

7. Integración de Variables del Sistema Fluvial - Río Sinú

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de integrar las condiciones identificadas a través de las características Geológicas, Geomorfológicas e Hidráulicas desarrolladas en los acápite anteriores. Se identificaron diez categorías de respuesta a través del área de estudio. La relación multiescala de las variables se desarrolló a través de ArcGIS 10.4 y se desarrolló su algoritmo a través de ArcPY y Python. Evaluando su comportamiento en los escenarios antes y después de la operación del embalse de URRÁ.

Las categorías de respuesta se relacionan a partir de las condiciones medias de las características explicadas durante el desarrollo de esta investigación y sintetizadas en el vector medio del eje central del cauce activo del río Sinú en el año 2015. Partiendo de los tipos de materiales litológicos y geofomas involucrados en la resistencia hídrica fluvial; de igual forma la dinámica fluvial (movimiento de orillas y sinuosidad), ancho del cauce, condiciones de flujo y sedimentos se involucraron en la exploración de los patrones que definen dichas categorías.

La base de datos de análisis y exploración de patrones de esta investigación se compone de la siguiente manera: materiales (síntesis de la resistencia hídrica fluvial) que involucran la geología (capítulo 3) y geomorfología (capítulo 4), la dinámica fluvial se utilizó como la tasa media multianual de cambio de orillas, el índice de sinuosidad multianual, la variabilidad media de cambio del ancho del cauce activo (capítulo 5), el resultado de velocidad, profundidad y esfuerzo cortante del modelo hidráulico con probabilidad de excedencia del 50% (capítulo 6), comportamiento de concentración de sedimentos,

espesor de sedimentos, diámetro al 50% y 90% activo en el flujo, para la misma probabilidad de excedencia del flujo (capítulo 7).

7.1 Exploración inicial de patrones en el sistema fluvial

La exploración de patrones se basó en la línea de flujo de minería de datos (**Figura 1-19**), con lo cual los algoritmos de K-Means y EM (Expectation Maximisation) con reiteradas simulaciones en diferentes valores de semilla de cálculo, arrojaron resultados de las primeras categorías de comportamiento del sistema fluvial, estas categorías no se ajustaron adecuadamente a la interpretación visual del sistema caracterizado en la investigación. Las categorías iniciales se presentan y relaciona n con sus agrupaciones en la **Tabla 7-1**.

Figura 7-1 Patrones de asociación exploratorio de las variables del sistema fluvial – algoritmo K-Means



Fuente: Autor – GUI Weka 3.8.1

El algoritmo EM permite la identificación de clases automáticas como primer medida de exploración, con las cuales se evaluaron el conjunto de muestra de 2917 casos a través del cauce activo del río Sinú. Se obtuvieron a través de este algoritmo tres clústers iniciales que no satisfacen la variabilidad natural del sistema, realizando simultáneas simulaciones encontrando la mejor medida de verosimilitud en las clases. Se evaluaron diez clases que abarcaran la variabilidad natural del sistema, estas mismas diez clases fueron tomadas para las simulaciones bajo el algoritmo K-means, el cual obtuvo la mejor clasificación para 21 semillas iniciales (**Figura 7-1**).

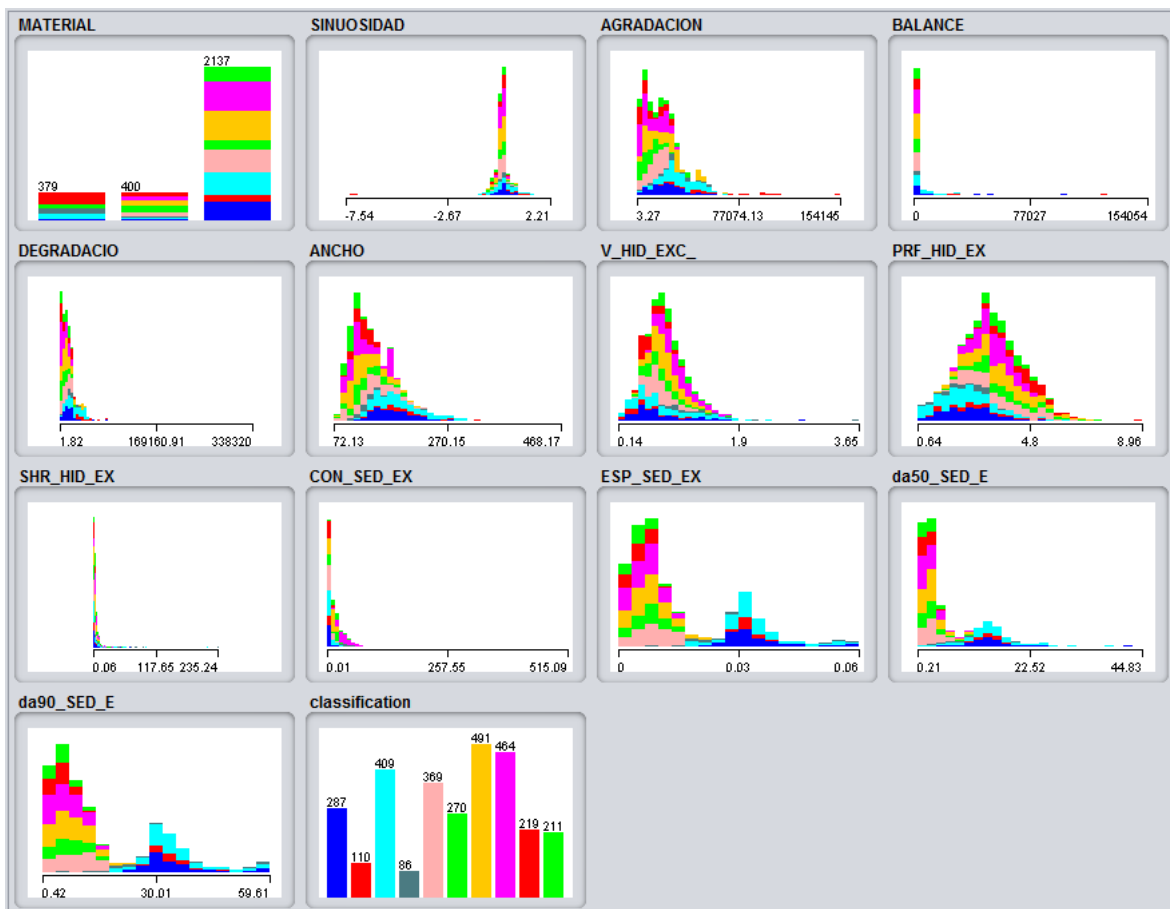
Con esta primera aproximación se pudo identificar comportamientos iniciales de carácter regional de roca, elementos antrópicos y depósitos, presentados en importancia de resistencia. La sinuosidad de manera regional se concentra en valores de aumento de su sinuosidad y los procesos de movimientos de orillas se caracterizan a través de la agradación, degradación y balance. Las condiciones derivadas del modelamiento hidráulico resaltan distribuciones similares para en el ancho, velocidad y profundidad sin embargo las agrupaciones toman contextos y rangos diferentes de los propios registros, aunque los datos finales de sedimentos como espesor de residuos d50 y d90 presentan distribuciones similares iniciales ayudan a la caracterización de las zonas homogéneas que en el sistema fluvial.

7.2 Categoría de respuesta del sistema fluvial del Río Sinú

Con la exploración inicial se abordó la clasificación supervisada del comportamiento del sistema fluvial con el algoritmo J48, para árboles de decisión. A diferencia de la exploración inicial el comportamiento de los patrones responden de manera inicial al espesor del sedimento activo a través del flujo en el cauce activo. En la **Figura 7-2** se presenta la asignación final de las diez clases identificadas a través del algoritmo J48. La distribución de los materiales para las categorías se presenta con mayor variedad como debido a la integración natural del sistema fluvial.

Las categorías del sistema responden naturalmente al comportamiento del sistema fluvial descrito en la investigación, se puede observar como las variables responden a la separación de los tramos identificados anteriormente, donde el tramo No 1 desde el embalse hasta el K80+000 presenta mayor sinuosidad y movilidad al tramo final hasta la formación del delta, se puede observar en la profundidad de flujo (PRF_HID_EX), espesor de sedimento (ESP_SED_EX), d50 (da50_SED_E) y d90 (da90_SED_E), **Figura 7-2**.

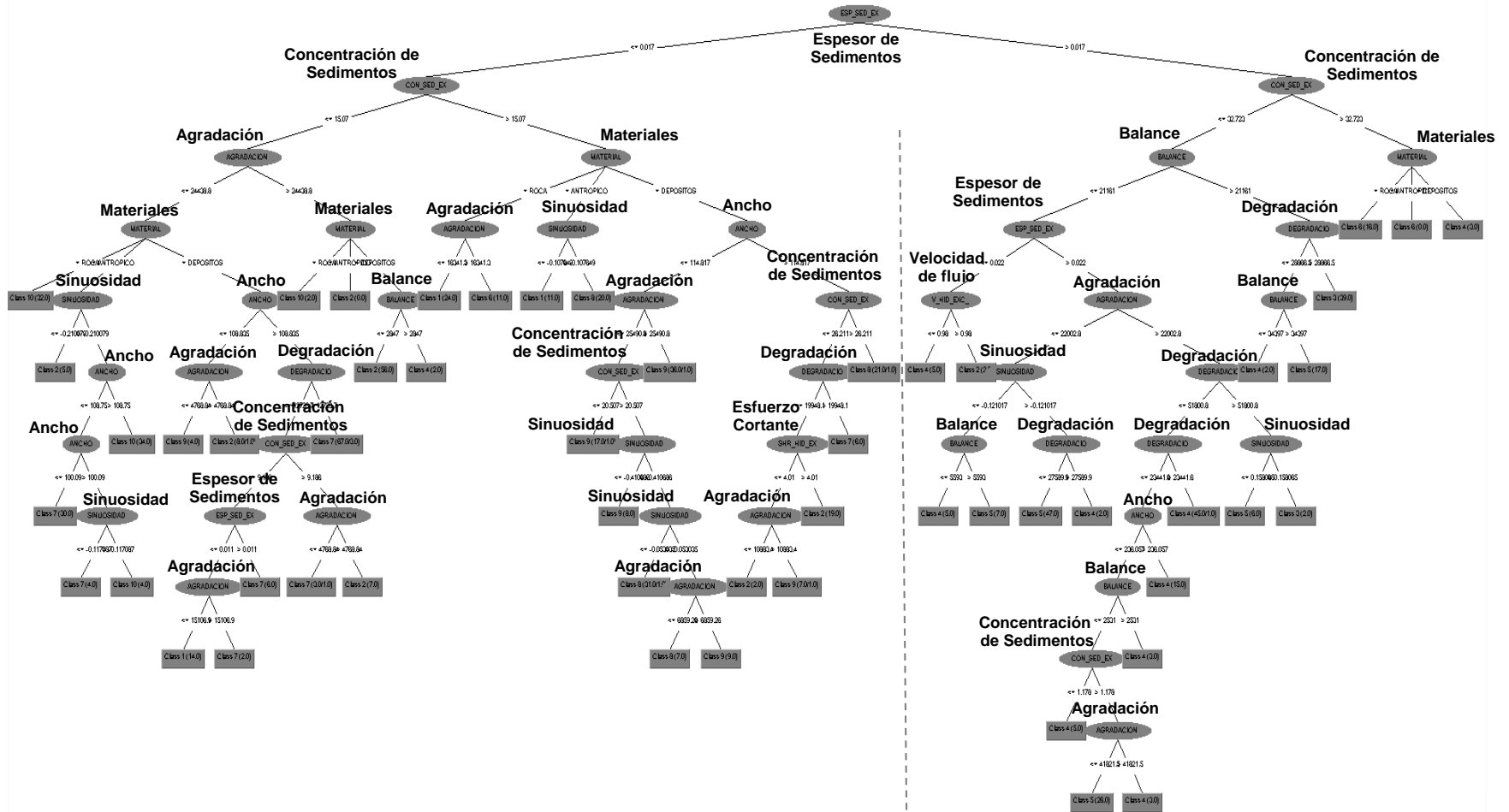
Figura 7-2 Patrones de asignación en el modelo J48



Fuente: Autor – GUI Weka 3.8.1

Las relaciones establecidas en las categorías finales para el sistema fluvial se presentan en el árbol de decisión de relaciones para las variables involucradas (**Figura 7-3**). La definición de las clases inicia en el nodo central con el espesor de sedimentos, con valores menores a 0.017m ó mayores a este espesor.

Figura 7-3 Árbol de decisión agrupaciones del sistema fluvial - Rio Sinú



Fuente: Autor – GUI Weka 3.8.1

En archivo digital adjunto se encuentra el árbol de decisión en tamaño apropiado para la visualización de las categorías.

Las decisiones de agrupación muestran una fuerte influencia por las propiedades de los sedimentos, a partir del primer nodo, intervienen la concentración de sedimentos y los procesos descritos en los movimientos de orillas, agradación, degradación y balance, de manera paralela se evalúan los tipos de materiales a través del flujo del cauce activo. Este comportamiento muestra la manera en cómo se ajusta el paisaje y el comportamiento del río a los proceso formadores, relacionados con el flujo a través del comportamiento propio del sedimento.

Las categorías de respuesta del sistema fluvial y las condiciones que la caracterizan se presentan en la **Tabla 7-1**, indicando las variables estructurales que componen cada agrupamiento. Estas mismas categorías son evaluadas para los dos periodos de comparación del sistema fluvial antes (1975 - 1999) y después (1999 - 2016) de la operación del sistema fluvial.

Tabla 7-1 Categorías de respuesta del sistema fluvial del Rio Sinú

CATEGORIA	VARIBALES PRINCIPALES	DESCRIPCIÓN
Categoría No 1	Materiales predominantes de depósitos. Muy altas tasas de movilidad de orillas. Bajas a muy bajas registros de concentración de sedimentos.	Movilidad muy alta, los procesos de cambio de las orillas, registran los valores medios más altos de tasas anuales para agradación (63852.0 m ² /año), balance (61213.5 m ² /s) y degradación (68629.6 m ² /s). La velocidad (0.6 m/s) y el esfuerzo cortante presentan valores bajos en estas condiciones. Una característica propia de esta categoría son los valores bajos a muy bajos de concentración de sedimentos (2.2 g/l). Los diámetros medios de sedimentos en estas condiciones son altos medios a altos d ₅₀ = 14.2mm.
Categoría No 2	Materiales predominantes de depósitos.	Movilidad alta, de agradación, degradación, resaltando el balance como su mayor tasa anual (39865.8 m ² /año). El ancho promedio de banca se encuentra en 182.9m, con profundidades medias de 2.6 m. La concentración media de sedimentos

CATEGORIA	VARIBALES PRINCIPALES	DESCRIPCIÓN
	<p>Alta tasa de movilidad de orillas.</p> <p>Bajos registros de concentración de sedimentos.</p> <p>Medias profundidades de flujo.</p>	<p>aunque mayor a la anterior categoría, presenta valores bajos en el área de estudio (4.4 g/l). Los diámetros medios de sedimentos incrementan a un valor promedio de 15.8mm.</p>
Categoría No 3	<p>Materiales predominantes de depósitos.</p> <p>Medias tasas de movilidad de orillas.</p> <p>Concentración media de sedimentos en el flujo.</p>	<p>Movilidad media, por procesos de agradación, balance y degradación. Los valores de bancas medias para estas categorías son similares a la anterior (197.6 m). Los valore de profundidad se encuentran en un promedio de 2.4 m y registros de sedimento un poco mayores a los registrados anteriormente $d_{50} = 16.1\text{mm}$. Registros de concentración más elevada a sus dos categorías anteriores con una medida promedio de 13.7 g/l.</p>
Categoría No 4	<p>Materiales predominantes de depósitos.</p> <p>Tasas medias a bajas de movilidad de orillas.</p> <p>Concentración de sedimentos altas a medias. Valores de</p>	<p>Movilidad media a baja, sobre la región de mayor movilidad del área de estudio. Se encuentra asociado al control inicial del embalse sobre el flujo y una condición recta entre las zonas de mayor dinámica del río Sinú. Sin embargo registra procesos de agradación importantes con tasa de 46852 m²/s. Su distinción se realiza por los diámetros medios de sedimento más grandes en el inicio del cauce $d_{50} = 28.2\text{ mm}$ y concentraciones iniciales de 74.1 g/l. Por su parte en la sección que</p>

CATEGORIA	VARIBALES PRINCIPALES	DESCRIPCIÓN
	diámetro de sedimento altos.	se presenta esta categoría aguas abajo entre alta movilidad se caracteriza por una profundidad de 2.5 m, $d_{50} = 13.1$ mm y concentraciones altas de 46.9 g/l, esto es posible a velocidades medias a altas con 1.2 m/s.
Categoría No 5	Materiales de roca y antrópicos con secuencias intermedias de depósitos. Baja dinámica de orillas y sinuosidad. Alta profundidad en el cauce activo.	Su respuesta es de control fuerte en el flujo, con los menores cambios a través del análisis multitemporal de sus orillas y cambios en sinuosidad. Sus registros no presentan balance en sus procesos. Su principal característica son espesores bajos de sedimentos activos, bajo a muy bajo diámetro medio, $d_{50} = 1.37$ mm, con correlación por registros de esfuerzo cortante bajos en su flujo. Como segunda propiedad intrínseca los valores de profundidad en el cauce son altos con un valor medio de 4.64m. Su principal representación se encuentra en el control de flujo del centro poblado de Lorica.
Categoría No 6	Materiales de Roca y Depósitos. Sedimentos bajos (d_{50} , d_{90}). Profundidad media elevada.	Su mayor respuesta es al control estructural debido a la presencia de materiales rocosos en el flujo del río. Los procesos de movimientos de orillas se encuentran restringidos por esta condición. Los valores de ancho de banca se encuentran reducidos con respecto a los demás del área de estudio. Los sedimentos presentan diámetros medios bajos con valores de 4.22mm. En esta categoría se encuentran secciones con baja movilidad de orillas y valores de bajos de sedimentos entre 1.87mm (d_{50}), asociados a

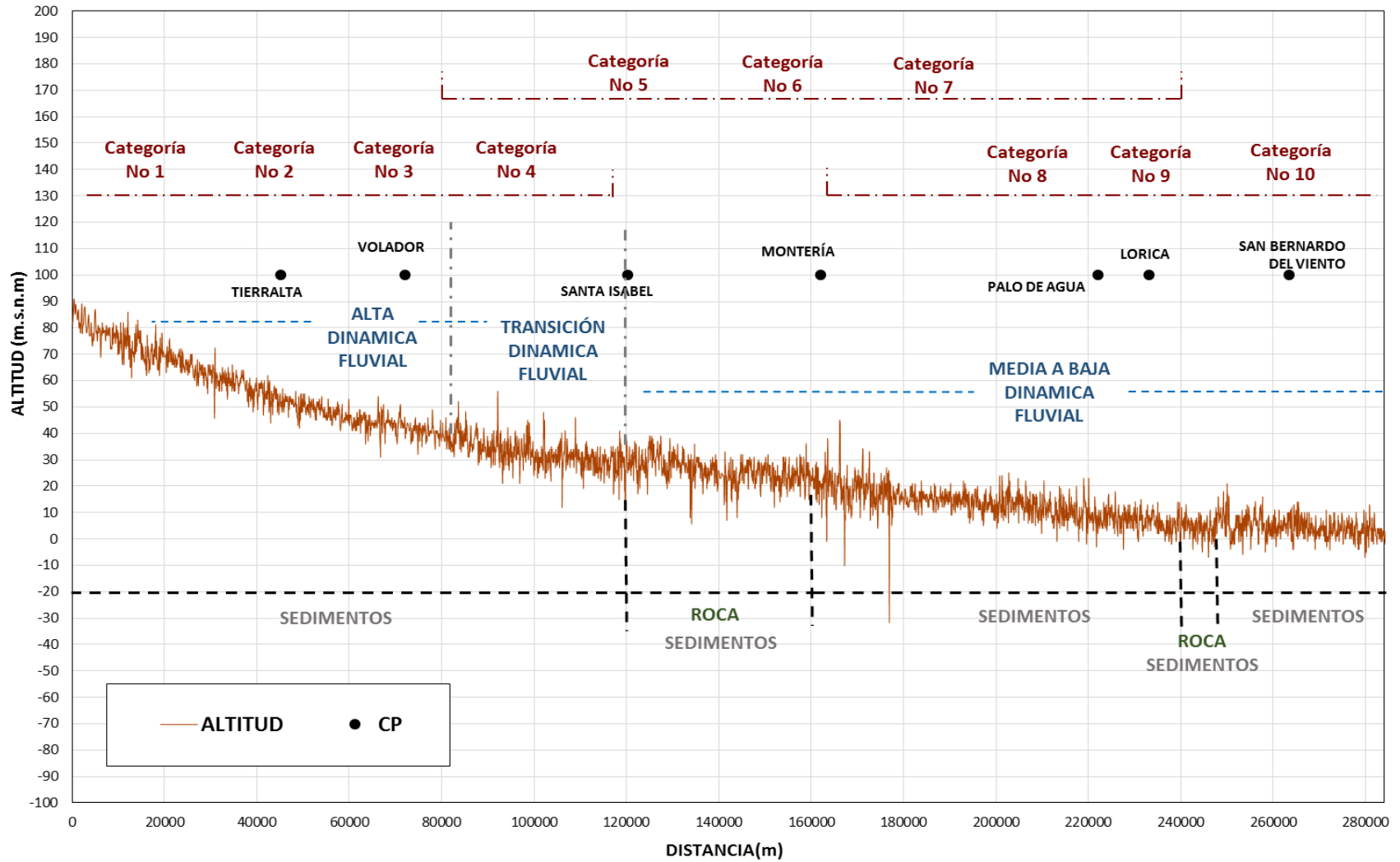
CATEGORIA	VARIBALES PRINCIPALES	DESCRIPCIÓN
		materiales de depósitos, con formación de diques aluviales, que garanticen su restricción en la movilidad, esta particularidad registra mayores profundidades (4.6m en promedio), coherentes con esta condición.
Categoría No 7	Materiales Antrópicos y Depósitos. Diámetros medios de sedimento bajos (d50 y d 90). Velocidad media a baja del rio.	El flujo se encuentra controlado, con poca movilidad de orillas, asociado a una ausencia total del proceso de balance en su movimiento. Se presenta sobre áreas urbanas (depósitos antrópicos), con baja pendiente y velocidades medias. Los diámetros medios de sedimentos son bajos con d50 de 3.2mm. Se podría definir como un segundo grado de control después de la categoría anterior. Este comportamiento también se evidencia sobre condiciones intermedias o de transición entre zonas del lecho de vegas de divagación estrecho o restringido a lóbulos y aperturas medianas de este lecho de divagación, con presencia de pequeñas zonas urbanas en su recorrido.
Categoría No 8	Materiales de depósito. Control fluviolacustre. Profundidades altas, diámetros de sedimentos bajos.	Representa baja movilidad del cauce activo, con profundidades altas a muy altas en un promedio de 4.8m, asociado principalmente a zonas de transición de sedimentos a zonas rocosas y de control en la sección media a baja del área de estudio, con reducida movilidad por su relación con las llanuras de inundación y sus diques aluviales. El diámetro medio de sedimento es bajo a muy bajo con d50 = 1.9mm

CATEGORIA	VARIBALES PRINCIPALES	DESCRIPCIÓN
Categoría No 9	Materiales de depósito. Control fluvioacustre. Profundidades altas, bajos diámetros de sedimento. Picos altos de concentración de sedimentos.	Al igual que la categoría anterior se concentra sobre condiciones del río estables en recorridos sobre materiales de depósito. Profundidades medias altas para el flujo del río con 4.08m y se destaca por magnitudes puntuales de concentración de sedimentos altas para el total del área de estudio con meda de 55.05 g/l. Esto se encuentra relacionado con esfuerzos cortantes altos y mayores velocidades (1.04 m/s) a la categoría anterior en la sección baja del área de estudio.
Categoría No 10	Materiales de depósito. Control fluvioacustre. Profundidades altas, bajos diámetros de sedimento. Anchos de banca bajos a muy bajos.	Manifiesta el último grado en el control fluvioacustre y depósitos del cauce activo. Con movilidad reducida de sus orillas, al igual que sus dos categorías anteriores su velocidad media es media a alta (0.9 m/s) igual que su profundidad (3.8 m). Su punto relevante en la identificación, es el mayor estrecho de sus bancas (media de 108m). Muy ligada a la continua tendencia del segundo tramo, de menor movilidad identificado para el área de estudio, a partir de la ciudad de Montería hasta la formación deltaica del río Sinú, con las categorías 7, 8 y 9.

Fuente: Autor

Las categorías identificadas a través de la relación multiescalar de las variables estudiadas, responden de manera simultánea a los tramos o secciones identificadas a través de la descripción de las variables del sistema (Ver, capítulos anteriores). En la **Figura 7-4** Se esquematizan la distribución de las categorías finales a través del río Sinú asociado su respuesta en la dinámica propia del río y su distribución de materiales.

Figura 7-4 Conceptualización final del sistema fluvial y sus categorías de respuesta

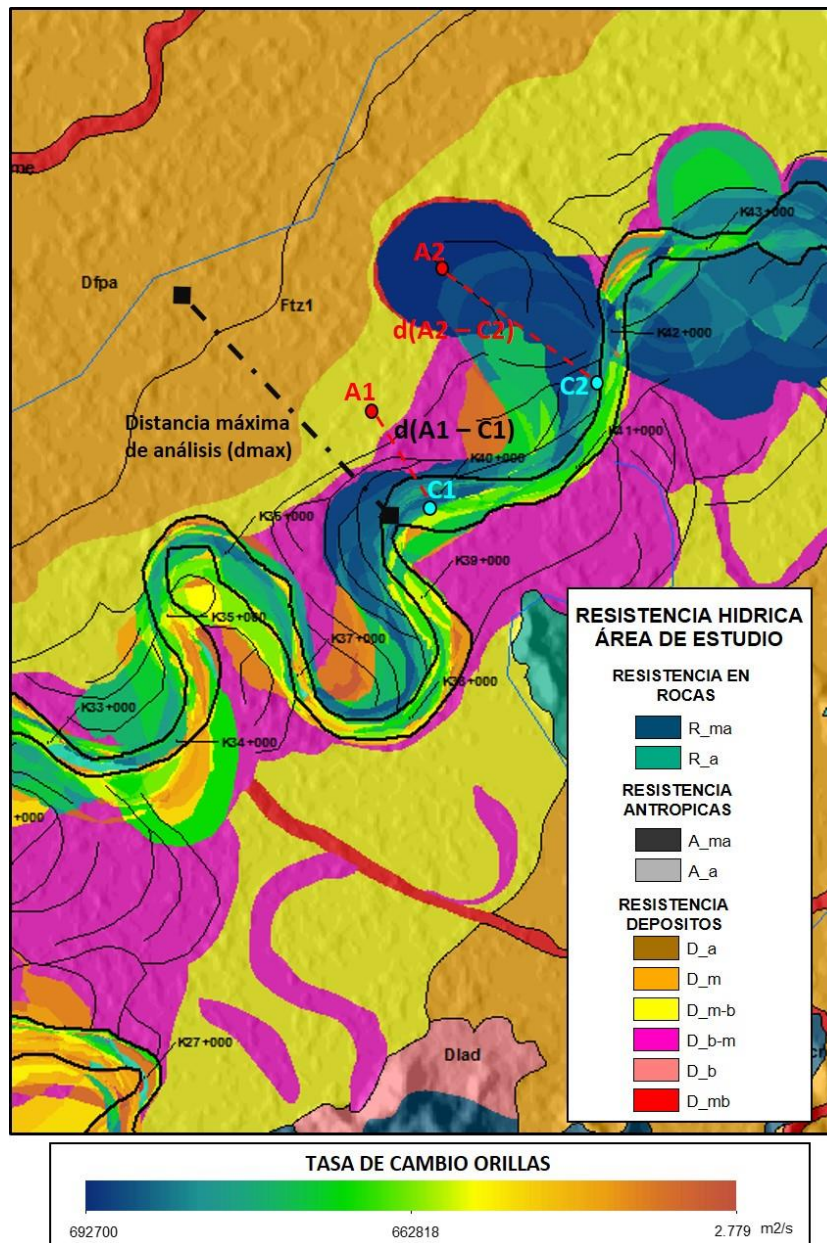


Fuente: Autor

7.3 Integración espacial de las categorías de respuesta del sistema fluvial

En la **Figura 7-5** se presenta la forma de asignación a la clase fluvial característica en función de su distancia y sus características.

Figura 7-5 Asignación por distancias y características de resistencia o dinámica



Fuente: Autor

La distribución espacial de las categorías y respuestas del sistema fluvial se relacionan a partir del modelo central desarrollado en el cauce activo y se expande a través de las unidades de Resistencia y Dinámica Fluvial.

Esto a través de la función lineal de pertenencia por distancia a la zona tipo característica, la función de pertenencia a la categoría de respuesta se encuentra influenciada por el tipo de resistencia o dinámica encontrada.

Las características propias del sistema fluvial influyen sobre la distancia a la clase más cercana identificada, a partir de su posición. Diferenciado por encontrarse situado en el alcance de la dinámica fluvial analizada (tasa de cambio de orillas multitemporal) o fuera de este por la resistencia hídrica fluvial. En la **Tabla 7-2** se presenta la formula general de pertenencia basado en la distancia máxima elegida para su evaluación y el orden de decisión he influencia sobre la distancia de pertenencia.

Tabla 7-2 Formulación de pertenencia espacial

DECISIÓN DE PERTENENCIA	FORMULACIÓN	DESCRIPCIÓN
Función de pertenencia lineal general.	$P = -\frac{d}{d_{max}} + 1$	<i>Donde:</i> <i>P</i> = Pertenencia a la clase más cercana encontrada.
		<i>d</i> = distancia del punto evaluado al punto clasificado (Ver Figura 7-5 d(A1 – C1) y d(A2 – C2))
		<i>d_{max}</i> = Distancia máxima seleccionada para el análisis, correspondiente al sistema fluvial (Ver Figura 7-5 <i>d_{max}</i>).

DECISIÓN DE PERTENENCIA	FORMULACIÓN	DESCRIPCIÓN
<p>Cuando el punto a evaluar se encuentra al alcance de la dinámica fluvial (tasa de cambio de orillas).</p>	$df = \frac{dfi}{dfmax}$ <ul style="list-style-type: none"> • Si $df > P$ $P = df$ • Si $df \leq P$ $P = P$ 	<p><i>Donde:</i> df = índice de la tasa anual multianual. dfi = Tasa anual de cambio multianual en el punto estimado. $dfmax$ = Tasa anual de cambio multianual máximo en el análisis.</p>
<p>Cuando el punto a evaluar se encuentra fuera del alcance de la dinámica fluvial (tasa de cambio de orillas). Se evalúa a partir de la resistencia hídrica fluvial.</p>	$d = d * Res$ <p>Resistencia Depósitos</p> <p>D_a = 1.0 D_m = 0.8 D_m-b = 0.75 D_b-m = 0.7 D_b = 0.6 D_mb = 0.01</p> <p>Resistencia Roca</p> <p>R_ma = 1.0 R_a = 1.0</p> <p>Resistencia Material Antrópico</p> <p>A_ma = 0.95 A_a = 0.9</p>	<p><i>Donde:</i> Res = Valor de influencia por clase de depósito identificado en el área de estudio.</p>

Fuente: Autor

7.4 Comportamiento del sistema fluvial del río Sinú, periodo 1945 - 1999 - 2016

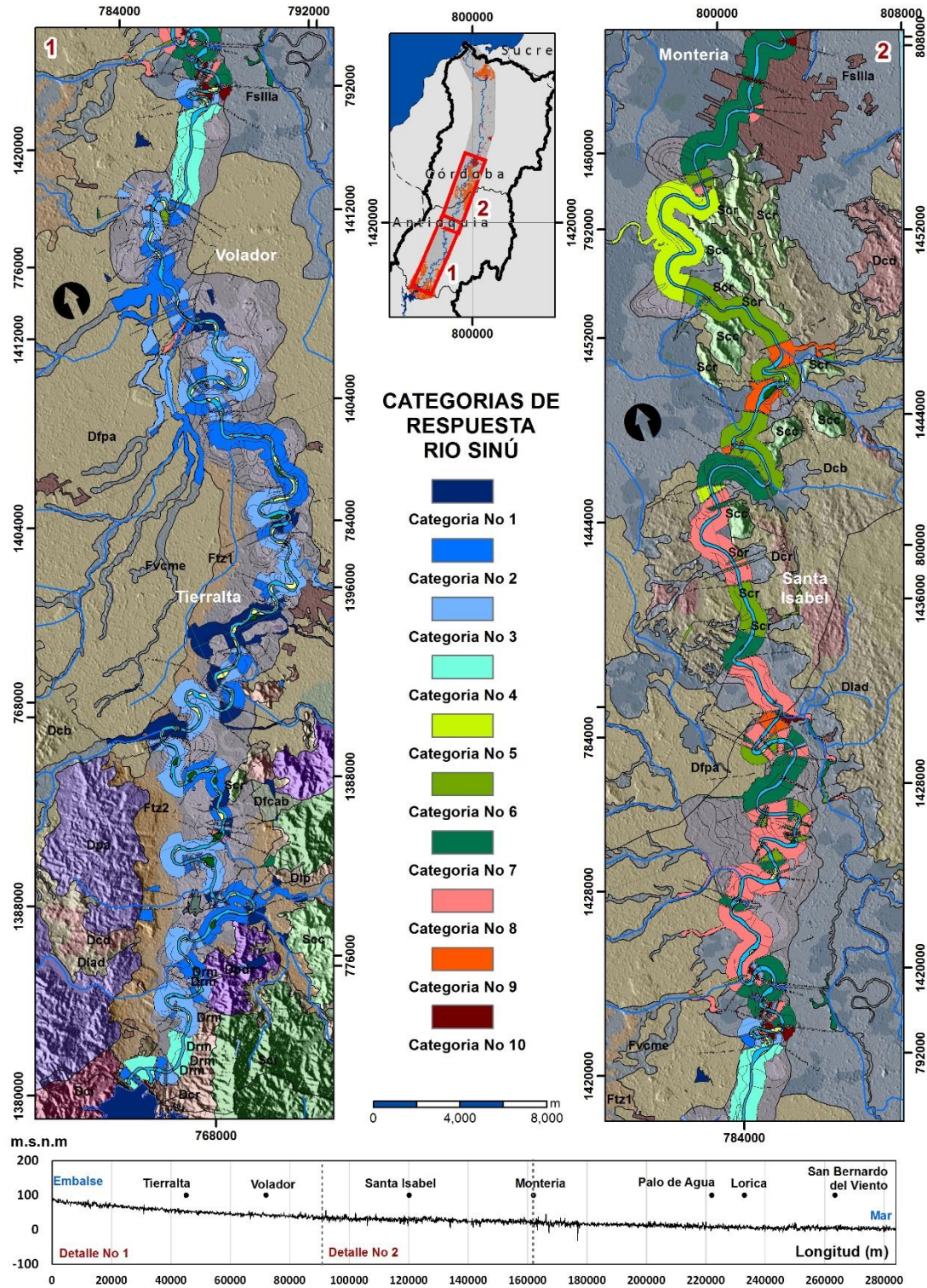
EL resultado final para los periodos analizados en el río Sinú, se acompañan de cartografía final temática (anexos de la investigación). Las unidades identificadas sobre el cauce activo del río Sinú recogen la variabilidad propia de las condiciones de flujo locales, los regímenes de movimiento a nivel medio y los controles o facilidades estructurales del ambiente litológico estudiado.

A través de esta investigación se caracterizó este periodo por su alta dinámica fluvial, debido a los registros de agradación, degradación, balance y sinuosidad constantes. Se describieron mayores velocidades y flujos más altos como era de esperar por la no intervención del embalse. El comportamiento espacial de las clases identificadas como respuesta del sistema fluvial del río Sinú en el periodo 1945 - 1999 se presenta en la **Figura 7-6** para la parte de mayor movilidad (con colores azules según el grado de su movilidad) y la sección de transición identificada a partir de las llanuras de inundación (combinación de las categorías 5, 6 y 7 representantes de estabilidad), en esta misma representación se observan las primeras condiciones de roca (colores verdes) con sus altos niveles de estabilidad y control en el flujo del río Sinú.

En la **Figura 7-7** se presentan los resultados de las respuestas para el río Sinú en el contexto temporal de 1945 a 1999 para la sección de estabilidad por depósitos a partir de la ciudad de Montería, el color naranja que prevalece sobre esta sección indica el control para la llanura de inundación y la baja estabilidad debido a los depósitos y diques aluviales. Se encuentra intercalado por varias unidades de control, que varían entre ellos por el grado de profundidad del flujo, hasta encontrar de nuevo el último material rocoso asociado al centro poblado de la ciudad de Lórica. La baja movilidad después de Lórica se relaciona a depósitos estables, identificados durante el análisis multitemporal.

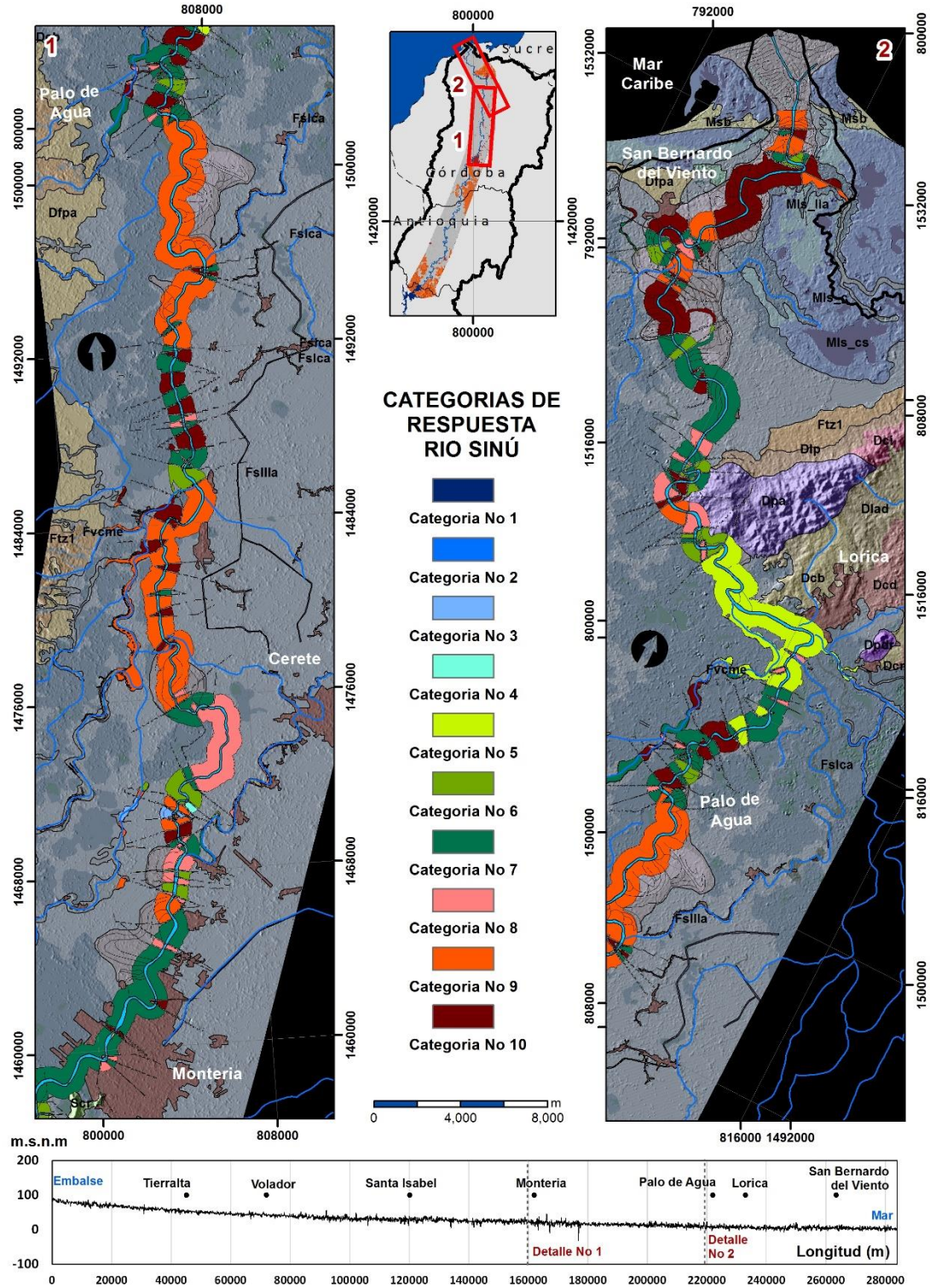
Cuando se evaluó las condiciones a partir de la operación del embalse las categorías responden espacialmente con cambios más evidentes en los procesos, más fuertes, por ejemplo en la alta sinuosidad cerca de Tierralta se reducen los lobulos que se exponían en

Figura 7-6 Comportamiento del sistema fluvial del río Sinú 1945 – 1999. Sección de alta dinámica, transición fluvial y materiales rocosos.



Fuente: Autor

Figura 7-7 Comportamiento del sistema fluvial del río Sinú 1945 – 1999. Sección estable de depósitos, formación rocosa y delta.



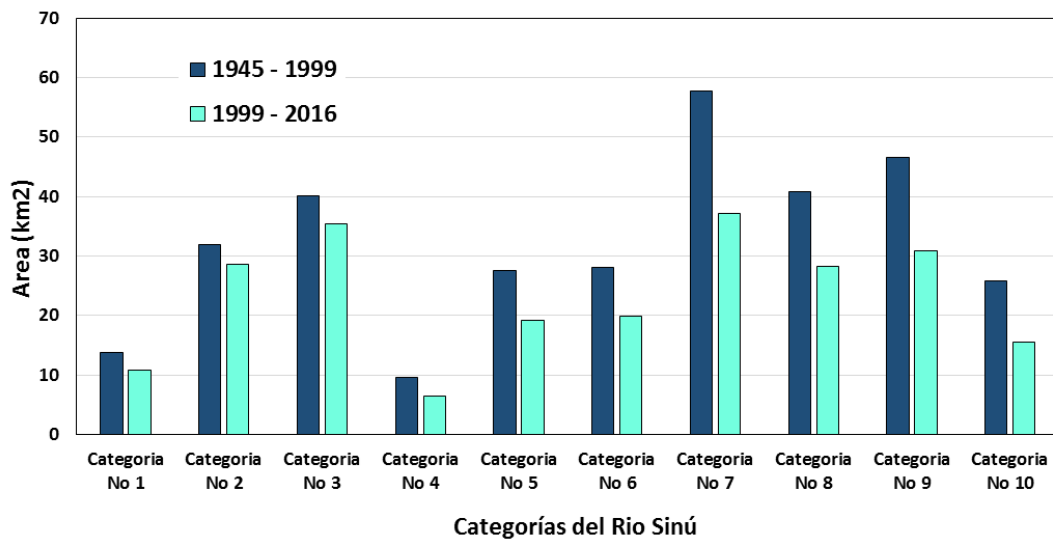
Fuente: Autor

condiciones de mayor movilidad. Por otra parte se obtiene una significativa reducción del alcance probable de afectación de las condiciones de la categoría, con una notable tendencia a reducir y a estabilizar el sistema fluvial.

En la **Figura 7-9** y **Figura 7-10** se esquematiza la valoración para el periodo de 1999 a 2016, donde la estabilidad es predominante en el sistema. Sin embargo se observan cambios sobre lóbulos que reaparecen sobre el centro poblado de volador, con categorías de muy alta dinámica, procesos aislados como respuesta a las descargas del embalse. En la sección de transición donde disminuyen los valores en las variables de sedimento se observa con mayor simpleza la disminución del grosor y alcance de la categoría de manera espacial, asociado directamente a la estabilidad que inicia el río Sinú.

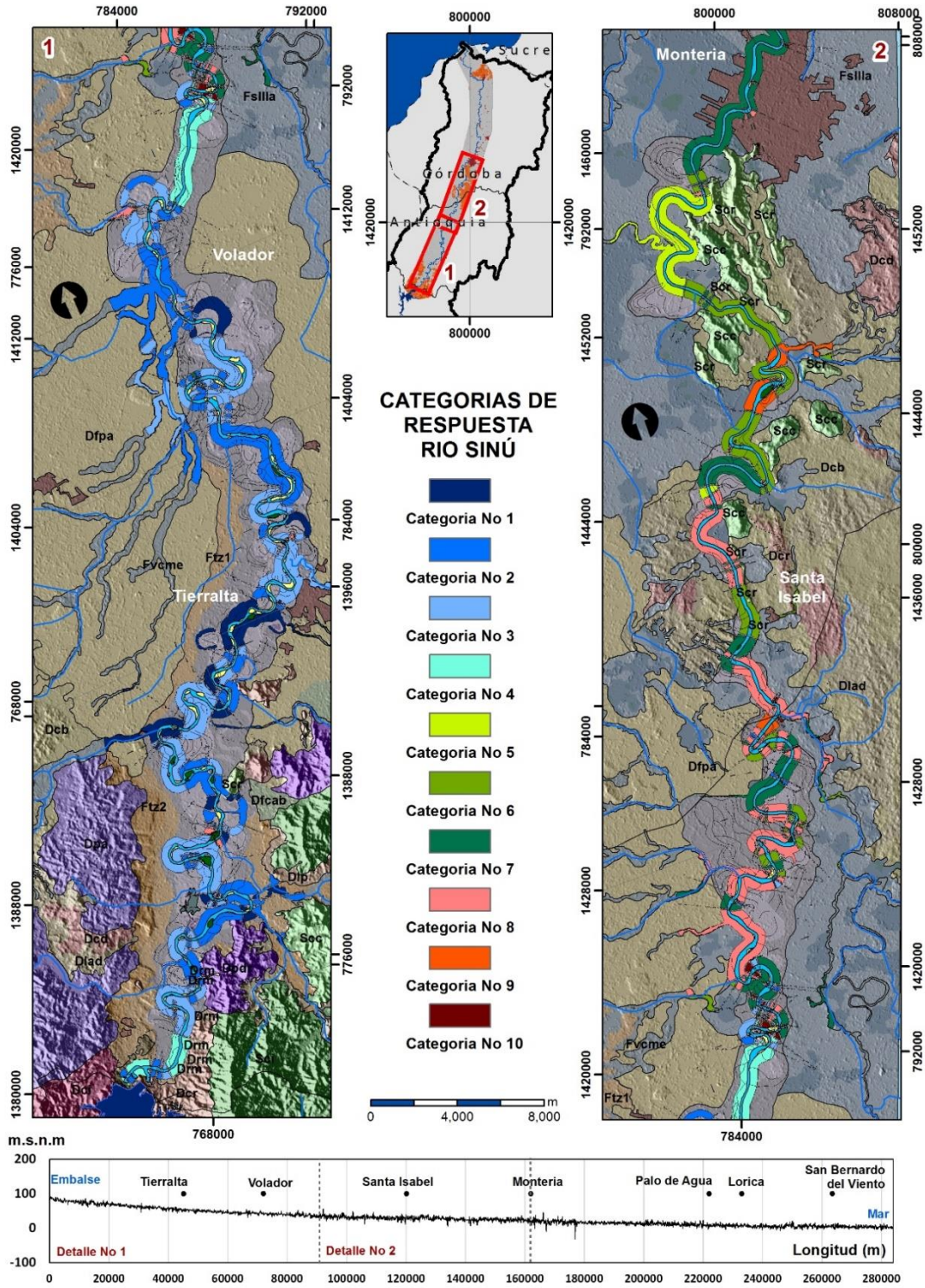
Los patrones de estabilidad se mantienen claramente a través de todo el sistema, resultado coherente para el funcionamiento del embalse y la regulación de los picos de más cambio en el sistema natural del río Sinú. Sin embargo la reducción en los alcances de las categorías se pueden definir en función de sus superficies, **Figura 7-8** Los análisis permiten identificar los efectos de las corrientes que ingresan al río Sinú, llevando su alcance de acción hasta dichas corrientes.

Figura 7-8 Dinámica y cambios entre periodos evaluados



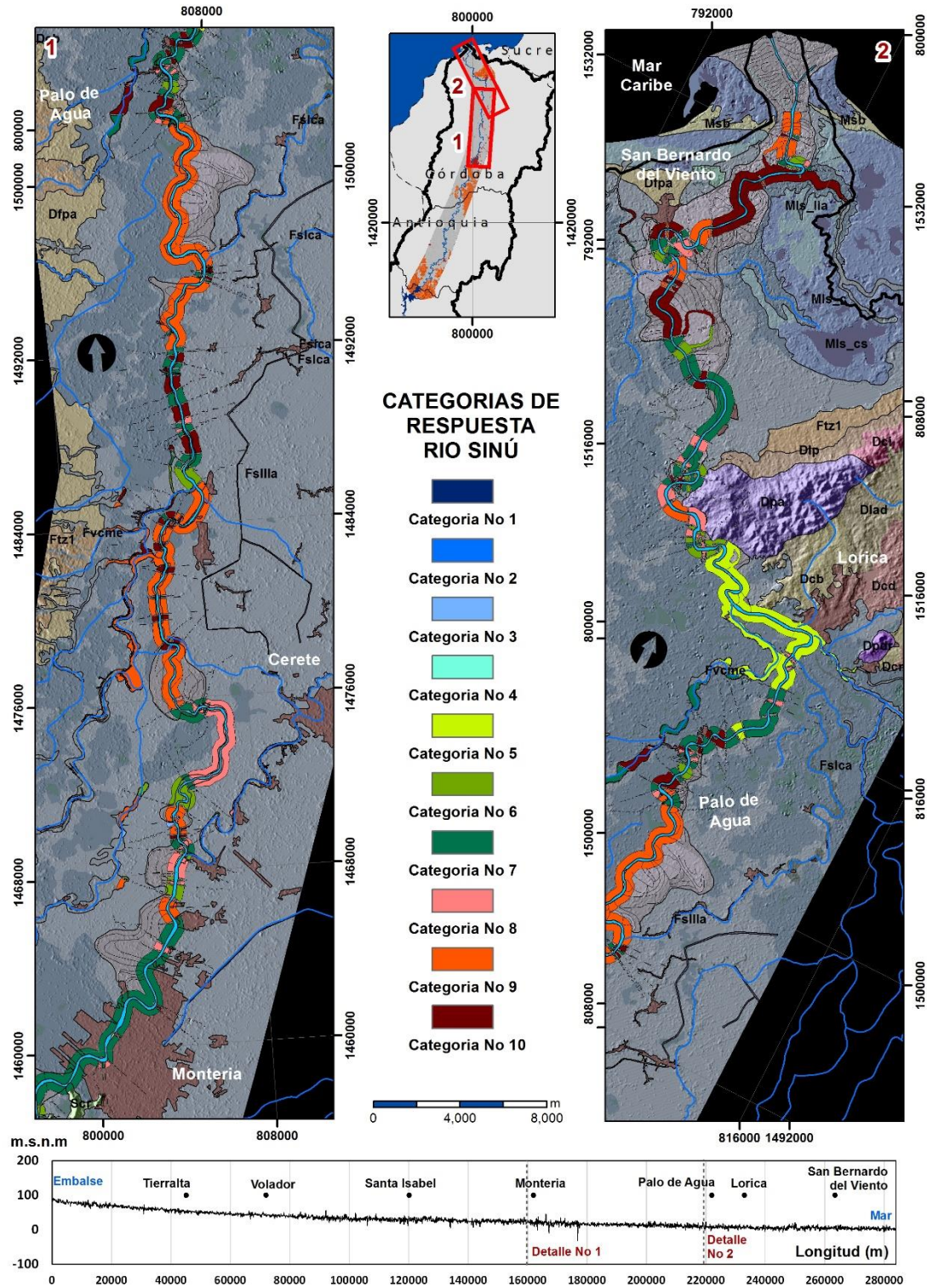
Fuente: Autor

Figura 7-9 Comportamiento del sistema fluvial del río Sinú 1999 – 2016. Sección de alta dinámica, transición fluvial y materiales rocosos.



Fuente: Autor

Figura 7-10 Comportamiento del sistema fluvial del río Sinú 1999 – 2016. Sección estable de depósitos, formación rocosa y delta.



Fuente: Autor