



Universidad Europea

MÁSTER EN DISEÑO URBANO Y MOVILIDAD SOSTENIBLE

Bordes Activos. Tipologías de mobiliario urbano para la contención hídrica y recuperación socioambiental de quebradas. Laboratorio de diseño en Santa Elena, Medellín.

Trabajo final Master

Elaboró: Laura Fernanda Triana Camacho

Dirigido por: Rubén Servando Carrillo

12 marzo de 2025

UNIVERSIDAD EUROPEA
Madrid - Bogotá

RESUMEN

Este Trabajo Fin de Máster aborda la urgente necesidad de replantear la relación entre el desarrollo urbano y los sistemas hídricos en la ciudad de Medellín, Colombia. Históricamente, las quebradas han sufrido procesos de degradación, erosión y contaminación debido a la urbanización descontrolada y a la implementación de infraestructuras grises que desconectan a la comunidad de su entorno natural. Es por ello que, para revertir esta alta tensión socioambiental, el presente proyecto propone un cambio de paradigma en el diseño de los límites urbanos: pasar de la canalización tradicional a la configuración de "Bordes Activos".

En ese sentido, utilizando la Quebrada Santa Elena como laboratorio de diseño urbano, se plantea el desarrollo de tipologías de mobiliario urbano multifuncional que operen simultáneamente como infraestructura verde-azul. Por lo tanto, el objetivo central es diseñar elementos espaciales que guíen y contengan el flujo hídrico —mitigando riesgos de desbordamiento y estabilizando taludes— generando al mismo tiempo áreas de espacio público habitables, integrando sistemas de recolección de residuos para el saneamiento ambiental.

Mediante una metodología con enfoque en diseño urbano y táctico, que abarca el análisis morfológico del cauce natural, la ideación paramétrica de los módulos y la evaluación teórica de su adaptabilidad espacial y respuesta hidrodinámica, se busca validar la viabilidad de la propuesta. Las conclusiones esperadas apuntan a que el diseño de mobiliario como sistema de contención hídrica tiene el potencial no solo de transformar la Quebrada Santa Elena en un atractor resiliente e inclusivo, sino de consolidarse como un modelo escalable y replicable para los más de 120 afluentes de Medellín.

Palabras clave: Bordes activos, Mobiliario urbano, Contención hídrica, Infraestructura verde-azul, Diseño urbano-paisajístico, Quebrada Santa Elena.

ABSTRACT

This Master's Thesis addresses the urgent need to rethink the relationship between urban development and water systems in Medellín, Colombia. Historically, the city's streams (*quebradas*) have suffered from degradation, erosion, and pollution due to uncontrolled urbanization and the implementation of gray infrastructure that disconnects the community from its natural environment. To reverse this high socio-environmental tension, this project proposes a paradigm shift in the design of urban boundaries: moving from traditional channelization to the configuration of "**Active Edges**" (*Bordes Activos*).

Using the Santa Elena Stream as an urban design laboratory, the project proposes the development of multifunctional urban furniture typologies that simultaneously function as green-blue infrastructure. The central objective is to design spatial elements that guide and contain water flow—mitigating overflow risks and stabilizing slopes—while creating habitable public spaces and integrating waste collection systems for environmental sanitation.

Through a methodology focused on urban and tactical design—incorporating morphological analysis of the natural watercourse, parametric ideation of modules, and theoretical evaluation of spatial adaptability and hydrodynamic response—the study aims to validate the proposal's viability. The expected conclusions suggest that designing furniture as a water containment system has the potential not only to transform the Santa Elena Stream into a resilient and inclusive attractor but also to become a scalable and replicable model for Medellín's more than 120 tributaries.

Keywords: Active edges, Urban furniture, Water containment, Green-blue infrastructure, Urban-landscape design, Santa Elena Stream.

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi más sincero agradecimiento a todas las personas que hicieron posible la realización de esta tesis. A mi director de investigación por su orientación, apoyo y valiosas recomendaciones a lo largo de este proceso. A los docentes del programa master por compartir sus conocimientos y contribuir a mi formación académica. Asimismo, agradezco profundamente a mi familia y amigos por su constante apoyo, comprensión y motivación durante esta etapa. Finalmente, a todas las personas que, de una u otra manera, aportaron a la culminación de este trabajo.

"La vida urbana no ocurre en el centro de los espacios vacíos, ocurre en los bordes. Si los bordes son ciegos y duros, el espacio muere; si los bordes son suaves, activos y habitables, el espacio cobra vida." — Jan Gehl, Ciudades para la gente (2014).

Contenido

RESUMEN	2
ABSTRACT	3
Contenido	6
Índice de Ilustraciones	7
Índice de Tablas.....	10
Capítulo 1. ANTECEDENTES / ESTADO DEL ARTE	11
1.1 Introducción.....	11
1.2 Estado del arte y marco teórico.....	14
1.3 Contexto y justificación.....	16
1.4 Planteamiento del problema	18
Capítulo 2. OBJETIVOS.....	20
2.1 Objetivos generales, hipótesis y metodología.....	20
2.2 Objetivos específicos	20
2.3 Beneficios del proyecto	21
Capítulo 3. DESARROLLO DEL PROYECTO	24
3.1 Planificación del proyecto.....	24
3.2 Descripción de la solución, metodologías y herramientas empleadas.....	25
3.3 Recursos requeridos	31
3.4 Presupuesto	32
3.5 Viabilidad	33
3.6 Resultados del proyecto	35
Capítulo 4. DISCUSIÓN.....	47
Capítulo 5. CONCLUSIONES	49
5.1 Conclusiones del trabajo.....	49
5.2 Conclusiones personales.....	49
Capítulo 6. FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO	51
Capítulo 7. REFERENCIAS.....	53
Capítulo 8. ANEXOS	55

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1 Localización Antioquia en Mapa de Colombia y localización Medellín en mapa de Antioquia, fuente elaboración propia.....	11
Ilustración 2. Elevación nacimiento y desembocadura Quebrada Santa Elena, fuente elaboración propia.	12
Ilustración 3 Quebradas aledañas al Río Aburrá-Medellín, Fuente Elaboración propia.....	13
Ilustración 4 Zona canalizada actual Quebrada Santa Elena (Q10) antes de desembocar al Río Aburrá-Medellín, Vs Propuesta de Diseño, Fuente elaboración propia herramienta photoshop	15
Ilustración 5 Línea del tiempo Quebrada Santa Elena, fuente elaboración propia herramienta corel draw	16
Ilustración 6 Puntos críticos Quebrada Santa Elena, fuente elaboración propia herramienta photoshop	17
Ilustración 7 Grafico Inestabilidad de Talud, fuente elaboración propia modelo archicad, postproducción corel draw	19
Ilustración 8 Bordes Críticos, fuente elaboración propia archicad, postproducción corel draw.....	19
Ilustración 9 Render Zona 2 Laboratorio Quebrada Santa Elena, Fuente: Elaboración propia. Renderizado en Lumion con postprocesamiento de escalas humanas mediante relleno generativo (IA).....	21
Ilustración 10 Zonas Proyecto- Laboratorio 1, Fuente: Elaboración propia a partir de modelado en Archicad, con posprocesamiento y mejora gráfica asistida por Inteligencia Artificial Gemini/Photoshop AI.....	22
Ilustración 11 Trampa recolección basuras, Fuente: Elaboración propia a partir de modelado en Archicad, con posprocesamiento y mejora gráfica asistida por Inteligencia Artificial Gemini/Photoshop AI.....	23
Ilustración 12 Esquema funcionamiento Tipología A, Fuente: Elaboración propia a partir de modelado en Archicad, con posprocesamiento y mejora gráfica asistida por Inteligencia Artificial Gemini/Photoshop AI.....	26
Ilustración 13 Esquema funcionamiento Tipología B, Fuente: Elaboración propia a partir de modelado en Archicad, con posprocesamiento y mejora gráfica asistida por Inteligencia Artificial Gemini/Photoshop AI.....	27
Ilustración 14 Esquema funcionamiento Tipología C, Fuente: Elaboración propia a partir de modelado en Archicad, con posprocesamiento y mejora gráfica asistida por Inteligencia Artificial Gemini/Photoshop AI.....	28

Ilustración 15 Interrelación de Tipologías, Fuente: Elaboración propia a partir de modelado en Archicad, con posprocesamiento y mejora gráfica asistida por Inteligencia Artificial Gemini/Photoshop AI.....	29
Ilustración 16 Representación Tridimensional del Relieve zona 1 y zona 2, fuente Elaboración propia	30
Ilustración 17 Representación Tridimensional zona 1, fuente Elaboración propia mediante herramienta Archicad.....	30
Ilustración 18 Representación Tridimensional zona 2, fuente Elaboración propia mediante herramienta Archicad.....	30
Ilustración 19 Zonificación puntos Laboratorio Quebrada Santa Elena, Fuente elaboración propia	35
Ilustración 20 Registro fotográfico Sector 1, fuente Google earth pro imágenes septiembre 2025	36
Ilustración 21 Niveles de riesgo Rio y Quebradas. fuente: Siata (Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá).....	37
Ilustración 22 Serie de tiempo y sección transversal 537 Q. Santa Elena - Plaza Minorista fuente: Siata (Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá) https://siata.gov.co/siata_nuevo/	37
Ilustración 23 Registro fotográfico Sector 2, fuente Google earth pro imágenes septiembre 2025	39
Ilustración 24 Serie de tiempo y sección transversal 858 Q. Santa Elena – La Paz fuente: Siata (Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá) https://siata.gov.co/siata_nuevo/	39
Ilustración 25 Esquema diseño Tipología A, fuente elaboración propia mediante herramientas archicad y postproducción Photoshop y corel draw	41
Ilustración 26 Esquema diseño Tipología B, fuente elaboración propia.....	41
Ilustración 27 Esquema diseño Tipología B, fuente elaboración propia.....	42
Ilustración 28 Vista planta Zona 1 Quebrada Santa Elena, Fuente: Elaboración propia. Renderizado en Lumion con postprocesamiento iluminación photoshop	44
Ilustración 29 Vista planta Zona 2 Quebrada Santa Elena, Fuente: Elaboración propia. Renderizado en Lumion con postprocesamiento iluminación photoshop	44
Ilustración 30 Visualización 3D- Zona 1, Fuente: Elaboración propia. Renderizado en Lumion con postprocesamiento de escalas humanas mediante relleno generativo (IA).....	45
Ilustración 31 Visualización 3D- Zona 1, Fuente: Elaboración propia. Renderizado en Lumion con postprocesamiento iluminación photoshop	45

Ilustración 32 Visualización 3D- Zona 2, Fuente: Elaboración propia. Renderizado en Lumion con postprocesamiento de escalas humanas mediante relleno generativo (IA)..... 46

Ilustración 33 Visualización 3D- Zona 2, Fuente: Elaboración propia. Renderizado en Lumion con postprocesamiento de escalas humanas mediante relleno generativo (IA)..... 46

Índice de Tablas

Tabla 1 Cronograma Actividades, Fuente: Elaboración propia mediante el procesamiento de datos en Microsoft Excel.	24
Tabla 2 Presupuesto Diseño y formulación del Proyecto	32

Capítulo 1. ANTECEDENTES / ESTADO DEL ARTE

1.1 Introducción

El departamento de Antioquia, situado en la región noroccidental de Colombia, se caracteriza por un relieve mayormente montañoso, atravesado por las cordilleras Central y Occidental de los Andes. En medio de esta compleja orografía se encuentra el Valle de Aburrá, un estrecho cañón que alberga a la ciudad de Medellín y su área metropolitana. La topografía de la ciudad, cuyas altitudes varían desde los 1.500 m s. n. m. en el valle hasta los 2.650 m s. n. m. en corregimientos como Santa Elena, ha condicionado históricamente su desarrollo urbano, su clima y, de manera crítica, su relación con el agua.

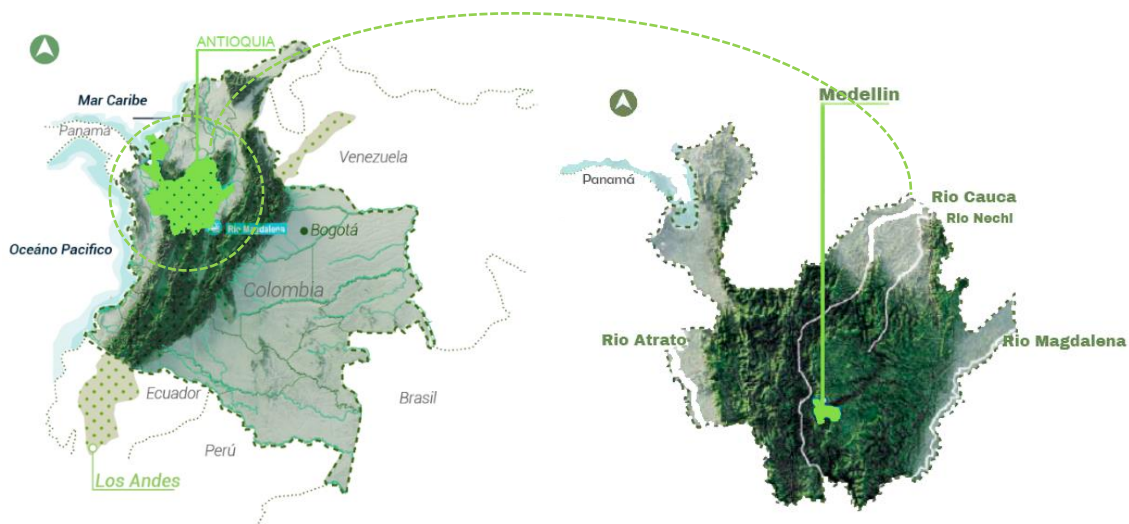


Ilustración 1 Localización Antioquia en Mapa de Colombia y localización Medellin en mapa de Antioquia, fuente elaboración propia.

Medellín es un territorio surcado por una densa red hidrográfica compuesta por más de 120 quebradas que descienden hacia el río Medellín. Durante décadas, el rápido y desordenado crecimiento de la ciudad ha tratado a estos afluentes como obstáculos o sistemas de evacuación, recurriendo a infraestructuras grises y recubrimientos que han alterado la morfología natural de los cauces (González Reynoso et al., 2010), incrementando la exposición a inundaciones súbitas, erosión y desbordamientos.



Ilustración 2. Elevación nacimiento y desembocadura Quebrada Santa Elena, fuente elaboración propia.

En este contexto metropolitano, la Quebrada Santa Elena emerge como uno de los sistemas hídricos más representativos y estratégicos de la ciudad. Nacida en el corregimiento que lleva su mismo nombre, este corredor ecológico e histórico desciende conectando los paisajes rurales con la complejidad urbana de Medellín. Históricamente, fue un eje articulador vital alrededor del cual se consolidaron los primeros barrios obreros e infraestructuras; sin embargo, hoy en día es el reflejo de una alta tensión socioambiental. La quebrada se encuentra fragmentada, altamente contaminada y sus bordes representan un riesgo constante, evidenciando una profunda desconexión entre la ciudadanía y patrimonio ecosistémico fluvial (Hernández-Tapia, 2017).

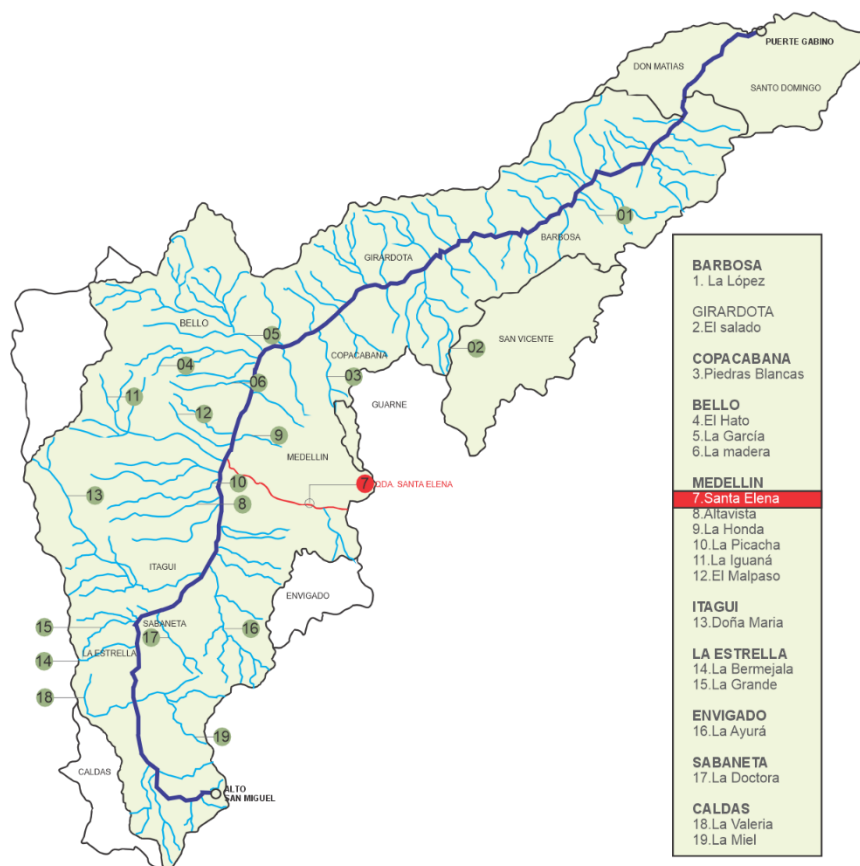


Ilustración 3 Quebradas aledañas al Río Aburrá-Medellín, Fuente Elaboración propia

Ante este escenario de vulnerabilidad que ejemplifica la Quebrada Santa Elena, resulta imperativo replantear las estrategias de gestión del riesgo y diseño del espacio público. El presente Trabajo Fin de Máster propone un cambio de paradigma frente a la canalización tradicional: en lugar de segregar el cuerpo de agua mediante muros de contención ciegos, se plantea el diseño de "Bordes Activos". Estas tipologías de mobiliario urbano están concebidas para actuar como infraestructura viva multifuncional; es decir, elementos espaciales que guían y contienen el cauce mitigando la erosión, al mismo tiempo que configuran espacios públicos habitables que fomentan la recolección de residuos y la recuperación socioambiental.

De este modo, se asume a la Quebrada Santa Elena como un laboratorio de diseño urbano idóneo. La validación de este modelo en su cauce no solo busca devolverle su

función ecológica y social, sino establecer un referente escalable para la reconciliación entre la infraestructura hídrica y la vida urbana en el resto de los afluentes de Medellín.

1.2 Estado del arte y marco teórico

1.2.1 Estado de la cuestión. La Quebrada Santa Elena, como eje fundamental de la ciudad, ha sido objeto de interés y estudio por parte de diversas entidades académicas e institucionales, entre las que destacan la Universidad Nacional de Colombia, la Universidad Piloto de Colombia, el Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia (CTA), la Alcaldía de Medellín y el Área Metropolitana del Valle de Aburrá. A pesar de contar con múltiples programas, estudios y reportajes noticiosos sobre su situación crítica, en la actualidad no se ha logrado una rehabilitación efectiva ni la ejecución de obras que integren el entorno natural para el beneficio y resiliencia de la comunidad. En consecuencia, los barrios colindantes continúan dándole la espalda al cauce, utilizando el espacio circundante de forma contaminante e ineficiente.

Desde la perspectiva académica, investigaciones previas han documentado esta desconexión. Un referente clave es la tesis de maestría *“La (des)Humanización de la Calle”* (Vásquez Hernández, 2022) la cual, al estudiar el barrio Alejandro Echavarría, evidencia cómo la quebrada fue absorbida por la trama urbana sin planificación, convirtiéndose en un espacio marginal a espaldas de la ciudad.

Por otro lado, desde el ámbito de la planeación institucional, destaca el *Programa para el Mejoramiento Integral de la Microcuenca Santa Elena* formulado por Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia [CTA] (2018). Aunque este programa no ha sido ejecutado, establece un diagnóstico claro de las problemáticas y plantea cuatro líneas temáticas fundamentales: saneamiento ambiental, gestión integral del riesgo, conservación y conectividad ecológica, y educación cultural y ambiental. Estos estudios evidencian que el diagnóstico está claro, pero existe una brecha significativa en la materialización de soluciones de diseño que logren articular estas cuatro líneas en el espacio físico.

1.2.2 Marco teórico

De la infraestructura gris a los Bordes Activos. Históricamente, la respuesta de la ingeniería urbana para mitigar el riesgo en las quebradas ha sido la implementación de "infraestructura gris" (canalizaciones en concreto, bóvedas y recubrimientos). Si bien estos sistemas buscan controlar el flujo hídrico, anulan el valor ecológico del afluente, fragmentan el territorio y limitan su potencial como espacio público.

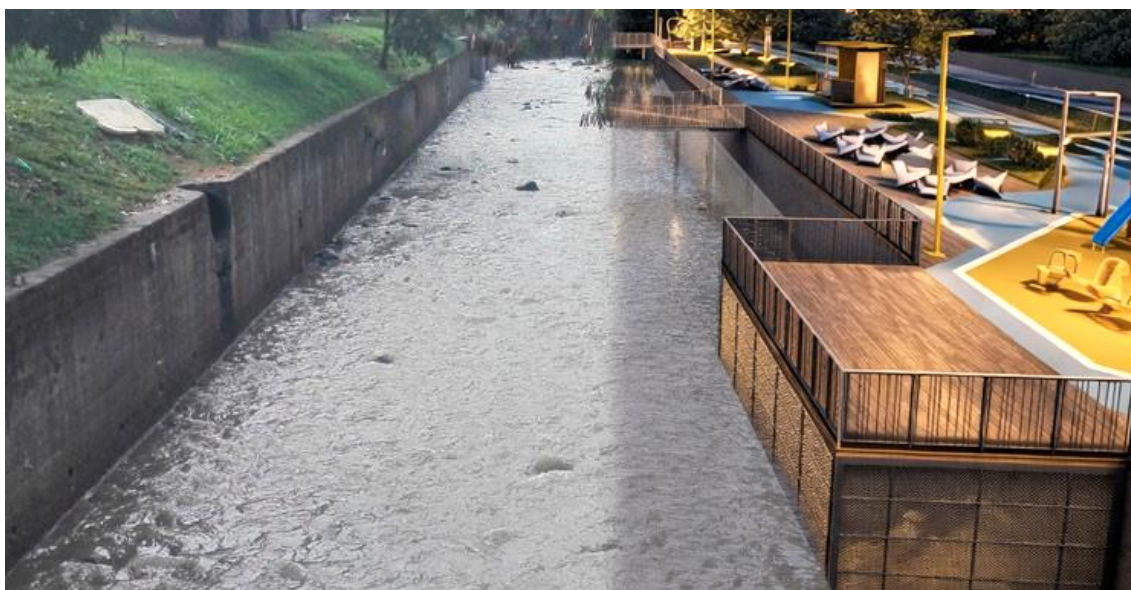


Ilustración 4 Zona canalizada actual Quebrada Santa Elena (Q10) antes de desembocar al Río Aburrá-Medellín, Vs Propuesta de Diseño, Fuente elaboración propia herramienta photoshop

Para superar este modelo obsoleto, el presente proyecto se fundamenta teóricamente en los principios de las Soluciones Basadas en la Naturaleza (SBN) y la infraestructura verde-azul (Córdova et al., 2024). Bajo este enfoque, se propone el concepto de "Bordes Activos". Esta teoría plantea que los límites entre la ciudad y el agua no deben ser muros ciegos de separación, sino interfaces habitables o 'bordes suaves' que inviten a la permanencia ciudadana (Gehl, 2014).

En este contexto, el diseño de mobiliario urbano evoluciona de ser un simple elemento ornamental o de descanso, a convertirse en una pieza de bioingeniería e infraestructura táctica (Lydon & Garcia, 2015). El mobiliario se diseña paramétricamente para asumir la

función técnica de contener el talud, guiar el cauce y actuar como sistema de retención de residuos, al mismo tiempo que reconfigura los bordes como espacios públicos seguros. Esta integración teórica entre el diseño industrial (mobiliario), el diseño urbano (espacio público) y la ingeniería hidráulica (canalización) representa un modelo replicable para intervenciones en corredores ecológicos con alta presión antrópica.

1.3 Contexto y justificación

La Quebrada Santa Elena constituye uno de los sistemas hídricos más representativos y estratégicos de la ciudad de Medellín, tanto por su valor ambiental como por su carga histórica, cultural y urbana. La elección de este corredor ecológico como caso de estudio responde a la necesidad ineludible de replantear el papel de las quebradas urbanas en un territorio caracterizado por una geografía montañosa, una alta vulnerabilidad respecto al clima y una relación históricamente conflictiva entre la ciudad y el agua.

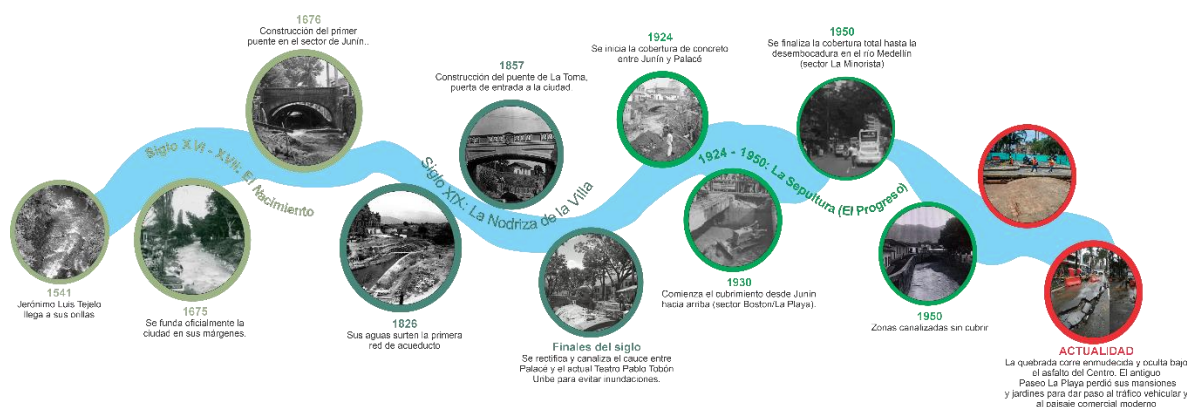


Ilustración 5 Línea del tiempo Quebrada Santa Elena, fuente elaboración propia herramienta corel draw

A nivel urbano, la quebrada evidencia las profundas tensiones del crecimiento acelerado que ha experimentado la ciudad de Medellín. A lo largo de su cauce se consolidaron asentamientos, barrios obreros e infraestructuras que, si bien forman parte de la memoria colectiva de la ciudad, generaron agresivos procesos de canalización, fragmentación y una pérdida sistemática de la relación entre el espacio público y el ecosistema natural. Esta degradación del límite físico ha contribuido a que las zonas

colindantes se vuelvan focos de inseguridad. Por lo tanto, recuperar la quebrada implica el reto de restaurar una relación perdida entre la ciudadanía y su paisaje hídrico.



Ilustración 6 Puntos críticos Quebrada Santa Elena, fuente elaboración propia herramienta photoshop

En este sentido, la justificación de intervenir la Quebrada Santa Elena no responde únicamente a su condición física como afluente, sino a su capacidad de representar los grandes desafíos urbanos contemporáneos de Medellín: cómo integrar la naturaleza a la ciudad, cómo diseñar mitigando el riesgo, cómo reconectar infraestructuras olvidadas y cómo resignificar los paisajes cotidianos como espacios de bienestar colectivo.

Abordar este reto mediante el diseño de tipologías de mobiliario urbano que funcionen como sistema de contención permite una aproximación transversal. Por otra parte, esta visión integra el diseño urbano, el diseño de paisaje, la movilidad sostenible, la gestión del riesgo y la participación comunitaria, consolidando una propuesta transformadora capaz de generar impactos reales y duraderos.

Es necesario dejar de ver la canalización exclusivamente como un problema o un "muro ciego", y empezar a entenderla como una oportunidad de soporte para nuevas infraestructuras ligeras. Es por ello que utilizar la quebrada como "laboratorio" permite

testear soluciones de diseño a pequeña escala (mobiliario) que, de ser exitosas, pueden replicarse en los más de 120 afluentes que posee la ciudad.

1.4 Planteamiento del problema

El problema central que padece la Quebrada Santa Elena en Medellín es la pérdida severa de su función ecológica y social debido a la urbanización intensiva desarrollada en su entorno y a las prácticas de recubrimiento y alteración de su cauce original. Pese a que históricamente fue un elemento fundamental para el desarrollo de la ciudad, hoy se encuentra inmersa en una profunda tensión socioambiental, contrastando su pasado glorioso con un presente marcado por el riesgo y la contaminación.

Esta ineficiente configuración espacial y la ausencia de bordes que medien correctamente entre la dinámica hidráulica y el uso urbano, desencadenan tres problemáticas críticas:

1.4.1 Riesgo y vulnerabilidad hidrológica. La carencia de una contención adecuada y diseñada para la dinámica del cauce presenta un gran problema de posible desbordamiento y erosión constante. Esta inestabilidad afecta la malla vial y amenaza con provocar inundaciones y afectaciones directas en las viviendas aledañas durante eventos climáticos extremos.

1.4.2 Contaminación y degradación ambiental. Al no existir elementos físicos que actúen como agentes de retención o que faciliten las labores de mantenimiento, la quebrada sufre por la ausencia de recolección de basura, lo que ocasiona malos olores, deterioro del ecosistema y taponamientos críticos en la zona.

1.4.3 Desconexión con la comunidad. La falta de conciencia ciudadana y la desconexión social con el entorno natural generan una gran dificultad para la apropiación y recuperación de la zona, perpetuando el ciclo de abandono.

En conclusión, la problemática radica en la urgente necesidad de estabilizar y recuperar este cuerpo de agua vital. La implementación de proyectos tradicionales de "parques lineales" resulta insuficiente frente al desafío del riesgo y la contaminación. Se hace indispensable el diseño e implantación de mobiliario que asuma la función estructural de canalizar y contener, incorporando al mismo tiempo agentes recolectores y espacios de estancia que implanten una nueva conciencia ciudadana en los habitantes del sector.

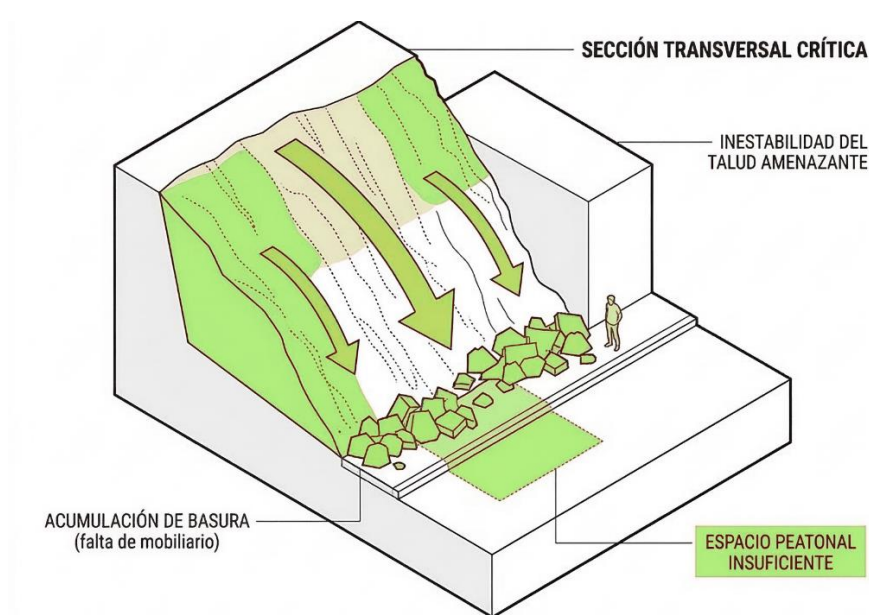
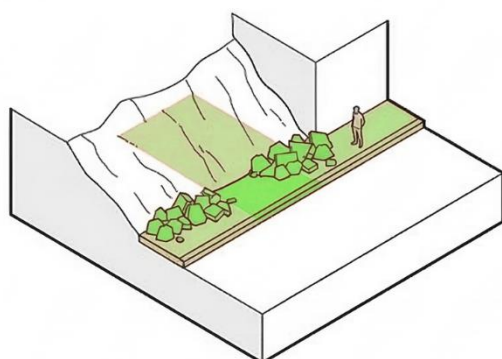


Ilustración 7 Grafico Inestabilidad de Talud, fuente elaboración propia modelo archicad, postproducción corel draw

PERSPECTIVA DEL BORDES CRÍTICOS



IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS

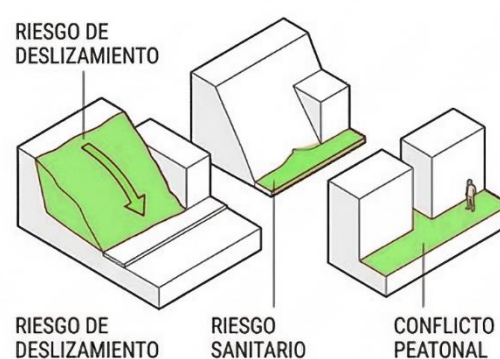


Ilustración 8 Bordes Críticos, fuente elaboración propia archicad, postproducción corel draw

Capítulo 2. OBJETIVOS

2.1 Objetivos generales, hipótesis y metodología

El objetivo general del presente trabajo es diseñar tipologías de mobiliario urbano que operen como infraestructura viva para la contención hídrica y la recuperación socioambiental, utilizando la Quebrada Santa Elena como laboratorio de diseño urbano para proponer un modelo escalable en la ciudad de Medellín.

2.1.1 Hipótesis: La implementación de un modelo de mobiliario urbano y multifuncional, diseñado específicamente para contener el cauce y estabilizar los taludes, permitirá revertir la desconexión ciudadana, reducir los focos de contaminación por residuos sólidos y resignificar los bordes de la Quebrada Santa Elena como un espacio público armónico, seguro y resiliente.

2.1.2 Metodología: Para abordar el objeto de estudio y responder a los objetivos planteados, se empleará una metodología proyectual mixta con enfoque en diseño urbano-paisajístico, estructurada en las siguientes fases:

1. **Fase de Análisis y Diagnóstico.** Levantamiento morfológico y urbano de los bordes de la Quebrada Santa Elena, mapeando puntos críticos de erosión, riesgo de desbordamiento y contaminación para identificar tramos de intervención viables.
2. **Fase de Ideación y Diseño.** Desarrollo paramétrico de las tipologías de mobiliario urbano ("Bordes Activos"), aplicando criterios de modularidad, soluciones basadas en la naturaleza (SBN) y bioingeniería para la contención hídrica.
3. **Fase de Evaluación y Validación.** Comprobación teórica de la viabilidad técnica de los prototipos mediante modelado tridimensional, analizando su adaptabilidad espacial y su capacidad de respuesta ante las fluctuaciones del caudal.

2.2 Objetivos específicos

Analizar la morfología natural del cauce, las zonas de erosión activa y las áreas con riesgo de desbordamiento de la Quebrada Santa Elena, para identificar los tramos críticos que requieren contención y definición topográfica.

Diseñar tipologías espaciales y módulos de mobiliario urbano multifuncional que operen como infraestructura verde-azul, cumpliendo la doble función de canalizar (guiar y contener) el flujo hídrico y configurar zonas habitables de espacio público.

Integrar en la estructuración de estos bordes canalizadores, sistemas de retención de residuos y soluciones de bioingeniería para estabilizar los taludes, mitigando la contaminación por arrastre y promoviendo la recuperación del ecosistema ribereño.

Evaluar la viabilidad espacial y la respuesta hidrodinámica de los espacios tipo propuestos, validando teóricamente su capacidad para soportar las fluctuaciones del caudal, mitigar inundaciones súbitas y adaptarse de manera resiliente a la presión urbana del sector.

2.3 Beneficios del proyecto

El desarrollo e implementación de este proyecto aporta beneficios multidimensionales al entorno urbano de Medellín:

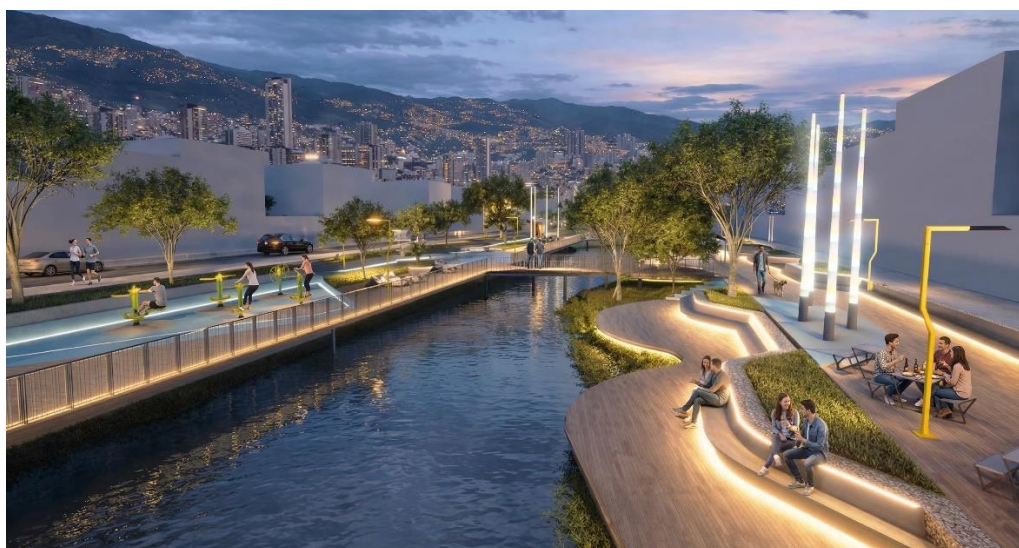


Ilustración 9 Render Zona 2 Laboratorio Quebrada Santa Elena, Fuente: Elaboración propia. Renderizado en Lumion con postprocesamiento de escalas humanas mediante relleno generativo (IA).

- **Beneficio Ambiental:** Al integrar "agentes recolectores" físicos en el diseño del mobiliario, se reduce drásticamente la contaminación por residuos sólidos que

obstruyen el cauce. Asimismo, la estabilización de los bordes con infraestructura viva disminuye la erosión y fomenta la recuperación de la flora y fauna nativa ribereña.

- **Beneficio Urbano y de Gestión del Riesgo:** Transformar la contención hídrica en "Bordes Activos" optimiza el uso del suelo, devolviéndole a la ciudad metros cuadrados de espacio público de calidad mientras se mitiga eficazmente el riesgo de desbordamientos e inundaciones súbitas que amenazan la infraestructura vial y residencial.
- **Beneficio Social y Pedagógico:** El mobiliario propuesto no solo invita a la permanencia y el encuentro, sino que actúa como un dispositivo de educación ambiental. Al acercar de forma segura a los ciudadanos al cuerpo de agua, se fomenta el sentido de pertenencia, la vigilancia natural del entorno y se revierte el estigma histórico de la quebrada como "patio trasero" o vertedero.

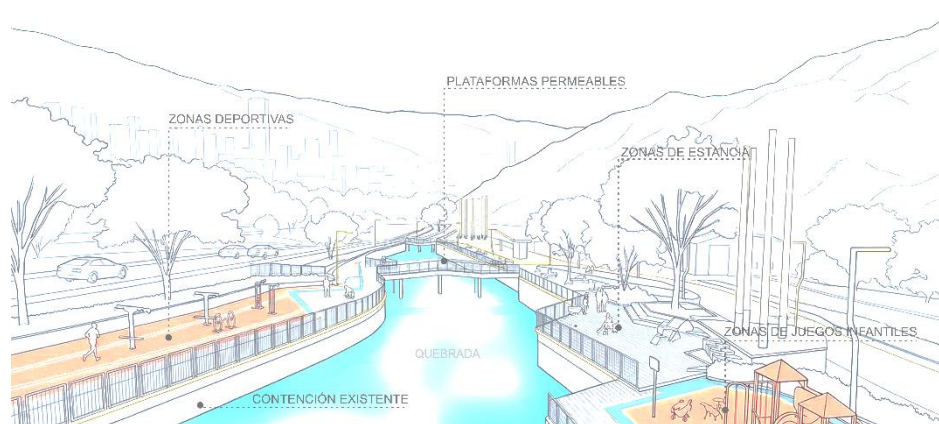


Ilustración 10 Zonas Proyecto- Laboratorio 1, Fuente: Elaboración propia a partir de modelado en Archicad, con posprocesamiento y mejora gráfica asistida por Inteligencia Artificial Gemini/Photoshop AI

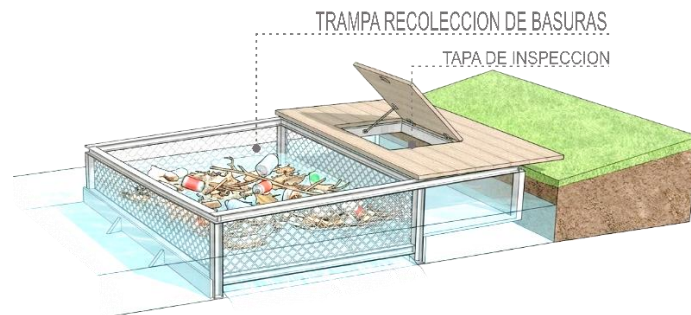


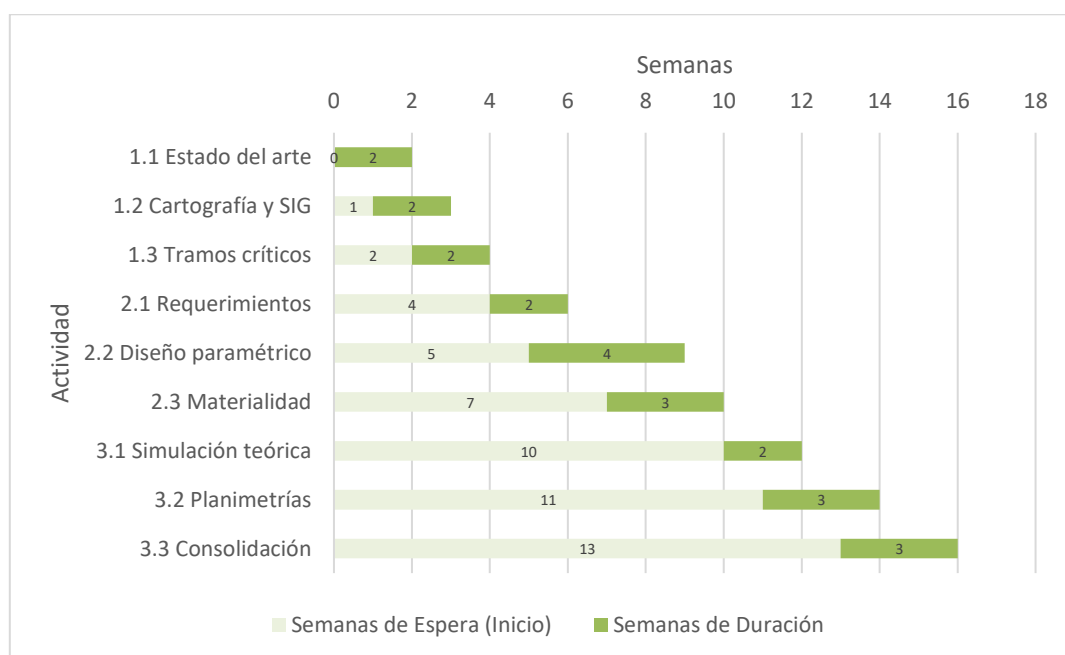
Ilustración 11 Trampa recolección basuras, Fuente: Elaboración propia a partir de modelado en Archicad, con posprocesamiento y mejora gráfica asistida por Inteligencia Artificial Gemini/Photoshop AI

Capítulo 3. DESARROLLO DEL PROYECTO

3.1 Planificación del proyecto

La ejecución de este Trabajo Fin de Máster se estructuró a lo largo de un periodo académico regular, organizando el flujo de trabajo en tres macro fases iterativas coherentes con la metodología proyectual planteada: Análisis y Diagnóstico, Ideación y Diseño, y Evaluación y Validación. A continuación, se describen las actividades principales desarrolladas en cada etapa:

Tabla 1 Cronograma Actividades, Fuente: Elaboración propia mediante el procesamiento de datos en Microsoft Excel.



Fase 1: Análisis y Diagnóstico (Semanas 1 a 4)

- Estudio del estado del arte y revisión de informes técnicos previos sobre la quebrada Santa Elena.
- Levantamiento de información cartográfica y modelado topográfico del estado actual del cauce mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG).
- Identificación de tramos críticos de erosión, riesgo de desbordamiento y acumulación de residuos sólidos a lo largo del corredor hídrico.

Fase 2: Ideación y Diseño Conceptual (Semanas 5 a 10)

- Definición de requerimientos técnicos e hidráulicos para la infraestructura viva ("Bordes Activos").
- Diseño paramétrico y modelado tridimensional de las tres tipologías de mobiliario urbano de contención.
- Selección de materialidad sostenible, ensambles modulares y especies vegetales nativas para la bioingeniería del talud.

Fase 3: Evaluación, Validación y Desarrollo de Propuestas (Semanas 11 a 16)

- Simulación teórica del comportamiento de los módulos frente a variaciones del nivel freático y escorrentía superficial.
- Elaboración de planimetrías técnicas, secciones constructivas e ilustraciones de elaboración propia para la transmisión del conocimiento espacial.
- Consolidación del documento final, presupuesto y conclusiones del proyecto.

3.2 Descripción de la solución, metodologías y herramientas empleadas

La solución desarrollada frente a la degradación de la Quebrada Santa Elena consiste en el diseño de un sistema modular de 'Bordes Activos'. Este sistema abandona la contención en muros ciegos para proponer una infraestructura verde-azul escalonada y multifuncional, priorizando el uso colectivo en las márgenes del río (Hermida et al., 2021). El modelo se fundamenta en la creación de tres tipologías espaciales adaptables a las distintas condiciones morfológicas del cauce:

3.2.1 Tipología A (Módulo de Contención en Talud y Estancia). Esta tipología trasciende la función de un muro de contención tradicional al operar como un sistema híbrido de bioingeniería.

Bordes Activos. Tipologías de mobiliario urbano para la contención hídrica y recuperación socioambiental de quebradas. Laboratorio de diseño en Santa Elena, Medellín

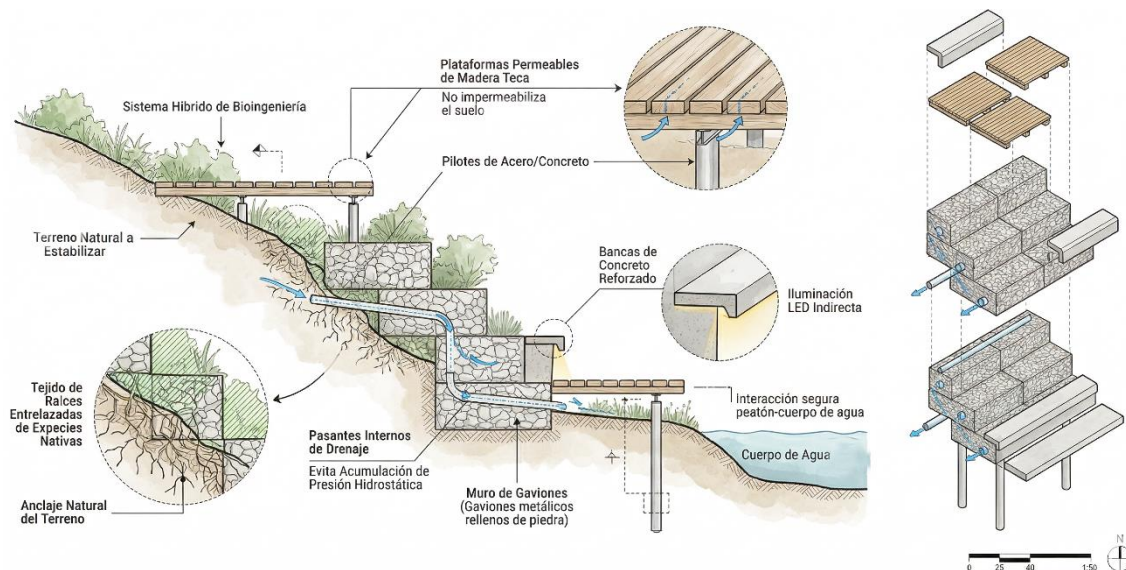


Ilustración 12 Esquema funcionamiento Tipología A, Fuente: Elaboración propia a partir de modelado en Archicad, con posprocesamiento y mejora gráfica asistida por Inteligencia Artificial Gemini/Photoshop AI

Estructuralmente, se compone de un muro escalonado de gaviones equipados con pasantes internos de drenaje, lo cual evita la acumulación de presión hidrostática en el talud. A nivel biológico, este sistema permeable fomenta el desarrollo de un tejido de raíces entrelazadas de especies nativas, consolidando la estabilización del terreno a largo plazo mediante anclaje natural. La habitabilidad se resuelve sin impermeabilizar el suelo ribereño, utilizando plataformas permeables de madera teca sostenidas sobre pilotes y banquetas de concreto reforzado con iluminación LED indirecta, garantizando así la interacción segura del peatón con el cuerpo de agua.

3.2.2 Tipología B (Módulo de Inundación Controlada y Tránsito). Diseñada para zonas de planicie aluvial susceptibles a crecidas repentinas, esta tipología basa su respuesta hidrodinámica en la mínima resistencia al flujo. La estructura se eleva sobre columnas metálicas cuya longitud se parametriza y ajusta específicamente según la cota máxima de inundación histórica de cada tramo de la quebrada. Para evitar que el mobiliario actúe como una barrera obstructiva (presa) o sufra desprendimientos por subpresión durante las crecidas, las plataformas peatonales intercalan superficies de madera teca con tramos de malla metálica anclada y reforzada con estructura en ángulos. Esta permeabilidad estructural permite que el caudal se expanda libremente por debajo y a través del espacio transitable, protegiendo tanto la integridad del peatón como la de la malla vial adyacente.

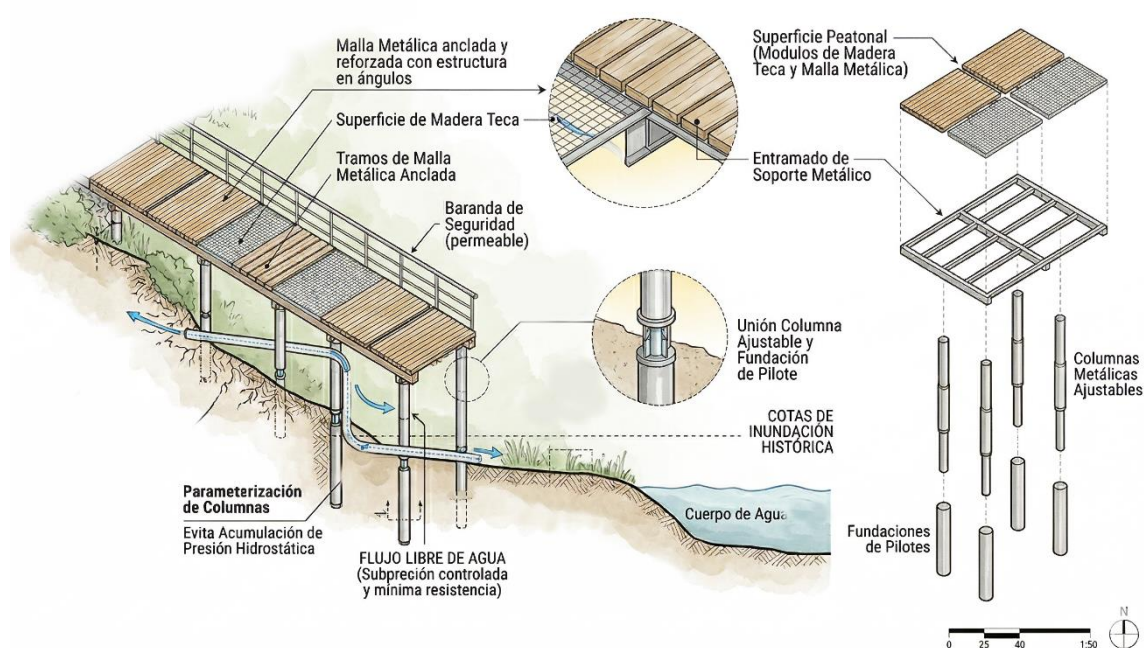


Ilustración 13 Esquema funcionamiento Tipología B, Fuente: Elaboración propia a partir de modelado en Archicad, con posprocesamiento y mejora gráfica asistida por Inteligencia Artificial Gemini/Photoshop AI

3.2.3 Tipología C (Módulo de Filtro y Agente Recolector). Concebida para nodos de alta densidad y tensión urbana, esta tipología es una pieza de saneamiento táctico. Su capacidad de retención mecánica se logra mediante una subestructura de pilares metálicos cuadrados (100 mm x 1 cm de espesor) que soportan una malla eslabonada reforzada, la cual se encuentra anclada y soldada tanto vertical como horizontalmente para resistir el impacto de los residuos sólidos arrastrados por la corriente. Para garantizar su operatividad municipal y el mantenimiento rutinario, el diseño integra compuertas abatibles con estructura metálica mimetizadas bajo el acabado superior en deck de madera. Estas tapas de inspección permiten un acceso ergonómico desde la superficie peatonal hacia la trampa de recolección, optimizando el ciclo de limpieza sin necesidad de maquinaria pesada invasiva.

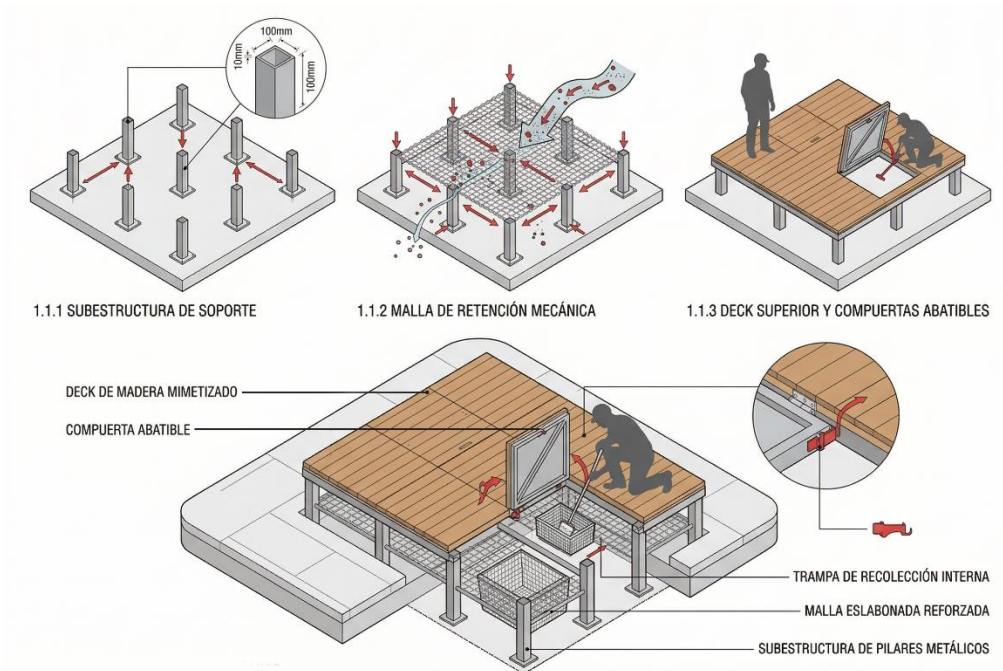


Ilustración 14 Esquema funcionamiento Tipología C, Fuente: Elaboración propia a partir de modelado en Archicad, con posprocesamiento y mejora gráfica asistida por Inteligencia Artificial Gemini/Photoshop AI

El desarrollo de estas tipologías siguió una metodología de *Diseño Paramétrico y Soluciones Basadas en la Naturaleza (SBN)*. La parametrización permitió crear módulos de mobiliario cuyas dimensiones y ángulos pueden alterarse digitalmente para

adaptarse a la topografía específica de cualquier tramo de la quebrada, garantizando así que el modelo sea replicable en los más de 120 afluentes de Medellín.

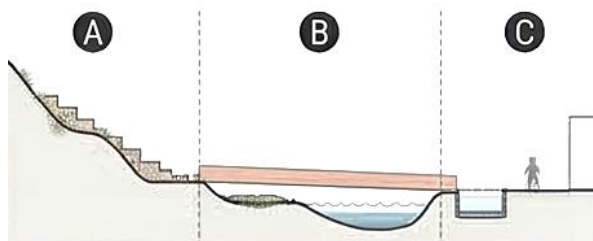
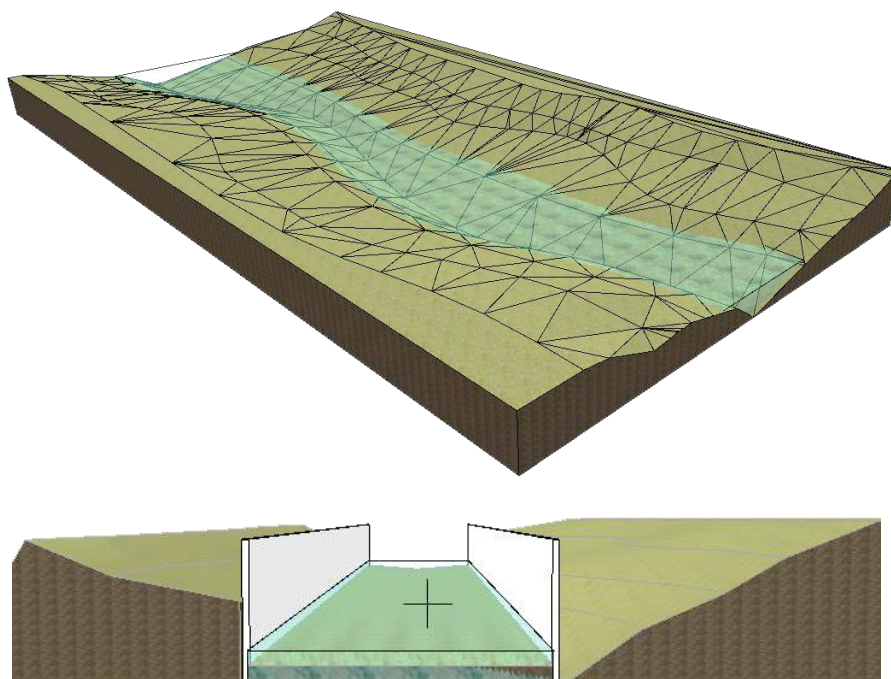


Ilustración 15 Interrelación de Tipologías, Fuente: Elaboración propia a partir de modelado en Archicad, con posprocesamiento y mejora gráfica asistida por Inteligencia Artificial Gemini/Photoshop AI

Para garantizar la viabilidad técnica, espacial y de representación del proyecto, se utilizó el siguiente ecosistema de software:

Modelado Arquitectónico (BIM): *Archicad* (Graphisoft, 2023), empleado para la planimetría rigurosa, la planimetría de detalle y la generación de la volumetría tridimensional de los módulos adaptados a la topografía del cauce.



Bordes Activos. Tipologías de mobiliario urbano para la contención hídrica y recuperación socioambiental de quebradas. Laboratorio de diseño en Santa Elena, Medellín

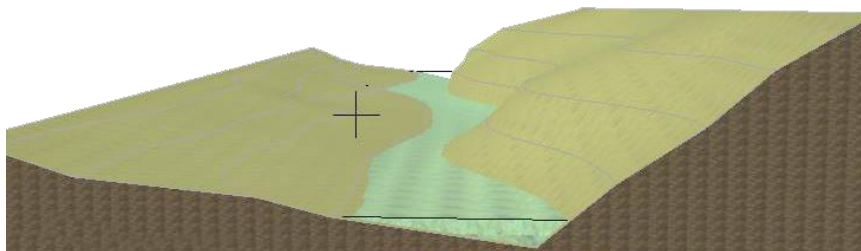


Ilustración 16 Representación Tridimensional del Relieve zona 1 y zona 2, fuente Elaboración propia

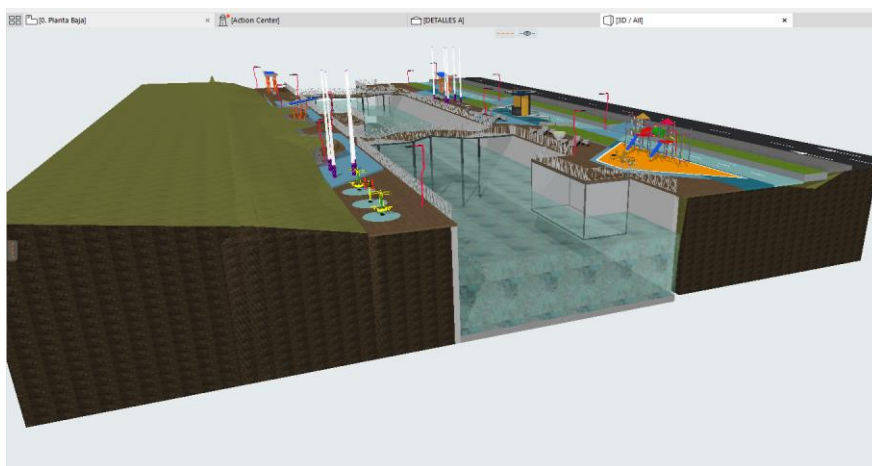


Ilustración 17 Representación Tridimensional zona 1, fuente Elaboración propia mediante herramienta Archicad

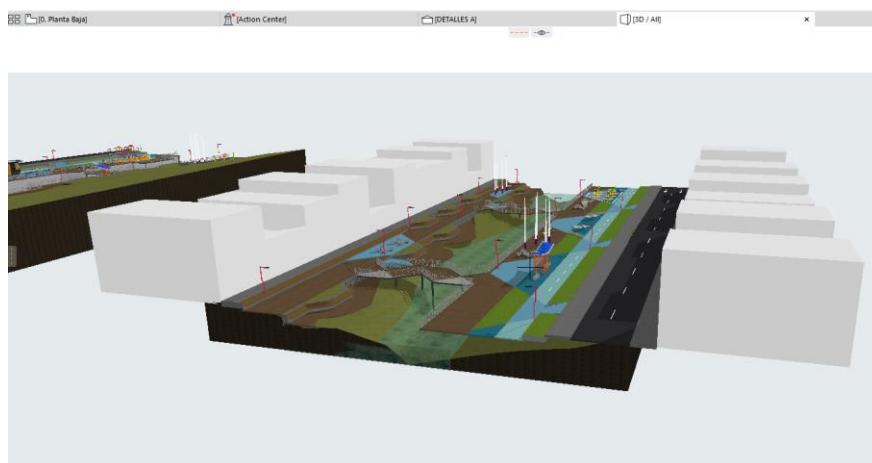


Ilustración 18 Representación Tridimensional zona 2, fuente Elaboración propia mediante herramienta Archicad

Representación Gráfica y Visualización: *Lumion (2023)*, utilizado como motor de renderizado fotorrealista para evaluar la materialidad, la iluminación y la integración paisajística de las tipologías de mobiliario en su entorno natural y urbano.

Postproducción y Edición Vectorial: *Photoshop* y *CorelDraw*. *Photoshop* fue fundamental para la ambientación, postproducción de cortes e imágenes objetivo; mientras que *CorelDraw* se destinó a la diagramación de láminas, elaboración de iconografía analítica y esquemas conceptuales para la transmisión clara del conocimiento espacial.

Declaración de uso de Inteligencia Artificial: Durante el desarrollo del presente Trabajo Fin de Máster, se empleó el modelo de Inteligencia Artificial generativa Gemini (Google) como herramienta de asistencia tecnológica. Su uso se delimitó estrictamente a la revisión de estilo, corrección ortotipográfica, optimización de la redacción académica y apoyo en la traducción técnica del *Abstract*. Se deja expresa constancia de que la conceptualización arquitectónica, el diagnóstico morfológico, el diseño paramétrico de los "Bordes Activos" y el análisis de resultados son producto de la autoría original y exclusiva de la investigadora.

Para la producción de los esquemas técnicos y axonometrías de funcionamiento (Ilustraciones 12, 13 y 14), se empleó un flujo de trabajo híbrido. La base estructural y volumétrica fue modelada rigurosamente en Archicad para garantizar la precisión de las dimensiones y la escala arquitectónica. Posteriormente, se utilizó el modelo de Inteligencia Artificial Gemini como herramienta de asistencia en el post-procesamiento gráfico, con el fin de mejorar la definición de texturas y la calidad estética de los componentes, sin alterar la propuesta técnica y estructural original.

3.3 Recursos requeridos

Para la formulación, diseño y desarrollo de las tipologías de mobiliario urbano y la propuesta de canalización de la Quebrada Santa Elena, el proyecto se concibió y ejecutó de manera 100% digital, haciendo uso de los siguientes recursos:

Recursos Humanos: Horas de investigación, análisis territorial y diseño arquitectónico por parte del autor, además de las horas de asesoría técnica de la dirección del proyecto.

Recursos Tecnológicos (Hardware): Estación de trabajo de alto rendimiento (computador portátil y de escritorio) con capacidad de procesamiento gráfico superior, estrictamente necesaria para el modelado BIM y el renderizado fotorrealista.

Recursos Tecnológicos (Software e IA): Licencias de Archicad (modelado arquitectónico y paramétrico), Lumion (visualización y renderizado inmersivo), Adobe Photoshop (postproducción de imágenes objetivo), CorelDraw (diagramación y vectorización de planimetría) y el modelo de Inteligencia Artificial Gemini (Google) para la revisión de estilo y asistencia en la redacción del documento académico.

Recursos de Información: Datos abiertos de topografía, planimetría de redes hídricas y estudios de vulnerabilidad proporcionados por plataformas institucionales como Medata (Alcaldía de Medellín) y el Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

3.4 Presupuesto

El siguiente presupuesto supone la evaluación económica total de la fase de diseño y formulación del proyecto. Se han valorado económicamente todos los recursos empleados, incluyendo aquellos que tuvieron un costo real de cero (debido al uso de licencias educativas o datos de acceso abierto), con el fin de reflejar el valor comercial del proyecto en el mercado profesional.

Tabla 2 Presupuesto Diseño y formulación del Proyecto

Tipo de coste	Valor (COP)	Observaciones
Horas de trabajo en el proyecto	\$ 16.000.000	Estimación de 400 horas de trabajo profesional en investigación, diseño BIM y validación digital (aprox. \$40.000/hora).
Equipo técnico utilizado	\$ 12.600.000	Valor aproximado en el mercado de una estación de trabajo (Workstation) con tarjeta gráfica de gama alta, requerida para el ecosistema de software empleado.
Software utilizado	\$ 14.000.000	Costo estimado de licencias comerciales anuales de Archicad, Lumion, Adobe Creative Cloud y CorelDraw. (Nota: En el ámbito académico se operó bajo licencias educativas de costo \$0).+1

Estudios e informes	\$ 1.200.000	Gastos de desplazamiento asociados a visitas de campo a la Quebrada Santa Elena, levantamiento fotográfico y adquisición de cartografía base específica.
TOTAL ESTIMADO	\$ 37.700.000	Costo total de la fase de formulación y diseño arquitectónico digital del proyecto.

3.5 Viabilidad

El análisis de viabilidad del proyecto "Bordes Activos" demuestra que la sustitución de la infraestructura gris por tipologías de mobiliario canalizador es una alternativa altamente competitiva y sostenible para la ciudad de Medellín. Esta viabilidad se sustenta en tres dimensiones fundamentales:

Viabilidad Económica (Relación Costo-Beneficio) Frente a los métodos tradicionales de canalización —que exigen el vaciado de grandes volúmenes de concreto *in situ*, excavaciones profundas y un alto impacto en la zona de obra—, el sistema propuesto plantea un modelo de prefabricación y ensamblaje modular. Esta viabilidad económica se sustenta no solo en los costos directos, sino en la drástica reducción de los "costos ocultos" inherentes a la infraestructura gris. Tradicionalmente, la canalización en las escarpadas laderas de Medellín requiere maquinaria pesada de difícil acceso, interrupción prolongada del tráfico y mantenimientos correctivos constantes debido a la socavación pasiva del concreto.

A nivel macro, la relación costo-beneficio para la administración municipal es altamente positiva. La inversión inicial en este mobiliario táctico se amortiza a mediano y largo plazo mediante tres vías principales:

1. **Mitigación de la atención de desastres:** Se evitan los millonarios costos asociados a la pérdida de la malla vial y el colapso de infraestructuras residenciales por erosión y desbordamiento.
2. **Optimización operativa:** Se reducen significativamente los tiempos y recursos del dragado manual o mecánico del cauce. Al integrar el "Módulo de Filtro y

Agente Recolector" (Tipología C), Empresas Varias de Medellín (Emvarias) puede concentrar sus esfuerzos de limpieza en nodos específicos y de fácil acceso, optimizando la recolección de residuos sólidos urbanos.

3. **Durabilidad estructural pasiva:** Al incorporar especies vegetales en la Tipología A, el sistema radicular fortalece naturalmente la contención con el paso de los años, disminuyendo la necesidad de inyecciones de concreto futuras.

Viabilidad Ambiental El proyecto es intrínsecamente viable desde el punto de vista ecológico al fundamentarse en las Soluciones Basadas en la Naturaleza (SBN). A diferencia del concreto, que sufre un deterioro progresivo y pasivo con el tiempo, la bioingeniería integrada en los módulos de contención (Tipología A) es un sistema vivo. A medida que la vegetación nativa se consolida, el sistema de raíces entrelazadas fortalece la retención del talud, aumentando la resiliencia estructural de la canalización con el paso de los años. Además, al permitir la permeabilidad del suelo en las zonas de inundación controlada (Tipología B), se favorece la recarga de los acuíferos locales y la restauración del microclima ribereño.

Viabilidad Social (Apropiación, Seguridad y Cambio Cívico). La sostenibilidad a futuro y el éxito físico de este proyecto radican en el fenómeno de la apropiación espacial. Históricamente, los canales ciegos y enrejados han convertido a las quebradas en los "patios traseros" de los barrios, generando áreas residuales invisibles que propician la delincuencia y la creación de vertederos clandestinos al darle la "espalda" a la comunidad.

El modelo de "Bordes Activos" plantea una solución psicosocial a esta tensión: transformar el límite hídrico de una barrera ciega a un espacio público habitable. Al dotar a los bordes de iluminación, pasarelas y zonas de estancia ergonómicas, se altera la percepción ciudadana, convirtiendo la quebrada en la "fachada principal" del barrio. Esta habitabilidad genera una vigilancia natural, o los llamados 'ojos en la calle' (Jacobs, 1961), donde la presencia constante de transeúntes y vecinos actúa como el mejor

disuasivo contra la criminalidad y las incivildades. En última instancia, esta configuración física desincentiva el vandalismo y la disposición inadecuada de basuras, implantando una nueva conciencia cívica que garantiza la pervivencia y el cuidado del mobiliario en el tiempo por parte de sus propios usuarios.

3.6 Resultados del proyecto

El presente Trabajo Fin de Máster arrojó resultados concluyentes que materializan el paso de la teoría de la infraestructura verde-azul a la aplicación proyectual mediante diseño BIM. A continuación, se describen los resultados finales obtenidos:

1. Diagnóstico morfológico y selección de tramos críticos En respuesta al primer objetivo específico, se obtuvo como resultado una planimetría analítica detallada de la Quebrada Santa Elena. Mediante este mapeo, se logró identificar las zonas de mayor vulnerabilidad por erosión activa, riesgo de inundación súbita y acumulación crítica de residuos sólidos, determinando los "nodos de intervención" idóneos para la implantación del mobiliario en el tejido urbano.

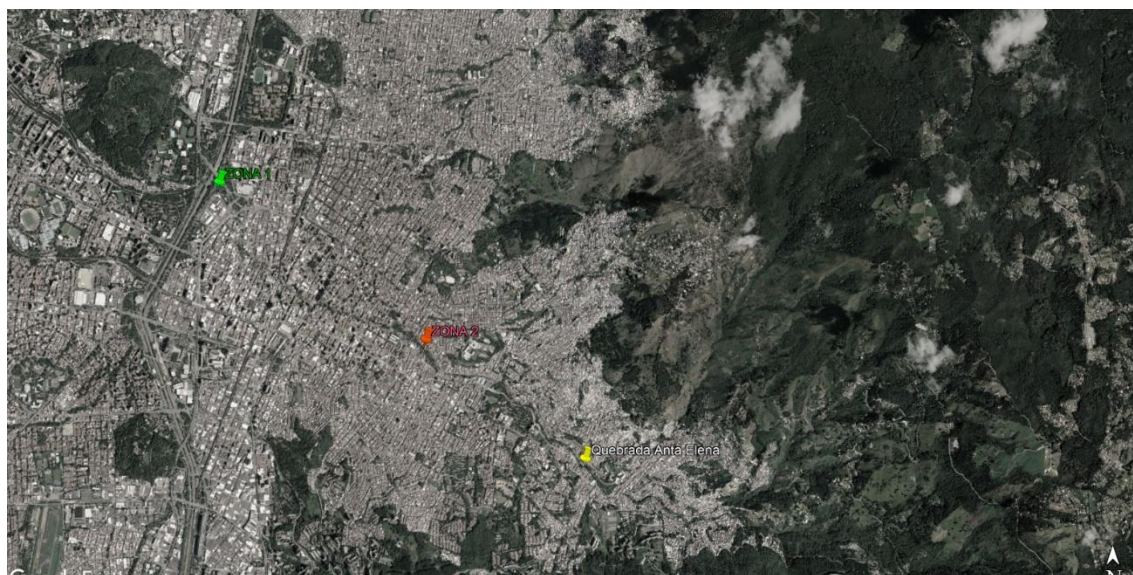


Ilustración 19 Zonificación puntos Laboratorio Quebrada Santa Elena, Fuente elaboración propia

Las dos áreas de estudio seleccionadas como laboratorios de intervención para implementar las tipologías propuestas presentan dinámicas espaciales y desafíos urbanos contrastantes.

El primer polígono se ubica en el tramo inferior de la quebrada, en proximidad a su desembocadura en el río Medellín. Este sector fue seleccionado debido a su condición de cauce canalizado; una configuración basada en muros de contención laterales que ha generado una profunda fractura espacial, desvinculando el sistema hídrico del tejido urbano. En respuesta, la estrategia proyectual en esta zona se fundamenta en una reestructuración espacial orientada a mitigar esta barrera, articulando la quebrada y la ciudad a través del diseño urbano.



Ilustración 20 Registro fotográfico Sector 1, fuente Google earth pro imágenes septiembre 2025

Como parte de los resultados del diagnóstico morfológico e hidrológico, la selección de este primer polígono se fundamentó no solo en su condición de fractura espacial y barrera urbana, sino en el análisis cuantitativo de su alta vulnerabilidad ante eventos pluviométricos extremos. Al cruzar el levantamiento planimétrico con los datos hidrométricos históricos proporcionados por el Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá (SIATA), se evidenció métricamente la urgencia de una intervención resiliente en el sector.

Bordes Activos. Tipologías de mobiliario urbano para la contención hídrica y recuperación socioambiental de quebradas. Laboratorio de diseño en Santa Elena, Medellín



Ilustración 21 Niveles de riesgo Río y Quebradas. fuente: Siata (Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá)

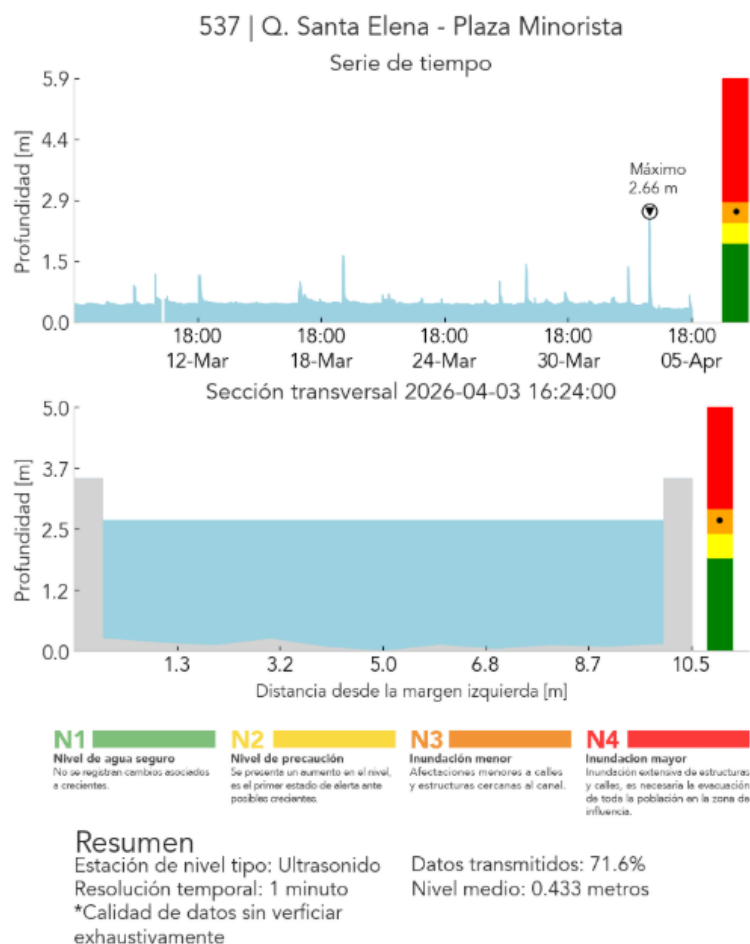


Ilustración 22 Serie de tiempo y sección transversal 537 | Q. Santa Elena - Plaza Minorista fuente: Siata (Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá) https://siata.gov.co/siata_nuevo/

El monitoreo de la estación Plaza Minorista arroja resultados concluyentes sobre el comportamiento del cauce en este tramo inferior. La sección transversal, confinada actualmente por muros ciegos a un ancho aproximado de 10.5 metros, presenta una nula capacidad de amortiguación o expansión frente a fluctuaciones súbitas. La serie de tiempo evidencia que el caudal experimenta picos de profundidad críticos que alcanzan los 2.66 metros, superando ampliamente los niveles de agua segura (N1) e ingresando en las categorías de alerta naranja y roja (Inundación menor y mayor, respectivamente).

Este resultado diagnóstico determina que la infraestructura de contención existente es ineficiente ante las dinámicas reales de crecida, advirtiendo un riesgo inminente de desbordamiento sobre la malla vial y el tejido urbano adyacente. En consecuencia, este hallazgo cuantitativo se consolidó como el parámetro rector para la parametrización arquitectónica en la Zona 1. La cota máxima registrada de 2.66 metros justifica y valida la necesidad estructural de implementar la Tipología B (Módulo de Inundación Controlada), asegurando que las nuevas plataformas permeables se eleven por encima de este umbral de riesgo para garantizar la seguridad ciudadana y la adaptabilidad del espacio público frente al comportamiento hidrodinámico de la quebrada.

El segundo polígono de intervención corresponde a un tramo de la cuenca que conserva su cauce en estado natural, lo cual genera una alta vulnerabilidad ante eventos pluviométricos extremos, incrementando el riesgo de desbordamientos e inundaciones. Morfológicamente, sus bordes presentan una configuración asimétrica: una de sus márgenes colinda directamente con tejido residencial consolidado, mientras que la opuesta está delimitada por la infraestructura vial. En este contexto, el reto proyectual trasciende la simple contención hidráulica de la quebrada; el objetivo central es implementar estrategias de diseño urbano que permitan suturar la trama barrial, mitigando la actual condición del cauce como barrera física y fomentando la permeabilidad y conexión transversal del sector.



Ilustración 23 Registro fotográfico Sector 2, fuente Google earth pro imágenes septiembre 2025

En coherencia con la metodología de diagnóstico basada en datos aplicada al primer tramo, el análisis del segundo polígono de intervención se contrastó con los registros de la estación de radar del SIATA correspondiente al sector La Paz. Este cruce de información permitió dimensionar el riesgo específico de un cauce que aún conserva tramos en estado natural.

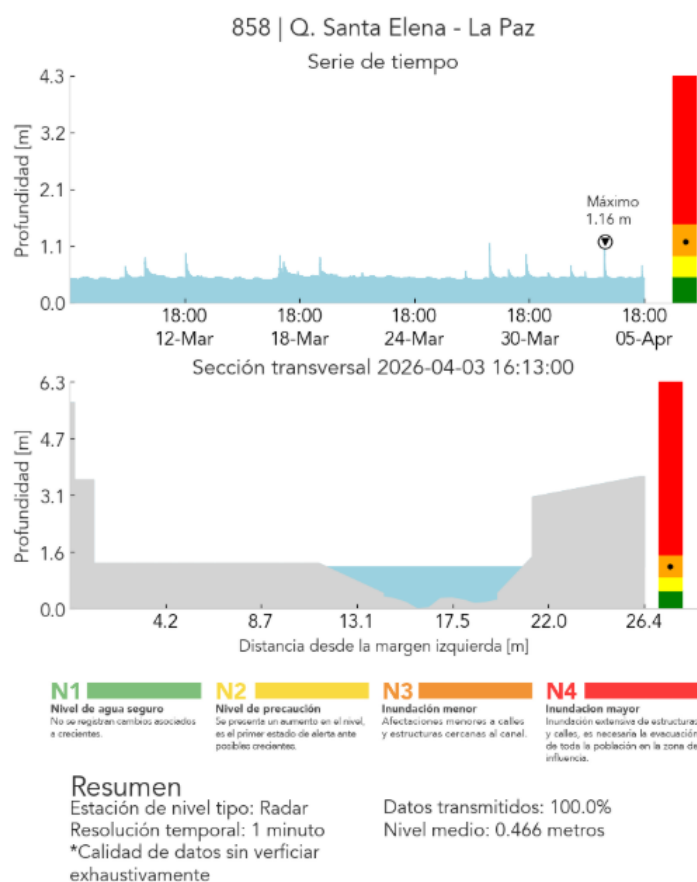


Ilustración 24 Serie de tiempo y sección transversal 858 | Q. Santa Elena – La Paz fuente: Siata (Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá) https://siata.gov.co/siata_nuevo/

A diferencia del flujo confinado y verticalizado de la Zona 1, la sección transversal de esta estación evidencia métricamente la configuración asimétrica de los bordes. El perfil revela una amplitud topográfica mucho mayor (abarcando una luz de aproximadamente 26.4 metros), caracterizada por márgenes irregulares y taludes desprotegidos. En términos hidrodinámicos, la serie de tiempo registra un nivel de agua medio de 0.466 metros; sin embargo, exhibe picos de crecida rápida de hasta 1.16 metros.

Aunque esta profundidad máxima no supera el umbral de la desembocadura, el ascenso continuo hacia niveles de alerta amarilla (N2 - Nivel de precaución) representa una amenaza crítica en un entorno topográfico no canalizado. La energía cinética de estas fluctuaciones de 1.16 metros impacta directamente sobre la base de los taludes asimétricos, acelerando la socavación progresiva y la pérdida de masa de suelo que sostiene la infraestructura vial y las viviendas colindantes.

En consecuencia, el comportamiento morfodinámico ilustrado en esta estación fundamenta la elección e implantación de la **Tipología A (Módulo de Contención en Talud y Estancia)** para este polígono. El diseño paramétrico en terrazas de esta tipología absorbe y estabiliza la asimetría del terreno demostrada en el gráfico. Asimismo, el sistema híbrido de gaviones permeables y bioingeniería en los escalones inferiores está proyectado para disipar la energía de las crecidas en la cota de 1.16 metros, mitigando la erosión activa mientras se configura un borde transitable que sutura la brecha espacial del barrio.

2. Diseño arquitectónico de las tipologías "Bordes Activos" El resultado central de este proyecto con enfoque de desarrollo proyectual es la concepción integral de tres tipologías de mobiliario urbano multifuncional. Estas propuestas fueron modeladas paramétricamente para cumplir la doble función de canalizar el flujo hídrico y configurar espacios públicos habitables:

- **Tipología A (Módulo de Contención y Estancia):** Se logró un diseño en terrazas que estabiliza el talud y permite la aproximación segura del peatón al agua.

Bordes Activos. Tipologías de mobiliario urbano para la contención hídrica y recuperación socioambiental de quebradas. Laboratorio de diseño en Santa Elena, Medellín

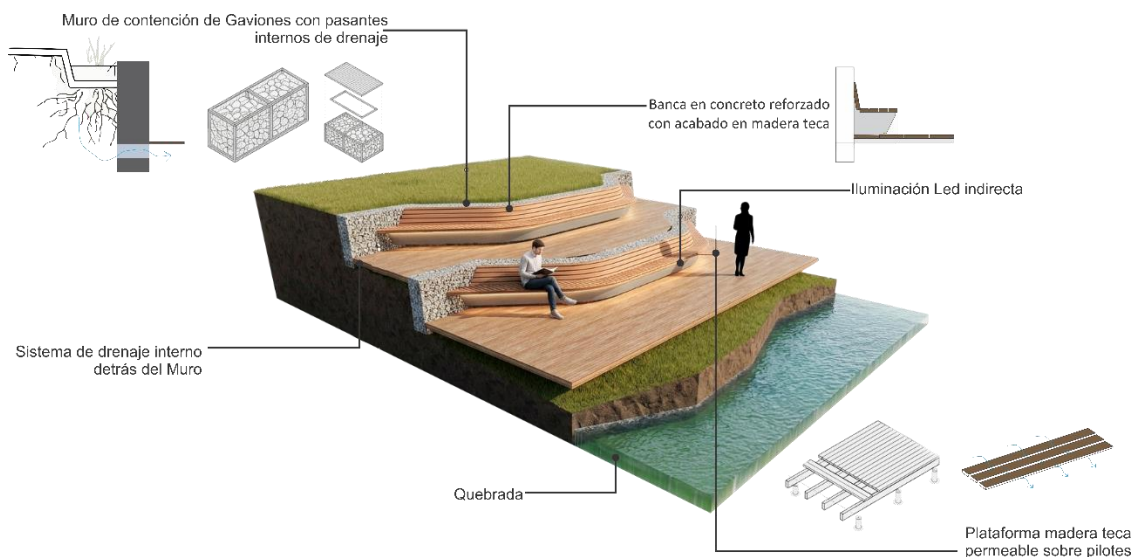


Ilustración 25 Esquema diseño Tipología A, fuente elaboración propia mediante herramientas archicad y postproducción Photoshop y corel draw

- **Tipología B (Módulo de Inundación Controlada):** Se diseñó una plataforma permeable y pasarelas elevadas que garantizan el tránsito peatonal incluso durante las crecidas del caudal.

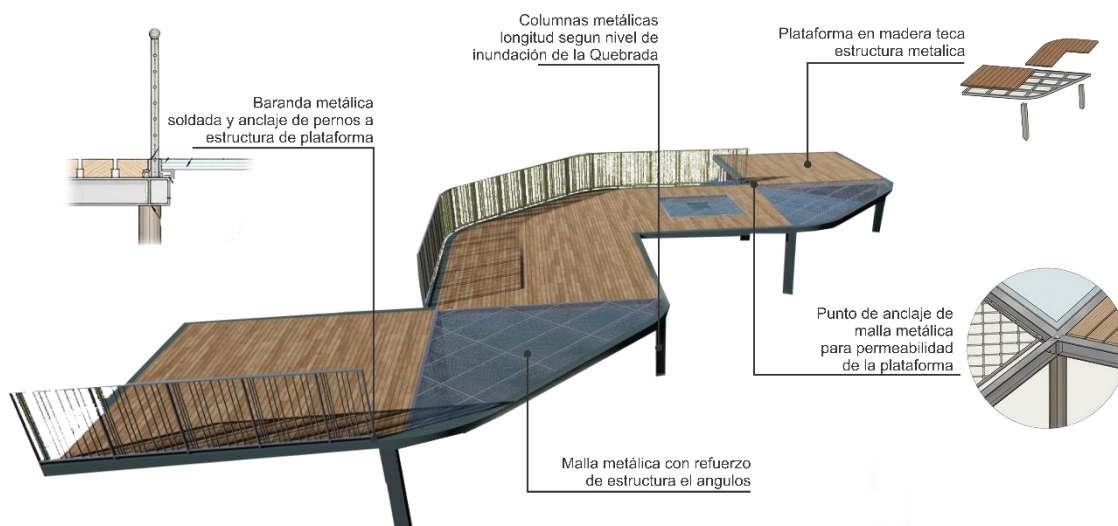


Ilustración 26 Esquema diseño Tipología B, fuente elaboración propia

- **Tipología C (Módulo de Filtro y Recolección):** Se desarrolló una pieza de mobiliario que integra morfológicamente trampas para residuos sólidos, facilitando el saneamiento del cauce.

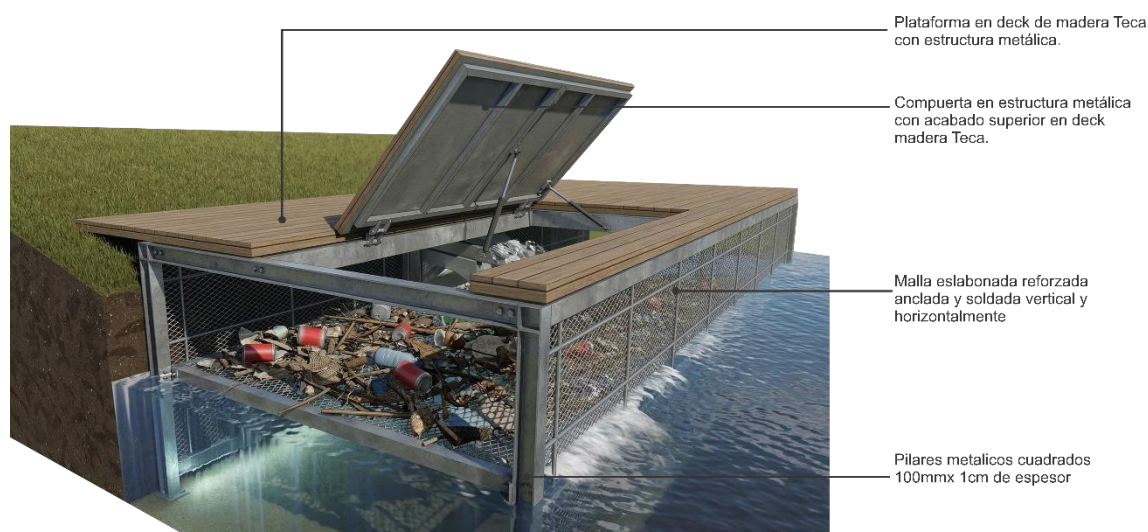


Ilustración 27 Esquema diseño Tipología B, fuente elaboración propia

3. Integración de bioingeniería y validación espacial Como resultado de la fase de evaluación, se comprobó teóricamente la adaptabilidad espacial de los prototipos a la compleja topografía de la ladera de Medellín y su capacidad de respuesta ante las fluctuaciones del caudal. Si bien el cálculo exacto de fluidos requiere simulaciones en software especializado como líneas de trabajo futuras, el modelado digital actual permitió validar la viabilidad hidrodinámica de las tipologías basándose en el principio de conservación de la sección hidráulica y el aumento de la rugosidad del cauce.

Disipación de energía mediante rugosidad (Tipología A): Frente a la infraestructura gris tradicional (muros de concretos lisos que aceleran la escorrentía superficial y aumentan el poder erosivo del agua), el diseño escalonado y la materialidad de gaviones en los muros de contención introducen un coeficiente de rugosidad estratégico. Esta configuración morfológica actúa como un disipador pasivo de energía cinética, reduciendo la velocidad del flujo hídrico durante eventos de lluvias intensas y estabilizando teóricamente el comportamiento hidrodinámico en los tramos de mayor pendiente.

Preservación de la sección transversal geométrica (Tipología B): El modelado paramétrico permitió comprobar que la implantación de las pasarelas elevadas y las plataformas de inundación controlada no generan un efecto de "cuello de botella" u

obstrucción en el canal natural. Al utilizar estructuras soportadas por columnas esbeltas y superficies permeables (mallas metálicas), se garantiza que el área útil de la sección transversal de la quebrada se mantenga libre para la expansión del caudal freático y superficial, mitigando el riesgo de inundaciones súbitas hacia la malla vial urbana.

Comportamiento ante colmatación y arrastre (Tipología C): La validación teórica de los agentes recolectores integró la consideración del arrastre de sedimentos y residuos sólidos urbanos. El diseño paramétrico de la trampa eslabonada se configuró para interceptar elementos flotantes de gran volumen sin bloquear totalmente el paso del agua. Al mantener la permeabilidad horizontal y vertical bajo la tapa de inspección, se evita el efecto presa que comúnmente colapsa los sistemas de canalización ciegos.

Descripción de cambios y evolución del proyecto Durante el desarrollo del proyecto y la fase de ideación, se produjo un cambio de paradigma fundamental respecto a los objetivos iniciales. Originalmente, el planteamiento se inclinaba hacia el diseño de mobiliario urbano tradicional que se ubicaría *alrededor o sobre* la canalización existente de la quebrada para mejorar su estética. Sin embargo, al profundizar en el análisis del riesgo hidrográfico y la desconexión espacial, el proyecto evolucionó hacia una solución mucho más radical y arquitectónica: el mobiliario mismo debía convertirse en la infraestructura de canalización.

Esta evolución conceptual obligó a adaptar las metodologías de trabajo, pasando de un diseño industrial básico a un riguroso modelado BIM (Archicad) y simulaciones de entorno (Lumion) para garantizar que las piezas no solo fueran ergonómicas y estéticas, sino que tuvieran la capacidad estructural de contener el empuje del talud y las dinámicas del agua.

Bordes Activos. Tipologías de mobiliario urbano para la contención hídrica y recuperación socioambiental de quebradas. Laboratorio de diseño en Santa Elena, Medellín



Ilustración 28 Vista planta Zona 1 Quebrada Santa Elena, Fuente: Elaboración propia. Renderizado en Lumion con postprocesamiento iluminación photoshop

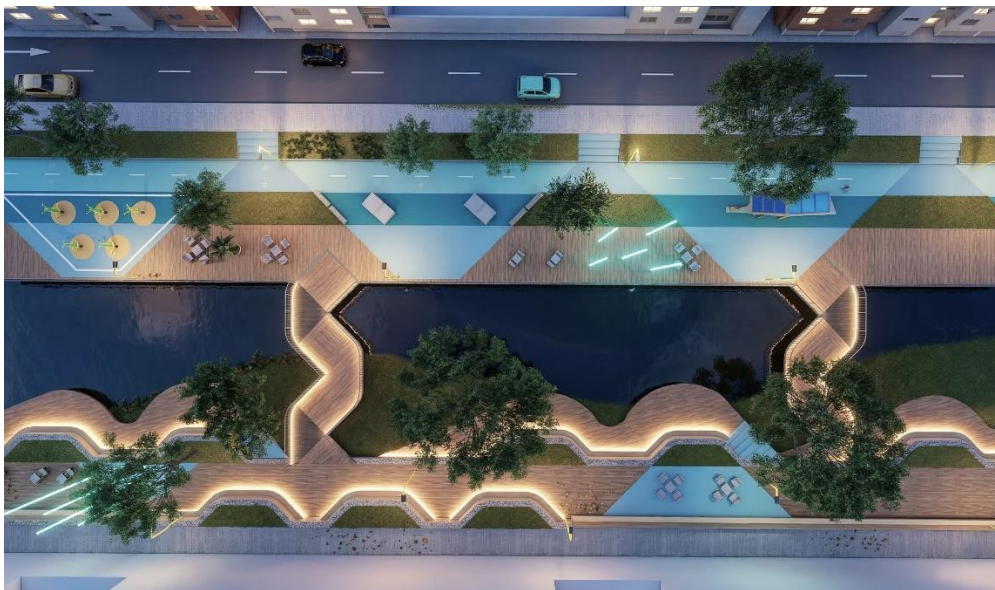


Ilustración 29 Vista planta Zona 2 Quebrada Santa Elena, Fuente: Elaboración propia. Renderizado en Lumion con postprocesamiento iluminación photoshop

Bordes Activos. Tipologías de mobiliario urbano para la contención hídrica y recuperación socioambiental de quebradas. Laboratorio de diseño en Santa Elena, Medellín

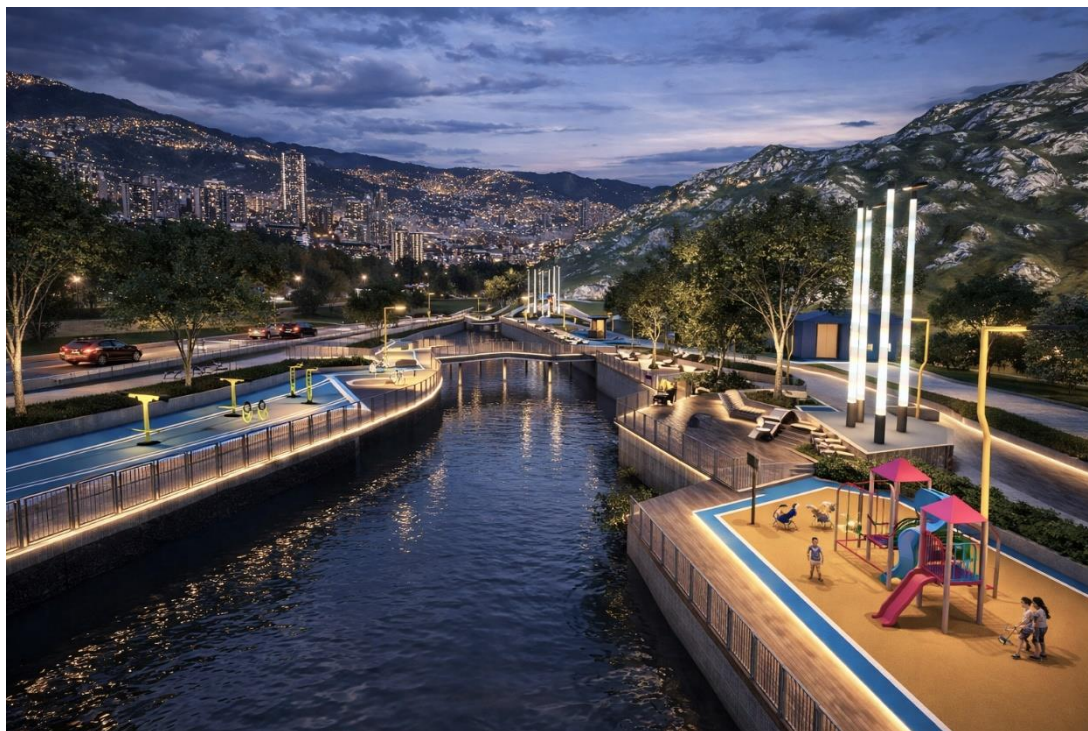


Ilustración 30 Visualización 3D- Zona 1, Fuente: Elaboración propia. Renderizado en Lumion con postprocesamiento de escalas humanas mediante relleno generativo (IA).

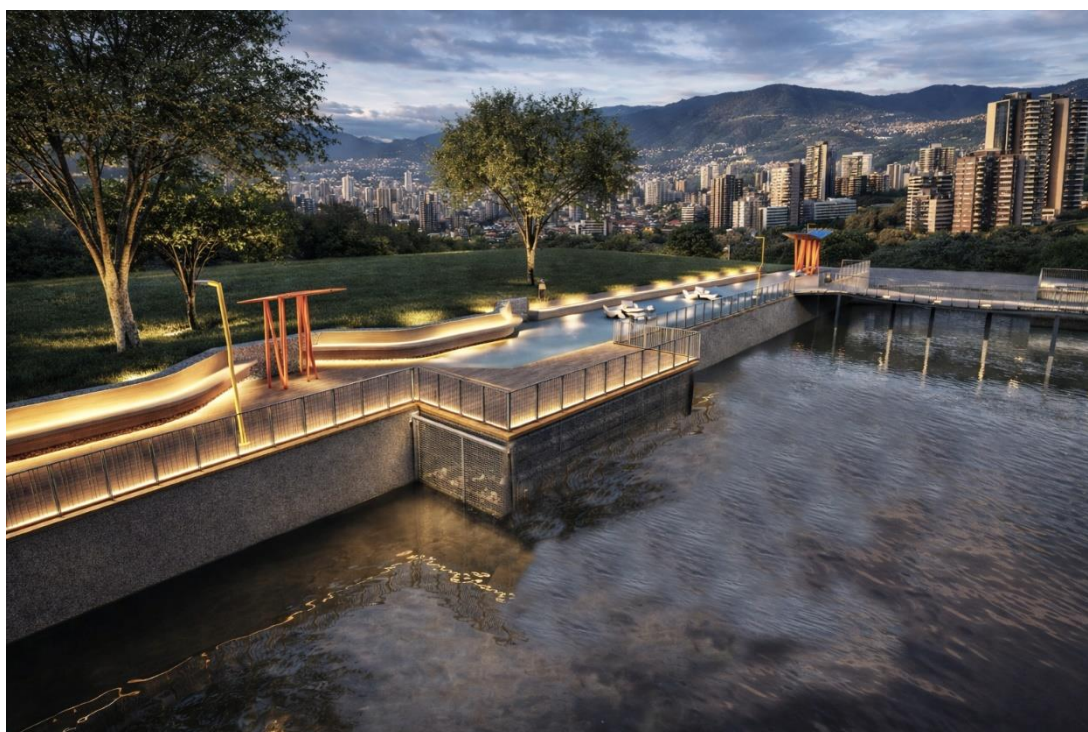


Ilustración 31 Visualización 3D- Zona 1, Fuente: Elaboración propia. Renderizado en Lumion con postprocesamiento iluminación photoshop

Bordes Activos. Tipologías de mobiliario urbano para la contención hídrica y recuperación socioambiental de quebradas. Laboratorio de diseño en Santa Elena, Medellín



Ilustración 32 Visualización 3D- Zona 2, Fuente: Elaboración propia. Renderizado en Lumion con postprocesamiento de escalas humanas mediante relleno generativo (IA).



Ilustración 33 Visualización 3D- Zona 2, Fuente: Elaboración propia. Renderizado en Lumion con postprocesamiento de escalas humanas mediante relleno generativo (IA).

Capítulo 4. DISCUSIÓN

Al evaluar los resultados obtenidos en la formulación de los "Bordes Activos", resulta evidente que transformar el concepto de canalización tradicional en una infraestructura viva y habitable supone un desafío proyectual de alta complejidad. Si bien el ejercicio logró consolidar una alternativa real para la mitigación del riesgo y la recuperación socioambiental de la Quebrada Santa Elena, el desarrollo de estos modelos modulares a través de un ecosistema de software exclusivamente digital suscitó una serie de reflexiones, obstáculos técnicos y readaptaciones metodológicas que es preciso analizar.

Limitaciones tecnológicas y metodológicas Una de las principales discusiones técnicas del proyecto radicó en la aplicación de metodologías BIM (Building Information Modeling) mediante *Archicad* (Graphisoft, 2023) sobre un entorno topográfico altamente orgánico e irregular. Tradicionalmente, este software está optimizado para la edificación ortogonal; por lo tanto, la parametrización de mobiliario modular para que se adaptara fielmente a los taludes sinuosos y erosionados de la ladera de Medellín supuso un desafío de modelado significativo. Esta limitación tecnológica evidenció que, aunque el diseño digital permite una previsualización espacial inmersiva y de alta calidad lograda a través de *Lumion* (2023), la transferencia de estas geometrías a un escenario constructivo real requerirá de estudios de suelos (geotecnia) in situ que el modelo tridimensional no puede calcular con exactitud.

En este sentido, la integración de la Inteligencia Artificial (Gemini) en el flujo de trabajo actuó como un puente entre el rigor técnico del modelado BIM y la necesidad de una comunicación visual efectiva de soluciones complejas de bioingeniería. Si bien el software *Archicad* permitió garantizar la precisión estructural de los 'Bordes Activos' sobre una topografía irregular, la asistencia de la IA en la postproducción de los esquemas (Ilustraciones 12, 13 y 14) permitió una representación más legible y detallada de las texturas y la interacción hídrica. Esta metodología híbrida mitiga las limitaciones propias de las herramientas de representación tradicional, facilitando la transmisión de

conceptos que, por su naturaleza orgánica y sistémica, requieren una definición gráfica que vaya más allá del dibujo técnico convencional.

Adaptación a cambios a lo largo del proyecto. Como se anticipó en los resultados, la metodología inicialmente pensada sufrió una evolución radical. Al comenzar la investigación, la hipótesis se centraba en un enfoque de "embellecimiento" del espacio público, proponiendo bancas y basureros convencionales para los bordes ya canalizados. No obstante, el análisis de las dinámicas hídricas y la vulnerabilidad de la zona obligó a replantear la pregunta de investigación: *¿Por qué diseñar mobiliario para observar un muro ciego, cuando el mobiliario puede reemplazar al muro?* Este cambio de paradigma transformó la escala y la ambición del proyecto. Requirió adaptar la metodología para pasar de un simple diseño industrial a un diseño de bioingeniería e infraestructura táctica. El proyecto se volvió más complejo, exigiendo que cada módulo de concreto no solo fuera ergonómico para el ciudadano, sino estructuralmente capaz de contener el empuje de la tierra y guiar el agua.

Impacto y trascendencia del modelo propuesto. Frente a las soluciones tradicionales de infraestructura gris que aíslan el cuerpo hídrico y generan zonas residuales propensas a la delincuencia, los resultados de este proyecto demuestran teóricamente que es posible integrar la contención y la habitabilidad. La discusión final que plantea este modelo es de carácter político e institucional: la Alcaldía de Medellín y el Área Metropolitana deben dejar de ver la canalización de sus más de 120 quebradas como una obra exclusiva de ingeniería civil (hidráulica), para empezar a entenderla como una oportunidad de diseño urbano y paisajístico.

En conclusión, la metodología implementada demostró ser sumamente útil para previsualizar escenarios futuros y validar tipologías espaciales. Aunque el proyecto posee las limitaciones propias de un ejercicio académico no construido, el impacto de proponer a la Quebrada Santa Elena como un "laboratorio de canalización habitada" sienta un precedente teórico muy fuerte sobre cómo deben ser las ciudades resilientes y esponja del futuro en geografías de alta montaña.

Capítulo 5. CONCLUSIONES

5.1 Conclusiones del trabajo

La conceptualización y validación teórica del modelo de "Bordes Activos" ratifica de manera concluyente la hipótesis inicial de esta investigación: resulta técnica y espacialmente factible transformar la contención hídrica convencional en un sistema de mobiliario urbano vivo y multifuncional. A partir de la aplicación de este diseño en la Quebrada Santa Elena, se extraen las siguientes reflexiones objetivas:

- **Cambio de paradigma en la canalización:** El proyecto demuestra que la contención de laderas y el control de cauces no tienen por qué ser sinónimos de recubrimientos y segregación espacial. El diseño de mobiliario modular multifuncional logra guiar el agua y estabilizar el terreno, configurando al mismo tiempo espacios públicos de alta calidad.
- **Respuesta integral a la vulnerabilidad urbana:** Las tres tipologías diseñadas atacan simultáneamente los tres problemas críticos de la zona: el riesgo hidrográfico por desbordamiento, la acumulación de contaminación y la falta de conciencia ciudadana. Se comprobó teóricamente que el mobiliario puede operar como una herramienta activa de saneamiento y educación ambiental.
- **Escalabilidad del modelo:** Utilizar la Quebrada Santa Elena como laboratorio de diseño resultó ser una estrategia acertada. Al concebir los módulos bajo una metodología paramétrica, el sistema desarrollado posee la flexibilidad geométrica necesaria para ser replicado y adaptado a las condiciones topográficas de las más de 120 quebradas y afluentes que componen la red hídrica de Medellín

5.2 Conclusiones personales

Enfrentarse a la realidad territorial de la Quebrada Santa Elena, supuso, más que un reto académico, una profunda transformación en mi visión profesional del diseño urbano. Al iniciar esta investigación, mi concepción de la intervención en el espacio público estaba

ligada, en gran medida, a la superposición de elementos estéticos y funcionales sobre una infraestructura ya dada. Sin embargo, entender la vulnerabilidad socioambiental de las laderas de Medellín me obligó a comprender que la verdadera arquitectura no debe limitarse a solucionar superficialmente los problemas, sino que tiene el potencial de resolverlos desde su estructura fundamental, operando como una infraestructura viva.

Desde la perspectiva técnica y metodológica, el mayor aprendizaje de este proceso radicó en llevar al límite las capacidades de las herramientas digitales. Adaptar el rigor analítico y ortogonal de la metodología BIM mediante *Archicad* a la topografía sinuosa, orgánica y agreste de los cauces antioqueños fue un ejercicio sumamente exigente. Lograr que esa parametrización geométrica dialogara con las Soluciones Basadas en la Naturaleza, para luego dotarlas de inmersión visual a través de *Lumion*, me permitió madurar como profesional, integrando en un solo modelo el paisajismo, el rigor técnico y la sensibilidad social.

Finalmente, proyectar estos "Bordes Activos" reafirma mi compromiso ético con el futuro de mi ciudad. Redescubrir la Quebrada Santa Elena bajo esta lupa me hizo ser plenamente consciente de la gran deuda histórica que el desarrollo urbano acelerado tiene con nuestros cuerpos de agua. Este trabajo me deja la profunda convicción que, como diseñadores y arquitectos, tenemos no solo la capacidad, sino la responsabilidad ineludible de sanar esa fractura espacial, devolviéndole la dignidad a nuestros ecosistemas y construyendo entornos más seguros e inclusivos para las comunidades que los habitan.

Capítulo 6. FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

De acuerdo con el alcance definido para este proyecto, el cual se enfocó en la ideación, parametrización y validación digital espacial de las tipologías de mobiliario, es importante destacar diversas líneas con las que se podría continuar y potenciar este trabajo. A continuación, se indican aquellos aspectos que, por su naturaleza técnica y operativa, estaban fuera del alcance inicial, pero que resultan fundamentales para desarrollar a futuro el valor de los resultados obtenidos:

- **Prototipado a escala 1:1 y ensayo de materiales:** El paso lógico y más urgente tras la validación en *Archicad* es la fabricación física de un módulo prototipo. Esto permitirá realizar pruebas de campo reales sobre los procesos de prefabricación en concreto, la resistencia de los ensambles modulares y el comportamiento de las especies vegetales seleccionadas para la bioingeniería del talud.
- **Simulaciones hidráulicas y geotécnicas avanzadas:** Aunque el modelo digital comprobó la viabilidad espacial y la adaptabilidad topográfica, a futuro se requiere trasladar estas geometrías a software especializado en dinámica de fluidos (ej. HEC-RAS) y mecánica de suelos. Esto es vital para calcular con exactitud ingenieril el empuje de la tierra sobre la Tipología A y la resistencia al arrastre hidrodinámico de la Tipología B durante eventos de crecidas máximas.
- **Diseño participativo y validación social:** Se propone utilizar las visualizaciones inmersivas logradas en *Lumion* como herramienta pedagógica para realizar talleres de cocreación con los habitantes de la Quebrada Santa Elena. Integrar a la comunidad en el ajuste final de los "agentes recolectores" (Tipología C) garantizará que el diseño responda a las dinámicas socioculturales reales de disposición de residuos del sector.
- **Estandarización como manual de política pública:** A nivel metropolitano, una línea de trabajo de alto impacto es convertir este modelo en una "Guía ilustrada para la mitigación de riesgos y mobiliario verde-azul". El objetivo sería presentar

este catálogo paramétrico ante la Alcaldía de Medellín y el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, buscando su adopción como estándar oficial para futuras intervenciones en los más de 120 afluentes de la ciudad.

Capítulo 7. REFERENCIAS

- Alcaldía de Medellín. (2000). *Decreto Municipal No. 346 de 2000: Sectorización por comunas y barrios del suelo urbano*. Departamento Administrativo de Planeación. <https://www.medellin.gov.co/giscatalogacion/giscatalogacion/api/records/61a04bc9-2991-4495-8491-7f18f40a2972>
- Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia. (2018). *Programa para el mejoramiento integral de la microcuenca Santa Elena, municipio de Medellín*. Área Metropolitana del Valle de Aburrá. https://www.metropol.gov.co/ambiental/recurso-hidrico/Informacionrecursohidrico/PMI-Microcuencas/12-Santa-Elena/PMI_SANTA_ELENA%20.pdf
- Córdova, M., Menoscal, J., & Zapata, P. (2024). Infraestructura verde-azul: Un sistema anticipatorio de resiliencia y sostenibilidad. En A. Carrión, J. Rebotier, P. Metzger, & F. Puente Sotomayor (Eds.), *Gestión de riesgos en Quito* (pp. 45-68). IRD Éditions. <https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.47211>
- Gehl, J. (2014). *Ciudades para la gente*. Ediciones Infinito.
- González Reynoso, A. E., Hernández Muñoz, L., & Perló Cohen, M. (2010). *Rescate de ríos urbanos: Propuestas conceptuales y metodológicas para la restauración y rehabilitación de ríos*. Universidad Nacional Autónoma de México. <http://www.libros.unam.mx/digital/v5/44.pdf>
- Graphisoft. (2023). *Archicad* (Versión 27) [Software de ordenador]. <https://graphisoft.com/es/solutions/archicad>
- Hermida, M. A., Osorio, P., & Cabrera, S. (2021). *Riourbano: Medición, representación espacial y estrategias de diseño para las márgenes de los ríos urbanos*.

Universidad de Cuenca. <https://dspace-test.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/38293>

Hernández-Tapia, G. M. (2017). Ríos urbanos: Análisis de la relación entre el desarrollo urbano y la pérdida de los ecosistemas fluviales. En M. A. Cortés-Lara (Coord.), *Planeación y desarrollo de tecnología: Visiones sustentables de la vivienda y la transformación urbana* (pp. 31-48). ITESO. <https://rei.iteso.mx/handle/11117/5426>

Jacobs, J. (1961). *Muerte y vida de las grandes ciudades*. Random House.

Lumion. (2023). *Lumion 3D rendering software* (Versión 2023) [Software de ordenador]. <https://lumion.com/>

Lydon, M., & Garcia, A. (2015). *Tactical urbanism: Short-term action for long-term change*. Island Press. <https://islandpress.org/books/tactical-urbanism>

Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá [SIATA]. (2026). *Reporte de monitoreo hidrométrico y sección transversal: Estación 537 (Q. Santa Elena - Plaza Minorista) y Estación 858 (Q. Santa Elena - La Paz)*. Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Datos abiertos recuperados de la plataforma SIATA.

Vásquez Hernández, D. (2022). *La (des)humanización de la calle: Formas de habitar la calle como espacio de intermediación entre lo doméstico y la ciudad* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Institucional UNAL. <https://repositorio.unal.edu.co/items/1bddc108-0e75-4e98-bb8c-c6895ac2b7f8>

Google. (2024). *Gemini* [Modelo de lenguaje grande]. <https://gemini.google.com/>

Capítulo 8. ANEXOS

1. Lámina Resumen de la Estrategia Proyectual