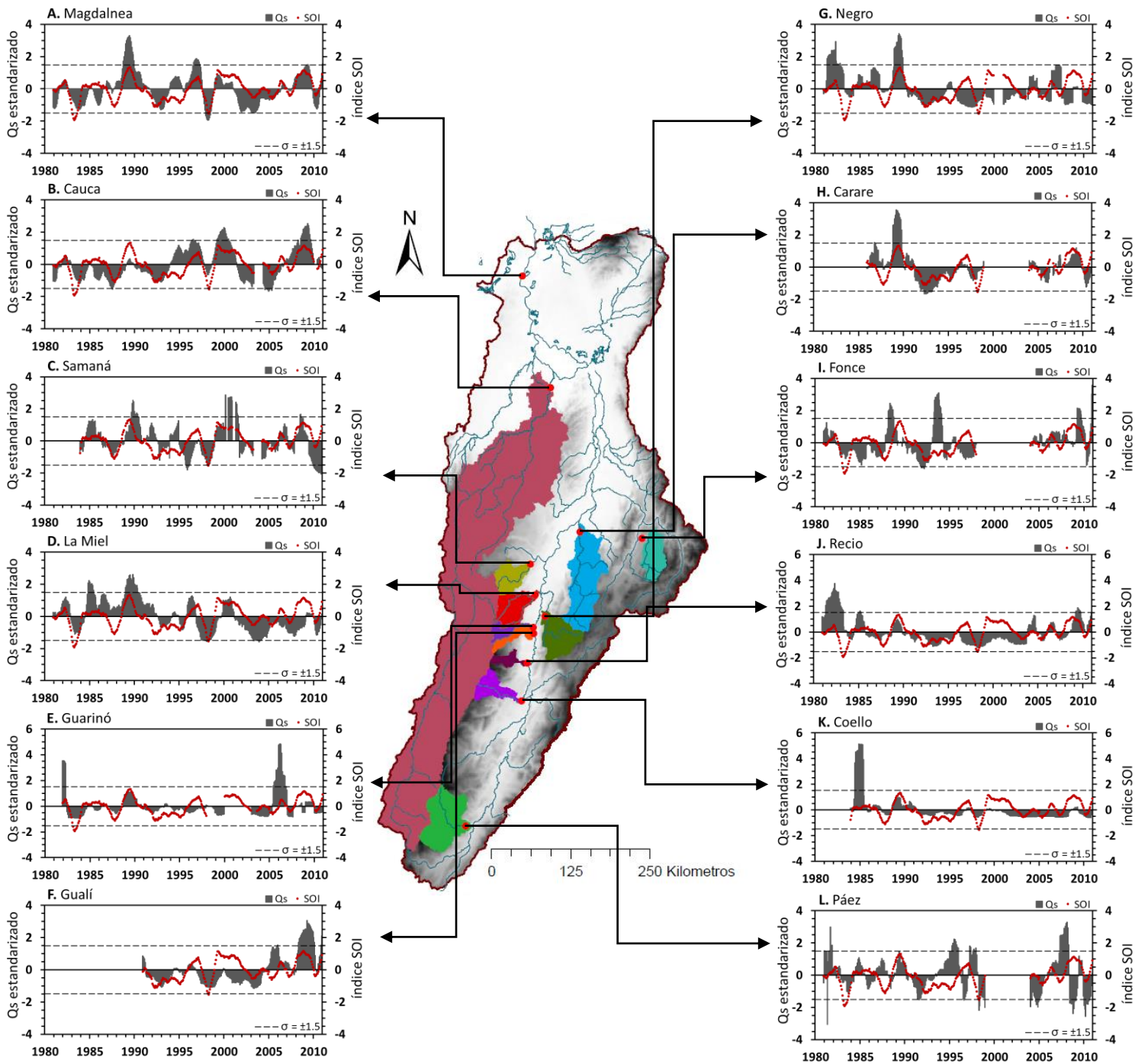


Figura 11. Mapa de la red de drenaje de la cuenca del río Magdalena y las series respectivas sobre el transporte de sedimentos y el índice SOI.

Finalmente, para toda la cuenca se evidencia que el ENOS tiene un control del 37% sobre la variabilidad del transporte de sedimentos, la cual tiene un comportamiento que se relaciona estrechamente con la presencia de eventos de La Niña o El Niño de intensidad fuerte, moderada y débil (Figura 9.A); además, dicha relación puede verse reflejada en las series de tiempo donde se observa que el fenómeno climático y el transporte de sedimentos permanecen en fase durante el periodo 1980 – 2010 (Figura 11.A).

5. Discusión

En este estudio se encuentra que el ENOS tiene una influencia estimada del 37% sobre la variabilidad del transporte de sedimentos del río Magdalena, durante los años 1980 – 2010 (Tabla 2). Según Milliman y Syvitski (1992) los factores geomorfológicos como el tamaño de la cuenca y el relieve son determinantes en el comportamiento de los sedimentos de cualquier río, sin embargo, en el caso del Magdalena, se puede establecer que los patrones climáticos también hacen parte de los principales factores que controlan el comportamiento de los sedimentos (Restrepo y Kjerfve (2000a y b), así como también, el uso del suelo y las actividades antrópicas (Restrepo et al, 2015; Restrepo y Escobar, 2018).

Las series de tiempo (Figura 8.1 y 8.2) confirman que El Niño se asocia a anomalías negativas y La Niña se asocia a anomalías positivas del transporte de sedimentos. Lo anterior también ocurre para otros procesos como el caudal, la humedad del suelo, la evapotranspiración y la precipitación (Poveda y Mesa, 1996; Restrepo y Kjerfve, 2000a; Poveda y Álvarez, 2011).

En la cuenca del río Magdalena, el impacto de La Niña es más fuerte que el impacto de El Niño sobre procesos como el caudal y la precipitación (Poveda y Álvarez, 2011). Lo anterior, también puede intuirse para el transporte de sedimentos según lo que se observa en las series de tiempo (Figura 8.1 y 8.2) y en la variabilidad del transporte de sedimentos (Figura 9); pues en la cuenca, pocos tributarios tuvieron valores negativos por debajo de -1.5σ en presencia de eventos de El Niño fuerte, mientras que para todos los tributarios evaluados, se presentaron anomalías positivas superiores a 1.5σ en eventos de La Niña de intensidad moderada. Sin embargo, estudios de mayor profundidad son necesarios para determinar con precisión, los efectos de ambas fases del ENOS sobre el transporte de sedimentos durante las últimas décadas.

Según datos entre 1980 – 2010, el transporte de sedimentos en la estación de aforo en Calamar (Magdalena), mantiene un promedio de aproximadamente 407×10^3 ton/día, y un máximo promedio de 859×10^3 ton/día (Tabla 1). También, los datos en esta estación de aforo indican valores que alcanzan 1.564×10^3 ton/día, los cuales son valores superiores a los presentados en Restrepo y Kjerfve (2000a) para el transporte de sedimentos en Calamar, sin embargo, tal estudio se realiza con datos entre los años 1975 – 1995. La diferencia entre los valores máximos del transporte de sedimentos que se registra en este estudio y en el estudio de Restrepo

y Kjerfve (2000a) es coherente con las tendencias ascendentes halladas en Restrepo y Escobar (2018), las cuales no solo se evidencian en Calamar, sino también para las estaciones de aforo Páez, Gualí, Suarez, Fonce y Sogamoso.

6. Conclusiones

Se encontró que 13 de las 23 estaciones de aforo tienen un modelo de regresión lineal robusto, los cuales estiman la influencia del ENOS sobre la variabilidad del transporte de sedimentos entre los años 1980 – 2010 para cada una de estas subcuencas. Para la estación de aforo en Calamar, la cual abarca el comportamiento de todos los procesos hidrológicos que ocurren en la cuenca del río Magdalena, se estima que el ENOS tiene una influencia del 37%; y para el río Cauca, que es el tributario más importante de la cuenca del Magdalena, la influencia del fenómeno climático es del 31%.

Se analizó la variabilidad interanual entre las series de transporte de sedimentos y el ENOS para el periodo 1980 – 2010; y se encontró que, para los ríos donde el ENOS tiene mayor influencia, como Cauca, Carare, La Miel y Gualí, las anomalías en el transporte de sedimentos son positivas o negativas durante fases intensas de La Niña o El Niño, respectivamente. Este comportamiento también puede hacerse evidente para toda la cuenca según el análisis de las series de tiempo en la estación de aforo en Calamar (Magdalena).

Adicionalmente, en las series de tiempo se observó que el transporte de sedimentos de los ríos con correlaciones superiores al 15% con el ENOS se encuentran en fase. Sin embargo, se considera importante ahondar en estudios que permitan describir mejor el comportamiento espectral de dichas series de tiempo, en presencia de ambas fases del ENOS.

Según lo analizado en este estudio, se identificó que el ENOS tiene mayor control sobre el transporte de sedimentos en las cuencas del medio Magdalena y bajo Magdalena, siendo superior al 30% en bajo Magdalena, específicamente en los tributarios Cauca y Carare, los cuales representan el 83% del área evaluada.

En la sección alta de la cuenca, la variabilidad del transporte de sedimentos en presencia de eventos del ENOS, sugiere que el fenómeno no tiene una influencia determinante en su comportamiento. Además, la estimación del control que tiene el ENOS sobre el transporte de sedimentos en esta parte de la cuenca es inferior al 5%. No obstante, se considera que dicha estimación requiere precisarse, pues en este estudio, el río Páez es el único referente para la sección del alto Magdalena, dada la ausencia de modelos de regresión robustos en otros tributarios localizados en la zona.

7. Bibliografía

Amarasekera, K.N., Lee, R.F., Williams, E.R., Elthahir, E.A., 1997. ENSO and the natural variability in the flow of tropical rivers. *Journal of Hydrology* 200, 24-39.

Azim, F., Shakir, A.S., Rehman, H., Kanwal, A., 2016. Impact of climate change on sediment yield for Naran watershed, Pakistan. *International Journal of Sediment Research* 31, 212-219.

Barrero, D., Pardo, A., Vargas, C.A., Martinez, J.F., 2007. Colombian sedimentary basins: Nomenclature, boundaries and petroleum geology, a new proposal. *Sedimentary basins of Colombia: Geological Framework*. Agencia Nacional de Hidrocarburos.

Bustamante, C., Archanjo, C., Cardona, A., Valencia, V., Vervoort., 2016. Late Jurassic to early cretaceous plutonism in the Colombian Andes: a record of long-term arc maturity. *Geological Society of America Bulletin* 128, 1762-1779.

Bustamante, C., Cardona, A., Bayona, G., Mora, A., Valencia, V., Gehrels, G., Vervoort, J., 2010. U–Pb LA-ICP-MS geochronology and tectonic correlation of middle Jurassic intrusive rocks from the Garzon Massif and the Central Cordillera, Southern Colombia. *Boletín de Geología* 32, 93-109.

Cai, T., Li, Q., Yu, M., Lu, G., Cheng, L., Wei, X., 2012. Investigation into the impacts of land-use change on sediment yield characteristics in the upper Huaihe River basin, China. *Physics and Chemistry of the Earth* 53-54, 1-9.

Cochrane, R., Spikings, R., Gerdes, A., Ulianov, A., Mora, A., Villagómez, D., Putlitz, B., Chiaradia M., 2014. Permo-Triassic anatexis: continental rifting and the disassembly of western Pangaea. *Lithos* 190, 383-402.

Covault, J.A., Craddock, W.H., Romans, B.W., Fildani, A., Gosai, M., 2013. Spatial and temporal variations in landscape evolution: historic and longer-terms sediment flux through global catchments. *The Journal of Geology* 121, 35-56.

Cuartas, A., Poveda, G., 2002. Balance atmosférico de humedad y estimación de la precipitación reciclada en Colombia según el Reanálisis NCEP/CAR. *Meteorología Colombiana* 5, 57-65.

IDEAM, 2014. River database of the Magdalena drainage basin. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Bogotá, Colombia (Data). (23 gauging stations).

Martens, U., Restrepo, J.J., Ordóñez-Carmona, O., Correa-Martinez, A.M., 2014. The Tahamí and Anaconda terranes of the Colombian Andes: missing links between the South American and Mexican Gondwana margins. *The Journal of Geology* 122, 507-530.

- Marden, M., Herzig, A., Basher, L., 2014. Erosion process contribution to sediment yield before and after the establishment of exotic forest: Waipaoa catchment, New Zealand. *Geomorphology* 226, 162-174.
- Mesa, O.J., Poveda, G., Carvajal, J.F., 1997. *Introduction to Colombia's Climate* (in Spanish). Universidad Nacional de Colombia Press, Bogotá.
- Milliman, J.D., Syvitski, P.M., 1992. Geomorphic/Tectonic Control of Sediment Discharge to the Ocean: The Importance of Small Mountainous Rivers. *Journal of Geology* 100, 525-544.
- Mojica, J., Franco, R., 1990. Estructura y evolución tectónica del Valle Medio y Superior del Magdalena. *Geología Colombiana* 17, 41-64.
- Parajuli, P.B., Jayakody, P., Sassenrath, G.F., Ouyang, Y., 2016. Assessing the impacts of climate change and tillage practices on stream flow, crop and sediment yields from the Mississippi River Basin. *Agricultural Water Management* 168, 112-124.
- Pelletier, J.D., 2012. A spatially distributed model for the long-term suspended sediment discharge and delivery ratio of drainage basins. *Journal of Geophysical Research* 117, 2-28.
- Peña, D., 2010. *Análisis de series temporales*. Alianza Editorial, Madrid, 604 p.
- Potter, P.E., 1997. The Mesozoic and Cenozoic paleodrainage of South America: a natural history. *Journal of South American Earth Sciences* 10, 331-334.
- Poveda, G., 2004. La hidroclimatología de Colombia: una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diaria. *Revista Académica de Colombia Ciencias de la Tierra* 28, 201-222.
- Poveda, G., Álvarez D.M., 2011. Hydro-climatic variability over the Andes of Colombia associated with ENSO: a review of climatic processes and their impact on one of the Earth's most important biodiversity hotspots. *Climatic Dynamics* 36, 2233-2249.
- Poveda, G., Mesa, O.J., 1996. Feedbacks between hydrological processes in tropical South America and large-scale ocean-atmospheric phenomena. *Journal of Climate* 10, 2690-2702.
- Poveda, G., Mesa, O.J., 2000. On the existence of Loró (the rainiest locality on Earth): enhanced ocean-atmosphere-land interaction by low-level jet. *Geophys Res Lett* 27, 1675-1678.
- Restrepo, J.C., Ortíz, J.C., Pierini, J., Schrottke, K., Maza, M., Otero, L., Aguirre, J., 2014. Freshwater discharge into the Caribbean Sea From the rivers of Northwestern South America (Colombia): Magnitude, variability and recent changes. *Journal of Hydrology* 509, 266-281.

Restrepo, J.D., 2005, Los sedimentos del río Magdalena: Reflejo de la crisis ambiental. Universidad EAFIT, Medellín, 267 p.

Restrepo, J.D., Escobar, H.A., 2018. Sediment load trends in the Magdalena River basin (1980 – 2010): Antropogenic and climate-induced causes. *Geomorphology* 302, 76-91.

Restrepo, J.D., Escobar, R., Tomic, M., 2018. Fluvial fluxes from the Magdalena River into Cartagena Bay, Caribbean Colombia: Trends, future scenarios, and connectios with upstream human impacts 302, 92-105.

Restrepo, J.D., Kettner, A.J., Syvitski, J.P.M., 2015. Recent deforestation causes rapid increase in river sediment load in the Colombian Andes. *Anthropocene* 10, 13-28.

Restrepo, J.D., Kjerfve, B., 2000. Magdalena river: interannual variability (1975–1995) and revised water discharge and sediment load estimates. *Journal of Hydrology* 235, 137-149.

Restrepo, J.D., Kjerfve, B., 2000. Water discharge and sediment load from the western slopes of the Colombian Andes with focus on Rio San Juan. *Journal of Geology* 108, 17-33.

Restrepo, J.D., Kjerfve, B., Hermelin, M., Restrepo, J.C., 2006. Factors controlling sediment yield in a major South American drainage basin: the Magdalena River, Colombia. *Journal of Hydrology* 316, 213–232.

Restrepo, J.D., Syvitski, J.P.M., 2006. Assesing the efect of natural controls and land use change on sediment yield in a major Andean river: the Magdalena river, Colombia. *Journal of Hydrology* 316, 213-232.

Restrepo-Pace, P.A., Cediél, F., 2010. Northern South America basement tectonics and implications for paleocontinental reconstructions of the Americas. *Journal of South American Earth Science* 29, 764-771.

Serpa, D., Nunes, J.P., Santos, J., Sampaio, E., Jacinto, R., Veiga, S., Lima, J.C., Moreira, M., Corte-Real, J., Keizer, J.J., Abrantes, N., 2015. Impacts of climate changes on the hydrological and erosion processes of two contrasting Mediterranean catchments. *Science of the Total Environment* 538, 64-77.

Snow, J.W., 1976. The climate of northern South America: Colombia. In: *Schwerdtfeger, W. (Ed.), Climates of South and Central America*. Elsevier, Amsterdam, 358-379.

Spikings, R., Cochrane, R., Villagómez, D., Van der Lelij, R., Vallejo, C., Winkler, W., Beate B., 2015. The geological history of northwestern South America: from Pangaea to the early collision of the Caribbean large Igneous Province (290–75Å Ma). *Gondwana Research* 27, 95-139.

Toussaint, J.F., 1996. Evolución Geológica de Colombia: Cretácico. Editorial Universidad Nacional, Medellín (277 pp.).

Van der Hammen, T., Hooghiemstra, H., 1997. Chronostratigraphy and correlation of the Pliocene and Quaternary of Colombia. *Quaternary International* 40, 81-91.

Vinasco, C.J., Cordani, U.G., Gonzáles, H., Weber, M., Pelaez, C., 2006. Geochronological, isotopic, and geochemical data from Permo-Triassic granitic gneisses and granitoids of the Colombian Central Andes. *Journal of South America Earth Sciences* 21, 355-371.

Vorosmartry, C.J., Meybeck, M., 2000. Riverine transport and its alteration by human activities. *IGBP Newsl* 39, 24-29.

Walling, D.E., 1994. Measuring sediment yield from river basin Soil Erosion Research Methods. *Soil and Water Conservation Society*. 39-80.

Warrick, J.A., Madej, M.A., Goñi, M.A., Wheatcroft, R.A., 2013. Trends in the suspended-sediment yields of coastal rivers of northern California, 1955 – 2010. *Journal of Hydrology* 489, 108-123.

Zhu, Y.M., Lu, X.X., Zhou, Y., 2008. Sediment flux sensitivity to climate change: A case study in the Longchuanjiang catchment of the upper Yangtze River, China. *Global and Planetary Change* 60, 429-442.