

USO DE IMÁGENES TÉRMICAS PARA LA DETECCIÓN DE VERTIMIENTOS EN CUERPOS HÍDRICOS

VERÓNICA MARÍA GUTIÉRREZ LÓPEZ

Trabajo de grado para optar al título de ingeniera ambiental

Engelberth Soto Estrada



**UNIVERSIDAD EIA
INGENIERÍA AMBIENTAL
ENVIGADO
2018**

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

CONTENIDO

	pág.
1. PRELIMINARES	11
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	11
1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO	14
1.2.1 Objetivo General	14
1.2.2 Objetivos Específicos	14
1.3 MARCO DE REFERENCIA	15
1.3.1 QUEBRADA DOÑA MARÍA	15
1.3.2 CONSTRUCCIÓN DE LA LÍNEA BASE	17
1.3.3 CÁMARAS TÉRMICAS	19
2. METODOLOGÍA	31
2.1 CONSTRUCCIÓN DE LA LÍNEA BASE	31
2.1.1 Solicitud de información	32
2.1.2 Clasificación y localización de descargas	32
2.2 IDENTIFICACIÓN DE VERTIMIENTOS POR MEDIO DE IMÁGENES TÉRMICAS	32
2.2.1 Planeación del trabajo en campo	33
2.2.2 Obtención de imágenes térmicas	33
2.2.3 Análisis de las imágenes térmicas	34
2.3 ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD	34
3.PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	35
3.1 CONSTRUCCIÓN DE LA LÍNEA BASE	35

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

3.1.1 Clasificación y localización de descargas	35
3.1.2 Temperatura de cuerpos de agua	39
3.1.3 Temperatura de vertimientos	41
3.2 IDENTIFICACIÓN DE VERTIMIENTOS POR MEDIO DE IMÁGENES TÉRMICAS	43
3.2.1 Planeación del trabajo en campo	43
3.2.2 Obtención de imágenes térmicas	63
3.2.3 Análisis de las imágenes térmicas	77
3.3 ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD	104
3.3.1 Comparación de las descargas registradas con las identificadas	105
4. CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES	111
5. BIBLIOGRAFÍA	113

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

LISTA DE TABLAS

	pág.
<i>Tabla 1:</i> Características morfológicas de la cuenca de la quebrada Doña María	17
<i>Tabla 2:</i> Ventajas y desventajas de las aplicaciones establecidas para los métodos convencional y sensores remotos de infrarrojo	24
<i>Tabla 3:</i> Ventajas y desventajas en la recolección de datos para los métodos convencional y sensores remotos de infrarrojo	26
<i>Tabla 4:</i> ventajas y desventajas para el procesamiento de datos para los métodos convencional y sensores remotos de infrarrojo	27
<i>Tabla 5:</i> Temperatura óptima de algunos organismos	40
<i>Tabla 6:</i> Temperatura promedio de aguas residuales en Colombia	42
<i>Tabla 7:</i> Temperatura promedio de aguas residuales domésticas y cuerpos hídricos sin afectación en Colombia y en Estados Unidos	43
<i>Tabla 8:</i> Resumen de los vertimientos encontrados en las salidas de campo	76
<i>Tabla 9:</i> Temperaturas de cuerpos hídricos sin alteración aparente	84
<i>Tabla 10:</i> Temperatura estimada de los cuerpos de agua, de los vertimientos y de las zonas de mezcla	103
<i>Tabla 11:</i> Ventajas y desventajas de las tecnologías térmicas para la detección de vertimientos con precios estimados	109

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

LISTA DE FIGURAS

	pág.
<i>Ilustración 1.</i> El río Medellín amaneció de color rojo	13
<i>Ilustración 2.</i> Por tercer día consecutivo tiñen las aguas de río Medellín	13
<i>Ilustración 3:</i> Funcionamiento de una cámara térmica	19
<i>Ilustración 4.</i> Objetos con la misma temperatura y diferentes emisiones de energía	20
<i>Ilustración 5:</i> Caracterización térmica de un vertimiento y del cuerpo de agua en Virginia.	22
<i>Ilustración 6:</i> Caracterización térmicamente de flujos de agua subterránea y evaluación rápida de las zonas de mezcla térmica en Virginia.	22
<i>Ilustración 7:</i> Descarga de central termoeléctrica en Carlsbad, CA	23
<i>Ilustración 8:</i> Detección de un sobrecalentamiento de una de las fases de un sistema eléctrico.	29
<i>Ilustración 9:</i> Efecto de un acelerador de circulación de la sangre que se aplica a las regiones de dolor muscular o rigidez para aliviar los síntomas. (imagen de la izquierda está sin tratamiento, imagen de la derecha con tratamiento)	29
<i>Ilustración 10:</i> Diseño metodológico del proyecto	31
<i>Ilustración 11:</i> Crecimiento en micrófitos en cuerpos de agua en España	41
<i>Ilustración 12:</i> Construcción de una imagen panorámica	47
<i>Ilustración 13:</i> Configuración del proyecto en la plataforma <i>ODK Built</i>	49

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

<i>Ilustración 14:</i> Sincronización del proyecto <i>ODK built</i> con la interfaz <i>Google Cloud</i>	50
<i>Ilustración 15:</i> App para celular <i>ODK Collect</i>	51
<i>Ilustración 16:</i> Almacenamiento de la información de campo en la web	52
<i>Ilustración 17:</i> Eje trazado para establecer el perfil de temperatura del cuerpo hídrico	56
<i>Ilustración 18:</i> Área del cuerpo hídrico que contiene el vertimiento.	57
<i>Ilustración 19:</i> Recorte del raster que contiene el área de interés	58
<i>Ilustración 20:</i> Línea representativa en dirección del vertimiento (línea roja)	58
<i>Ilustración 21:</i> Líneas perpendiculares a la línea del para establecer zonas de interés (líneas negras zona 1, zona 3 y zona 3)	59
<i>Ilustración 22:</i> Conversión del formato de las líneas para almacenar la información de temperatura	59
<i>Ilustración 23:</i> Transformación de los rasters en capas de puntos para exportar la tabla de atributos a un archivo en Excel	60
<i>Ilustración 24:</i> Tabla de atributos de las capas de puntos con información de temperatura de cada pixel	61
<i>Ilustración 25:</i> Procedimiento general para obtener los perfiles de temperatura en cuerpos hídricos	62

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

RESUMEN

El control de vertimientos de aguas residuales es aún un reto en Colombia. En este proyecto se examinó el uso de imágenes térmicas para la detección de vertimientos en quebradas. Dado que no se identificaron antecedentes sobre el uso de esta tecnología en labores de control de vertimientos, el proyecto debió iniciar con la elaboración de una línea de base para comparar las mediciones térmicas. Para ello se solicitó información sobre localización de vertimientos a las autoridades ambientales y se consultó la literatura, nacional e internacional, sobre límites máximos permisibles de temperatura para descargas de agua residual. Posteriormente, en la segunda etapa del proyecto se realizaron visitas a cuatro cuerpos de agua para obtener imágenes térmicas: quebradas Doña María en Itagüí, La Mosca y Las Palmas en el sector de Alto de Las Palmas y el río Rionegro. Con esta información se estimaron las temperaturas media, mínima y máxima de los sectores visitados, y se elaboraron perfiles de temperatura longitudinales (en el sentido del flujo) y transversales. Estos perfiles permitieron determinar, en los sitios donde se identificaron vertimientos, la temperatura del vertimiento, la temperatura del agua y la temperatura y extensión de la zona de mezcla. Finalmente, se compararon los resultados con la línea de base para establecer la pertinencia de esta tecnología para este uso. Los resultados mostraron que esta tecnología puede tener un uso limitado si solo se examinan descargas de tipo doméstico, ya que las diferencias de temperatura entre éstas y los cuerpos de agua son de alrededor de dos grados centígrados. Por otra parte, también fue evidente que la efectividad de las imágenes térmicas depende de la radiación solar. Por ejemplo, en horas de la tarde las superficies artificiales que suelen encontrarse en quebradas en zonas urbanas (como concreto o metal) pueden calentarse más que la descarga de agua residual, lo que puede enmascarar los resultados. A pesar de lo anterior, se considera que este trabajo puede ser el inicio de una discusión sobre la necesidad de caracterizar térmicamente los cuerpos de agua del país, ya que se considera que los límites máximos permisibles son laxos (40 °C para descargas de agua residual) en comparación con los de países desarrollados (máximo un grado más que el

promedio semanal del cuerpo receptor según la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América).

Palabras claves: vertimiento, imagen térmica, temperatura, cuerpos de agua

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

ABSTRACT

The control of wastewater discharges is still a challenge in Colombia. In this project the use of thermal images for the detection of wastewater discharge in streams was examined. Given that no background was found on the use of this technology in the control of dumping, the project had to start with the development of a baseline to compare the thermal measurements. To this end, information was requested on location of discharges to the environmental authorities and the literature, national and international, on maximum permissible temperature limits for wastewater discharges was consulted. Later, in the second stage of the project, visits were made to four bodies of water to obtain thermal images: Doña María streams in Itagüí, La Mosca and Las Palmas in the Alto de Las Palmas sector and the Rionegro river. With this information, the average, minimum and maximum temperatures of the sectors visited were estimated, and longitudinal (in the direction of flow) and transversal profiles were elaborated. These profiles allowed to determine, in the sites where discharges were identified, the temperature of the wastewater discharge, the temperature of the water and the temperature and exemption of the mixing zone. Finally, the results were compared with the baseline to establish the relevance of this technology for this use. The results showed that this technology can have a limited use if only domestic discharges are examined, since the temperature differences between these and the bodies of water are around two degrees centigrade. On the other hand, it was also evident that the effectiveness of thermal images depends on solar radiation. For example, in the afternoon artificial surfaces that are usually found in streams in urban areas (such as concrete or metal) can heat up more than the discharge of wastewater, which can mask the results. In spite of the above, it is considered that this work may be the beginning of a discussion about the need to thermally characterize the country's water bodies, since it is considered that the maximum permissible limits are lax (40 ° C for water discharges residual) compared to those of developed countries (maximum one degree more than the weekly average of the receiving body according to the Environmental Protection Agency of the United States of America).

Keywords: shedding, thermal image, temperature, bodies of water

INTRODUCCIÓN

Los mecanismos actuales de control y vigilancia que realizan las autoridades ambientales en cuerpos de agua al parecer no son suficientes para evitar la afectación y contaminación de los cuerpos hídricos. En Medellín, la autoridad ambiental realiza visitas de control y vigilancia, otorga permisos de vertimientos a instituciones, empresas u otras instalaciones que generen descargas de aguas residuales, y atiende quejas y reclamos. Sin embargo, el río Aburrá se ha visto afectado en diversas ocasiones durante los últimos 3 años, lo cual afirma la existencia de vertimientos ilegales en Medellín.

Actualmente, la tecnología infrarroja permite detectar la ubicación de vertimientos en función de la temperatura. El contraste de temperaturas generado por el contacto del cuerpo hídrico con las descargas de agua residual (doméstica o industrial) son detectadas por imágenes térmicas, lo que facilita la identificación y ubicación del vertimiento. En este proyecto se analizó la factibilidad de utilizar imágenes térmicas para apoyar las labores de control de las autoridades ambientales.

El proyecto consistió en identificar vertimientos por medio de imágenes térmicas y compararlos con la base de datos suministrada por la autoridad ambiental. Las zonas de estudio fueron las quebradas Doña María, Las Palmas, La Mosca y el río Rionegro. En estos lugares se tomaron varias fotos térmicas usando una cámara de captura de imágenes por infrarrojo Fluke i100, las cuales fueron analizadas por medio de la construcción de perfiles de temperatura con base al estudio de Antonelli (2017).

En este informe se incluyen mediciones realizadas en cuatro cuerpos hídricos: quebradas Doña María, La mosca, Las Palmas y el río Rionegro. En los tramos analizados se calcularon perfiles de temperatura con las imágenes térmicas obtenidas. Se comparó, además, la localización de los vertimientos identificados con imágenes térmicas con los disponibles en bases de datos del AMVA.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

1. PRELIMINARES

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El agua ha sido uno de los recursos naturales más explotados y usado por el hombre para satisfacer sus necesidades. Se utiliza en los procesos de urbanización, industrialización, agricultura y demás actividades humanas, las cuales contaminan el agua (Goel, 2006). Se considera que el agua está contaminada cuando no es apta para beber ni para uso doméstico, agrícola, industrial o recreativo. Es decir, el agua debe cumplir con ciertos requerimientos o condiciones para que mantenga un ecosistema equilibrado y garantice unos determinados objetivos de calidad ecológica (UE, 2007).

Para reducir y controlar las sustancias contaminantes que llegan a los ríos, embalses, lagunas, cuerpos de agua naturales o artificiales de agua dulce y al sistema de alcantarillado público, la legislación colombiana exige a las autoridades ambientales vigilar y controlar los vertimientos de aguas residuales. Para cumplir tal fin existen mecanismos como la visita de control y vigilancia, la adquisición de permisos de vertimientos por parte de las instituciones, empresas u otras instalaciones que generen descargas de aguas residuales, y la atención a quejas y reclamos.

Las visitas de control tienen como objetivo conocer la actividad económica generadora del vertimiento, clasificar sus aguas (si son aguas residuales domésticas o no domésticas), establecer el uso del agua y comprobar si el usuario tiene algún sistema de tratamiento para sus aguas residuales antes de verterlas al alcantarillado. También se indaga sobre la última caracterización y con qué frecuencia se mantiene la planta de tratamiento en caso de tenerla y, por último, se verifica el permiso de vertimientos y si no se cuenta con éste se le solicita al usuario que inicie el trámite ante la entidad encargada en su jurisdicción (AMVA, 2017).

Los permisos de vertimientos son otro mecanismo para controlar y vigilar las descargas de agua residual. Éstos se definen en el Decreto 3930 de 2010 como *“aquel permiso que autoriza la autoridad ambiental a toda persona natural o jurídica para que realice las descargas de aguas residuales generadas de sus actividades domésticas y/o productivas a un cuerpo de agua, al suelo u otro medio, previo tratamiento de las mismas”* (AMVA, 2017). Entre los requerimientos para la obtención del permiso de vertimiento y cumpliendo con los decretos 1594 de 1984, 1541 de 1979 y 2811 de 1974 se encuentran: realizar el plano donde se identifique

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

el origen, la cantidad y la localización georreferenciada de las descargas al cuerpo de agua o al suelo, la localización del predio, el proyecto, la obra o la actividad y las características de las actividades que generan el vertimiento, todo ello con el fin de identificar y caracterizar los tipos de descarga de aguas residuales que se generan en un territorio específico (AMVA, 2017).

A pesar de lo anterior, se presume que estas medidas no están siendo suficientes para garantizar un adecuado manejo de los vertimientos industriales y domésticos en Colombia. Por ejemplo, el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA) es la autoridad ambiental para el sector urbano de los municipios de Medellín, Barbosa, Girardota, Copacabana, Bello, Envigado, Itagüí, La Estrella, Sabaneta y Caldas. Cuenta con 12 profesionales del área ambiental que se encargan de hacer las visitas de control y vigilancia a entidades, instituciones y empresas generadoras de vertimientos. El AMVA ha establecido convenios con la Universidad Pontificia Bolivariana para atender al menos 1000 usuarios de una lista de posibles generadores de vertimientos de aguas residuales no domésticas al alcantarillado suministrada por EPM (AMVA, 2017). A pesar de ello, se han registrados eventos de contaminación del río Medellín durante los últimos años.

Los más evidentes, aunque no los únicos, son los que han involucrado la coloración del río Medellín, los cuales han evidenciado la existencia de vertimientos ilegales en Medellín. El día 31 de octubre de 2015 se observó un tono rojizo en el río en la zona sur del Valle de Aburrá (Vásquez, 2015), ver ilustración 1. En el mismo año, el AMVA reportó entre el 1 de agosto y el 9 de septiembre coloración morada del río Medellín (Vásquez, 2015). El 27 de julio de 2017 el río presentó un tono azul (ver ilustración 2) y al día siguiente una coloración rojiza entre la estación Ayurá y Aguacatala (Quintero, 2017).



Ilustración 1. El río Medellín amaneció de color rojo

Fuente: (Medellín, 2015)



Ilustración 2. Por tercer día consecutivo tiñen las aguas de río Medellín

Fuente: (Medellín, 2017)

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

La coloración del río Medellín ocurrida en estos eventos es un posible indicio de la carencia de rigurosidad de los mecanismos actuales de control y vigilancia que ejercen las autoridades ambientales sobre los vertimientos en zonas urbanas. Se sospecha que, en la mayoría de los casos, las autoridades desconocen el lugar de generación del vertimiento, lo que dificulta las labores de control.

La tecnología termográfica ha sido utilizada para detectar vertimientos en función de la temperatura. Las últimas y más avanzadas metodologías evalúan la temperatura de la corriente utilizando sensores remotos infrarrojos basados en imágenes térmicas ubicadas generalmente en aeronaves o utilizando imágenes satelitales (Lezzi & Todisco, 2015).

El uso de esta tecnología en otro sitios, como el caso de estudio en la cuenca del río Attert, ubicado en el noroeste del Grand Duchy en Luxemburgo, para visualizar la confluencia de arroyos e identificar la ubicación del frente de mezcla entre dos fuentes de aguas diferentes (Antonelli, et al. 2017), motivó esta propuesta de investigación, que pretendió producir los primeros datos sobre la factibilidad de utilizar imágenes térmicas para apoyar las labores de control de las autoridades ambientales en la identificación de vertimientos en Colombia. Para ello se analizaron distintos cuerpos de agua como la quebrada Doña María en Itagüí, la cual está rodeada por áreas industriales, y la quebrada La Mosca en Guarne, que se localiza en un entorno residencial.

1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO

1.2.1 Objetivo General

Evaluar el uso de imágenes térmicas como herramienta para la identificación de descarga de aguas residuales en cuerpos hídricos en Antioquia.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Construir la línea de base mediante la recopilación de información de los vertimientos de aguas residuales registrados ante las autoridades ambientales de Antioquia.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

- Identificar vertimientos de aguas residuales en cuerpos hídricos de Antioquia utilizando imágenes térmicas.
- Evaluar la factibilidad de utilizar imágenes térmicas para la detección de aguas residuales comparándola con la base de datos oficial que tiene las autoridades ambientales.

1.3 MARCO DE REFERENCIA

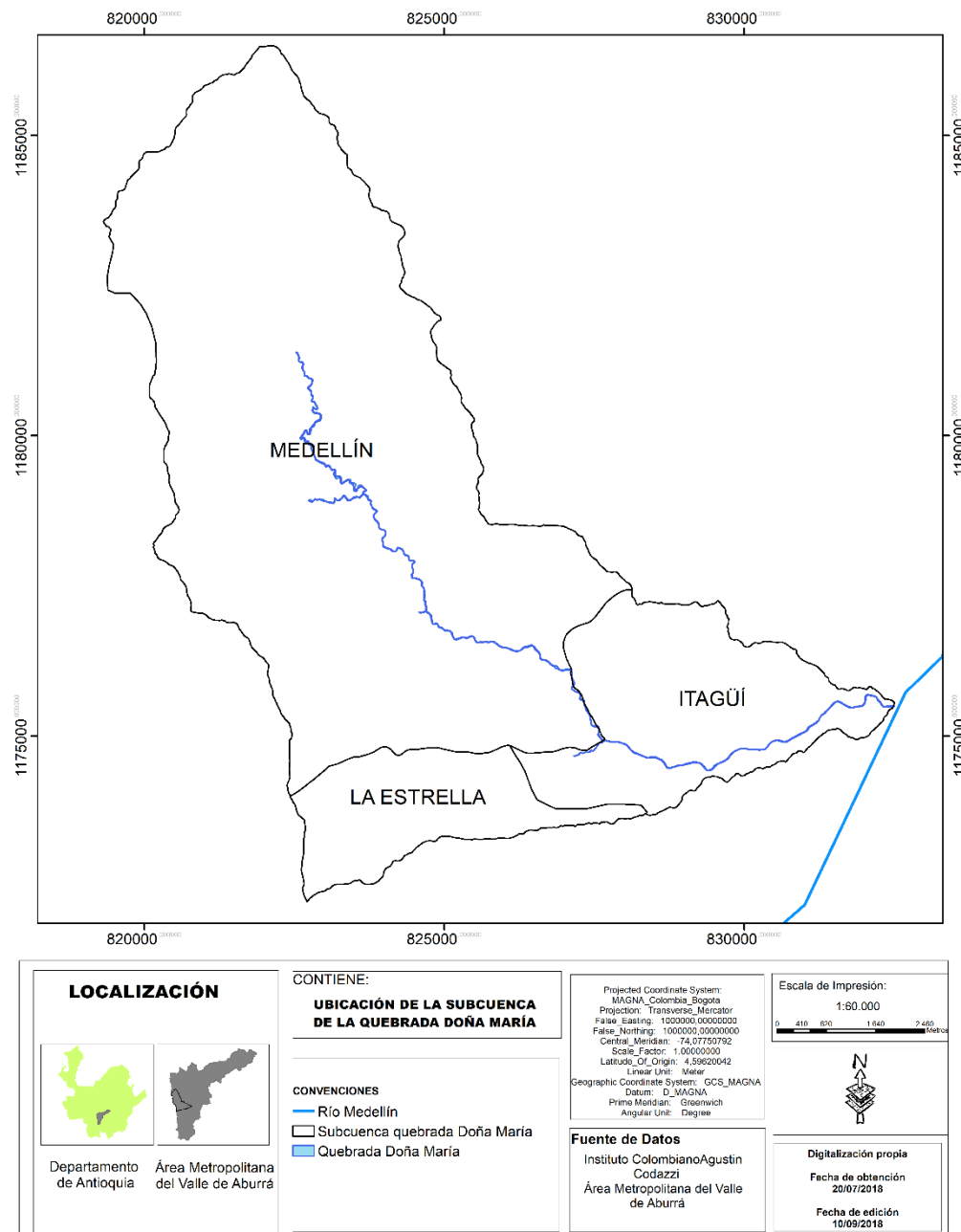
Para el desarrollo del proyecto se consideraron diversos métodos de análisis, los cuales se fueron utilizando y adaptando a las condiciones de los casos de estudio. Inicialmente, se tenía previsto analizar una quebrada desde su nacimiento hasta su descarga, de manera que se lograra identificar el impacto térmico a su paso por una zona urbana. Esta es la razón por la cual la sección siguiente describe a fondo la quebrada Doña María, localizada en el municipio de Itagüí. No obstante, la implementación de la tecnología térmica en una zona como esta no fue sencilla, desde el punto de vista del acceso al cuerpo de agua y desde el punto de vista de la seguridad para la investigadora y el equipo. Debido a ello, en el transcurso del documento el alcance se modificó y se analizaron otros cuerpos de agua que no aparecen documentados detalladamente en el marco de referencia.

1.3.1 QUEBRADA DOÑA MARÍA

La quebrada Doña María está ubicada en el departamento de Antioquia en la zona sur occidente de la cuenca del río Aburrá, en la ladera occidental del valle entre los municipios de Medellín, Itagüí y La Estrella. Limita al sur con la subcuenca de la quebrada La Grande, al norte con la subcuenca de la quebrada La Iguaná, al occidente con los municipios Ebéjico y Heliconia y al oriente con el río Aburrá y las subcuencas de las quebradas la Jabalcona, La Picacha, Altavista y La Hueso (Zapata Restrepo & Cano, 2013). Su jurisdicción está a cargo de CORANTIOQUIA en áreas rurales (69%) y el AMVA en las áreas urbanas (31%).

La microcuenca de la quebrada Doña María está delimitada por el corregimiento de San Antonio de Prado (Municipio de Medellín) en la parte alta, la vereda San José del municipio de La Estrella en la parte media y en su mayor área, la parte baja, se encuentra el municipio de Itagüí (AMVA, 2008), ver Mapa 1.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



Mapa 1: Localización de la microcuenca de la quebrada Doña María en el Valle de Aburrá

Fuente: Elaboración propia con información de AMVA y UNAL 2006

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

La ganadería de tipo lechero y las granjas dedicadas al engorde de porcinos son las principales actividades socioeconómicas en la parte alta de la subcuenca. A medida que se avanza hacia la desembocadura, el ambiente torna de una zona rural a un sector urbano industrializado, en su mayoría perteneciente al municipio de Itagüí (Zapata Restrepo & Cano, 2013). Entre las principales actividades industriales de la zona urbana de la subcuenca se destacan la fabricación de cerveza, textiles y empresas dedicadas a la curtiembre (Alcaldía de Itagüí, 2017).

En la tabla 1 se describen las características morfológicas de la subcuenca de la quebrada Doña María.

Característica morfológica	Valor
Área de la subcuenca	75,85 km ²
Pendiente promedio	5,57%
Longitud del cauce	25,88 km
Temperatura	16,41 °C
Precipitación promedio	2121,58 mm/año

Tabla 1: Características morfológicas de la cuenca de la quebrada Doña María

Fuente: (Zapata Restrepo & Cano, 2013)

1.3.2 CONSTRUCCIÓN DE LA LÍNEA BASE

La construcción de la línea base proporciona información para monitorear y evaluar el progreso y eficacia de un proyecto (ONU Mujeres, 2017). Para tal fin, se puede utilizar bases de datos, encuestas, mapas, entre otras herramientas que permitan describir la situación actual de la problemática a tratar.

En Colombia, la Resolución 0631 de 2015 establece *“los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público”*. La norma permite controlar las sustancias contaminantes que llegan a los cuerpos de agua generadas por 73 actividades productivas presentes en ocho sectores económicos del país (MINAMBIENTE, 2017). Mide cada parámetro físico-químico en unidades de

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

concentración (mg/l) dependiendo de la actividad productiva para ser más exigente en los casos que se requiera.

La Resolución 0631 de 2015 define los siguientes criterios para establecer la línea base del proyecto:

Aguas residuales domésticas (ARD): son las procedentes de los hogares, así como de las instalaciones en las cuales se desarrollan actividades industriales, comerciales o de servicios y que correspondan a:

1. Descargas de los retretes y servicios sanitarios.
2. Descargas de los sistemas de aseo personal (duchas y lavamanos), de las áreas de cocinas y cocinetas, de las pocetas de lavado de elementos de aseo y lavado de paredes pisos y del lavado de ropa.

Aguas residuales no domésticas (ARnD): son las procedentes de las actividades industriales, comerciales o de servicios, distintas a las que constituyen aguas residuales domésticas.

Parámetro de temperatura en vertimientos: para todas las actividades industriales, comerciales o de servicios que realicen vertimientos puntuales de aguas residuales a un cuerpo de agua superficial o a los sistemas de alcantarillado público, tendrán en el parámetro de temperatura como valor límite máximo permisible el de 40,0 °C.

Para las actividades industriales, comerciales o de servicios excepto la generación de energía eléctrica por procesos térmicos (termoeléctricas), que realicen vertimientos puntuales de aguas residuales a cuerpos de aguas superficiales, la diferencia de los valores de temperatura en la zona de mezcla térmica del cuerpo de agua superficial receptor con respecto a la temperatura del mismo antes del punto de vertimiento puntual, a una distancia máxima de cien metros deberá ser menor o igual a 5,00 °C, considerando para las mediciones y determinaciones la sección transversal y perpendicular del cauce del cuerpo de agua receptor.

A nivel internacional, la agencia de protección ambiental de Estados Unidos (EPA) aseguró la protección de los ambientes marinos contra efectos térmicos al establecer un aumento máximo permisible en la temperatura promedio semanal de sólo un 1 °C (1.8 F) en cuerpos marinos que reciben vertimientos artificiales para todas las estaciones del año (EPA, 2007).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

1.3.3 CÁMARAS TÉRMICAS

Todos los cuerpos por encima del cero absoluto ($-273\text{ }^{\circ}\text{C}$) emiten radiación infrarroja (calor). En general, cuanto mayor es la radiación emitida, mayor es la temperatura del cuerpo. La radiación infrarroja se sitúa entre la luz visible y la radiación de microondas, es decir, aquella que se encuentra entre las 0,7 y las 1000 micras (PROMAX, 2017).

Una cámara termográfica o cámara térmica es una cámara que muestra en pantalla una imagen de la radiación calorífica que emite un cuerpo. De manera general, las cámaras térmicas funcionan así: contienen un sensor térmico llamado microbolómetro capaz de calentarse al recibir radiación infrarroja y cambiar su resistencia eléctrica. Este cambio de resistencia se mide y se equipara a una determinada temperatura, siendo asignado un color para cada temperatura y formando una imagen coloreada que será la que vemos en pantalla (PROMAX, 2017).

La energía infrarroja (A) que proviene de un objeto se hace converger, por medio de la óptica (B), sobre un detector de infrarrojo (C), ver ilustración 3. El detector envía la información al conjunto sensor electrónico (D) para que se procese una imagen. El conjunto electrónico utiliza los datos que provienen del detector para crear una imagen (E) que puede verse en el visor o en un monitor de vídeo o pantalla LCD corriente (FLIR, 2017).

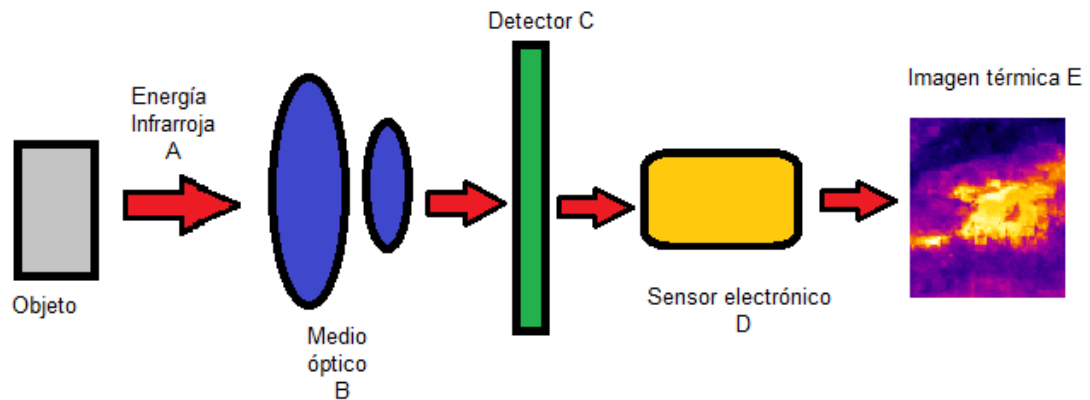


Ilustración 3: funcionamiento de una cámara térmica

Fuente: (FLIR, 2017)

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

La temperatura registrada en las cámaras térmicas se ve afectada por las características superficiales del objeto, el color y el tipo de material. Es por ello que para la misma temperatura dos materiales pueden irradiar energía infrarroja con distintas intensidades debido a la diferencia de emisividades (Amperis Products S.L, 2018). Por ejemplo, en la ilustración 4 se ven dos objetos (la cinta y la taza) que están a la misma temperatura, pero que emiten energía infrarroja con distintas intensidades.

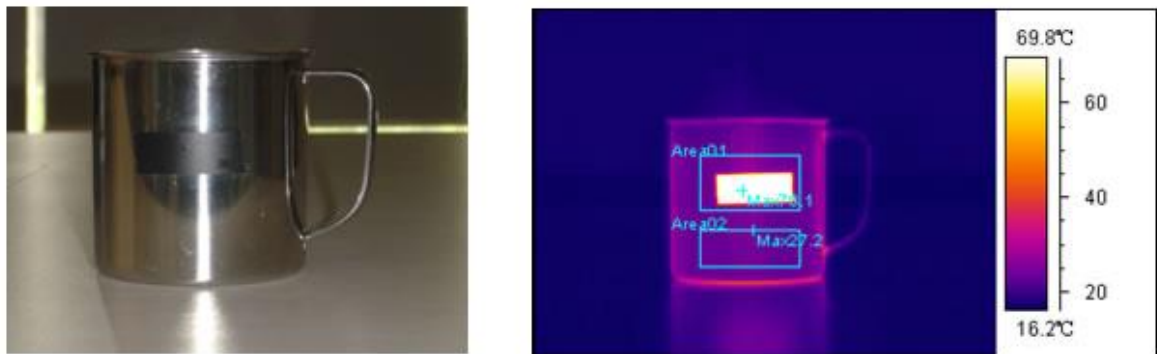


Ilustración 4. Objetos con la misma temperatura y diferentes emisiones de energía

Fuente: (Amperis, 2007)

Para entender mejor el fenómeno, se formula el concepto de cuerpo negro. Un cuerpo negro absorbe toda la radiación incidente, sin importar la longitud de onda y la dirección (Incropera & De Witt, 1999). La emisividad es una medida de la capacidad de un material para irradiar y absorber energía (Gutiérrez Claverol, 1993), se entiende como el cociente entre la energía infrarroja emitida por el objeto y la emitida por un cuerpo negro (Amperis Products S.L, 2018).

USOS DE LAS CÁMARAS TÉRMICAS

El servicio geológico de Estados Unidos, USGS por sus siglas en inglés, utiliza cámaras térmicas en estudios de interacción de aguas subterráneas / aguas superficiales y otras investigaciones en las cuales el tema térmico es de interés. Handcock et al. en su artículo “Thermal infrared remote sensing of water temperature in riverine landscapes” describieron el estado del arte sobre la utilización de imágenes térmicas para monitorear la calidad del agua, identificar fuentes de agua fría y desarrollar modelos de temperatura de ríos (Handcock et al,

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

2012). Ling et al. 2017 evaluaron la herramienta de imágenes térmicas satelitales para determinar contaminación térmica aguas abajo de represas en ríos grandes (Ling et al., 2017). Antonelli, Klaus, Smettem, Teuling, & Pfister investigaron el potencial de las cámaras térmicas infrarrojas (TIR) para proporcionar información rápida sobre la dinámica de la mezcla de agua en corrientes a pequeña escala (Antonelli et al., 2017).

Las cámaras térmicas infrarrojas permiten registrar rápidamente las variaciones en tiempo real de la temperatura en cuerpos de agua. Detectan rápidamente anomalías térmicas en un tiempo real a una escala de centímetros a decenas de metros (USGS, 2017). La información puede ser utilizada para:

- Localizar descargas de agua subterránea (USGS, 2017).
- Ayudar a caracterizar las condiciones hidrogeológicas locales, y optimizar las ubicaciones de muestreo y monitoreo (USGS, 2017).
- El tamaño de las cámaras las convierte en herramientas convenientes para estudios en entornos urbanos densos, así como en sitios de campo remotos (USGS, 2017).
- Monitorear la calidad del agua e identificar fuentes de agua fría (Lezzi & Todisco, 2015)
- Desarrollar modelos de temperatura de ríos (Handcock et al., 2012)
- Proporciona un enfoque alternativo para monitorear la contaminación térmica aguas abajo de las represas en ríos grandes (Ling et al, 2017).

En el Centro de Ciencias del Agua de Virginia en Estados Unidos se usó una cámara de imagen térmica en la primavera de 2012 para apoyar las actividades de restauración de la trucha de arroyo. La herramienta fue útil para caracterizar térmicamente los flujos de agua subterránea, delimitar la extensión de las áreas del arroyo que las truchas de arroyo buscan para la termorregulación, y evaluar rápidamente las zonas de mezcla térmica (USGS, 2017). Ver ilustraciones 5 y 6.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

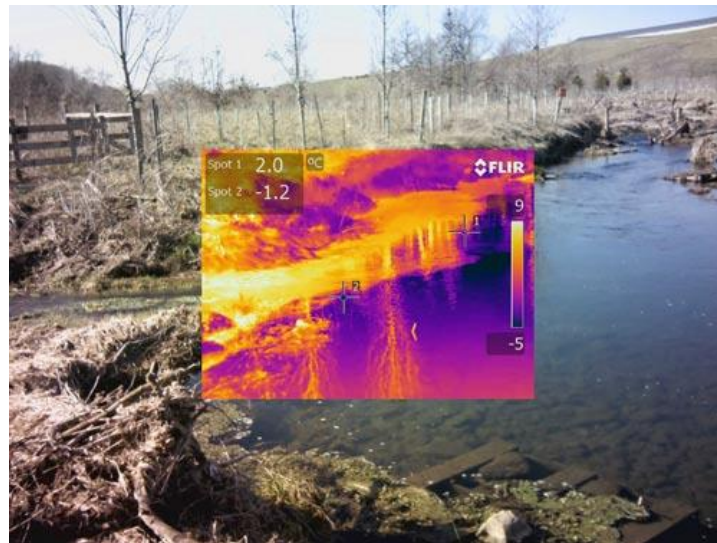


Ilustración 5: Caracterización térmica de un vertimiento y del cuerpo de agua en Virginia.

Fuente: (USGS, 2017).

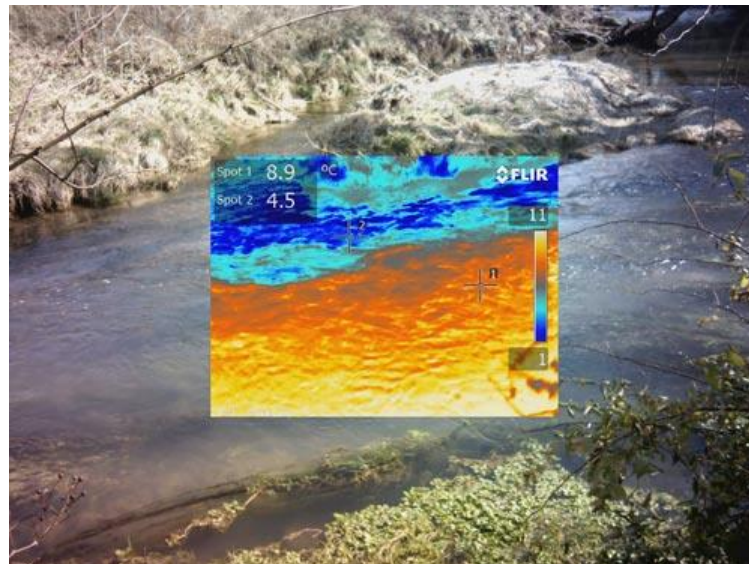


Ilustración 6: Caracterización térmicamente de flujos de agua subterránea y evaluación rápida de las zonas de mezcla térmica en Virginia.

Fuente: (USGS, 2017).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

La evaluación de vertimientos de centrales termoeléctricas es otro uso potencial de la tecnología térmica. Algunas descargas no son visibles, pero se pueden evidenciar mediante imágenes de radiación infrarroja térmica. En la ilustración 7 se señalan los efluentes cálidos de una planta de energía en Carlsbad, California que ingresa al océano.

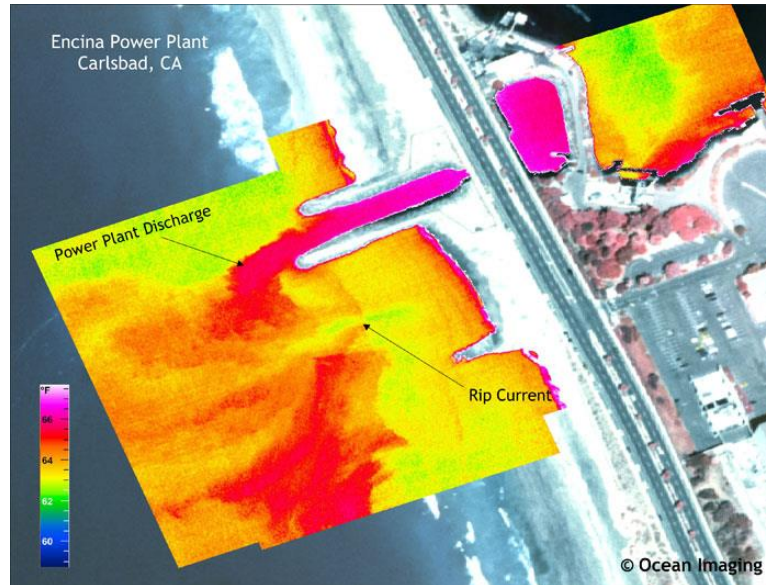


Ilustración 7: Descarga de central termoeléctrica en Carlsbad, California

Fuente: (Ocean imaging, 2018)

Existen diferentes métodos que permiten evaluar la temperatura en cuerpos hídricos: los convencionales que son los más utilizados refiriéndose a los termómetros tradicionales y los sensores remotos que miden la radiación infrarroja TIR utilizados para adquirir imágenes térmicas (Lezzi & Todisco, 2015).

Las imágenes térmicas se pueden obtener a nivel de terreno, mediante el uso de aeronaves o utilizando satélites. En la tabla 2 se resumen las principales aplicaciones para cada ensamble, con su respectivas ventajas y desventajas.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Método	Aplicaciones	
	Ventajas	Desventajas
Convencional	• La temperatura puede ser medida directamente, lo cual es tanto de interés biológico como aplicable a objetivos de manejo	• Dificultad para recolectar información a escala espacial suficiente para calibrar modelos de temperatura del agua en cuencas.
Sensores remotos de infrarrojo	• Mediciones repetibles, espacialmente extensas y sistemáticas • Se pueden cuantificar patrones de temperatura en corrientes, ríos y llanuras de inundación en escalas desde 1m a 100km • Se puede observar el contorno completo de temperatura y no solo valores puntuales • Información consistente para llanuras de inundación y calibración de modelos de temperatura de corrientes • Imágenes térmicas (TIR) y NIR pueden ser utilizadas para evaluar tanto la superficie del agua como las áreas riparias adyacentes • Vuelos repetidos pueden ser utilizados para evaluar degradación del hábitat	• La temperatura es medida en la superficie de la corriente por lo que no es representativa para la columna de agua, lo cual es de interés biológico • Relación costo beneficio desfavorable entre resoluciones de pixel detalladas y el costo de realizar recolección de información a gran escala

Tabla 2: Ventajas y desventajas de las aplicaciones establecidas para los métodos convencional y sensores remotos de infrarrojo

Fuente: (Handcock et al., 2012)

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

La estimación de la temperatura en cuerpos hídricos mediante imágenes térmicas se desarrolla en dos etapas: la recolección de los datos y procesamiento de los mismo. Dependiendo del método utilizado, existen ventajas y desventajas que deben ser evaluadas para identificar el mejor método a utilizar. La tabla 3 explica las ventajas y desventajas de los métodos convencionales y los sensores remotos de infrarrojo en la etapa de recolección de datos. La tabla 4 resumen las ventajas y desventajas de los dos métodos en la etapa de procesamiento de los datos.

Método	Recolección de datos	
	Ventajas	Desventajas
Convencional	• Mediciones pueden realizarse en cualquier punto sobre la columna de agua • Se requiere poca experiencia técnica para la recolección de datos • La información puede ser obtenida bajo cualquier condición climática incluida neblina y alta nubosidad • Es posible realizar mediciones continuas de datos mediante el uso de registradores de datos • Los costos de recolección de información pueden ser bajos, dependiendo del número de instrumentos que deban ser empleados.	• Poca información espacial de la variable de temperatura • Registradores de datos pueden ser destruidos o removidos por inundaciones o vandalismo • La información recolectada es puntual. No es posible observar el contorno térmico de todo el río • Los medidores de temperatura están normalmente ubicados en grandes corrientes o ríos • Es necesario calibrar los termómetros • Para recolectar información espacial a gran escala es necesario disponer de mucho personal.
Sensores remotos de infrarrojo	Satélite • Capacidad de cobertura regional, repetir monitoreos bajo las mismas características establecidas previamente, bajo costo • La información de temperatura puede ser monitoreada a diferentes escalas desde local (surgimiento de agua subterránea) a regional (llanuras de inundación) Sensores aéreos • Puede registrar imágenes térmicas con tamaño de pixel pequeño, adecuados para pequeñas corrientes y ríos Sensores en tierra • Estos instrumentos son fáciles de transportar y validar su información in situ, se requiere acceder a la corriente para tomar la información	• Obtener imágenes TIR puede ser costoso y complejo, además de ser temporalmente limitado • Se debe tener cuidado al interpretar los datos de la imagen teniendo en cuenta los ángulos del sensor remoto Satélite • Imágenes TIR puede que no estén disponibles debido a alta nubosidad • Limitación de plataformas utilizadas para recolección de datos (órbitas satelitales o disponibilidad de aeronaves) Sensores aéreos • Información con cobertura limitada tomada para corrientes estrechas con cobertura de áreas pequeñas • Costos de adquisición pueden ser altos, especialmente si se requieren múltiples líneas de vuelo para obtener un mosaico Sensores en tierra • Solo se puede observar la corriente desde puntos muy específicos a lo largo del río • Ángulos de observación deben ser escogidos cuidadosamente para reducir los efectos de reflexión de objetos a lo largo del río

Tabla 3: Ventajas y desventajas en la recolección de datos para los métodos convencional y sensores remotos de infrarrojo

Fuente: (Handcock et al., 2012)

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Método	Procesamientos de datos	
	Ventajas	Desventajas
Convencional	• Almacenamiento de datos estándar y técnicas de procesamiento de datos	• La información puede presentarse sin georreferencia y sin formato digital que dificulte el procesamiento
Sensores remotos de infrarrojo	• Para aplicaciones en las que es útil tener una temperatura no absoluta es decir que acepte incertidumbres, las imágenes TIR no corregidas radiométricamente se pueden usar para evaluar patrones espaciales	• Interpretación de imágenes térmicas TIR para determinar la temperatura del agua puede ser costoso y complejo y requiere experticia. • Se debe tener cuidado con la interpretación de imágenes térmicas dentro del contexto terrestre y acuático • Corrección radiométrica es necesaria para asegurar la precisión de los datos de temperatura, lo cual puede demandar mucho tiempo y dinero • Para la información adquirida desde una aeronave los cambios en la estabilidad del vuelo pueden requerir una compleja etapa de pos-procesamiento.

Tabla 4: Ventajas y desventajas para el procesamiento de datos para los métodos convencional y sensores remotos de infrarrojo

Fuente: (Handcock et al., 2012).

Los sensores remotos de infrarrojo son una tecnología que permite detectar cambios de temperatura en cuerpos de agua de manera rápida, con fácil procesamiento y mayor cobertura que los termómetros tradicionales. Sin embargo, se deben tener experiencia para interpretar las imágenes térmicas, realizar las correcciones atmosféricas en caso tal que se requieran y contar con los recursos pertinentes para acceder a esta tecnología.

Los sensores remotos de infrarrojo también pueden ser utilizados en otras aplicaciones que sean a nivel industrial, medicinal y seguridad puesto que los cambios de temperatura detectados por medio de imágenes térmicas son utilizados para indicar alguna falla o punto crítico en diferentes escenarios. Por ejemplo, el aumento de riego sanguíneo que se produce en una lesión interna de un animal o la fuga de calor que puede darse en el punto crítico de una tubería, son localizados fácilmente con esta tecnología. A continuación, se describen algunas aplicaciones de las imágenes térmicas (PROMAX, 2018).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Industrial:

- Calentamiento de componentes eléctricos defectuosos
- Fricciones en motores o máquinas eléctricas
- Desequilibrio de cargas
- Fugas u obstrucciones en conducciones
- Conexiones mal realizadas
- Predicción de incendios o daños potenciales
- Niveles en depósitos
- Reacciones químicas peligrosas

Construcción:

- Humedades
- Escapes
- Distribución de temperaturas en sistemas de calefacción

Medicina y veterinaria

- Detección de lesión por aumento de riego sanguíneo
- Localización de seres vivos
- Inmediata detección de temperatura corporal (fiebre por gripe A)
- Detección de nidos o animales invasores en el hogar.

Seguridad y otros

- Detección de seres vivos en situaciones de emergencia (talud, terremotos)
- Detección de focos de posibles incendios
- Detección de polizones en pasos fronterizos
- Perímetros de seguridad
- Observación de fauna salvaje y otras actividades

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

En las ilustraciones 8 y 9 se evidencia algunas de las aplicaciones descritas de la tecnología de sensores remotos de infrarrojo.

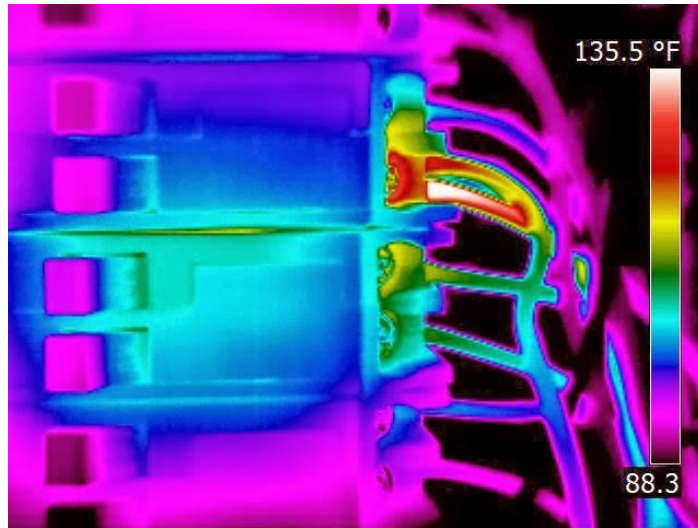


Ilustración 8: Detección de un sobrecalentamiento de una de las fases de un sistema eléctrico.

Fuente: (FARADAYOS, 2018)

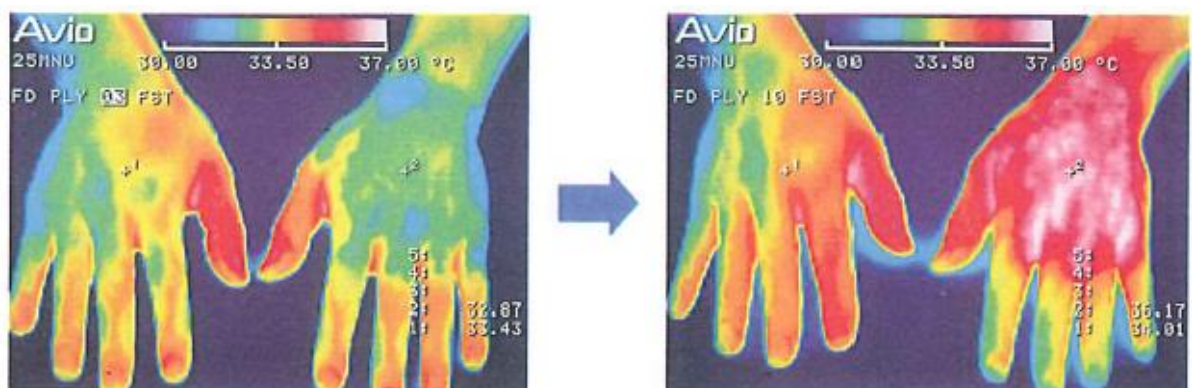


Ilustración 9: Efecto de un acelerador de circulación de la sangre que se aplica a las regiones de dolor muscular o rigidez para aliviar los síntomas. (imagen de la izquierda está sin tratamiento, imagen de la derecha con tratamiento)

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Fuente: (Insatec, 2018)

Por todas las ventajas que tiene los sensores remotos de infrarrojo descritas en esta sección y teniendo en cuenta sus limitaciones, se pueden utilizar esta tecnología para realizar mediciones generales de temperatura en cuerpos de agua para detectar vertimientos y caracterizar térmicamente zonas de interés

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

2. METODOLOGÍA

La metodología se dividió en tres etapas: construcción de la línea base (a partir de información secundaria), identificación de vertimientos por medio de imágenes térmicas y evaluación de la utilización de imágenes térmicas (con base en los resultados obtenidos a partir de las observaciones en campo y de la información secundaria). En la ilustración 10 se presenta un esquema general que plasma la metodología del proyecto.

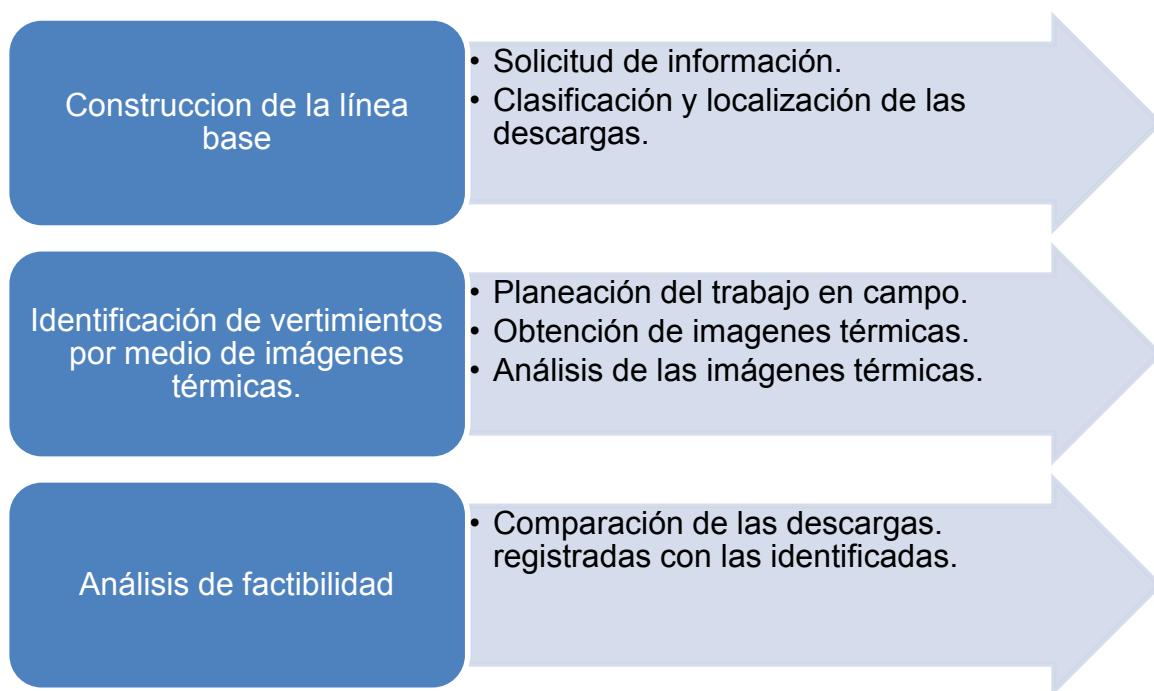


Ilustración 10: Diseño metodológico del proyecto

2.1 CONSTRUCCIÓN DE LA LÍNEA BASE

Para la construcción de la línea base del proyecto se realizaron las siguientes actividades.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

2.1.1 Solicitud de información

Se solicitó al AMVA la base de datos referente a los vertimientos industriales y domésticos de la quebrada Doña María por medio de un derecho de petición con radicado 24700 del 22 de agosto de 2017. En su respuesta, la entidad adjuntó los documentos relacionados al Plan de Ordenación y Manejo de la microcuenca (PIOM) de la quebrada Doña María, incluyendo archivos cartográficos en formato shapefile que contienen información de la delimitación de la cuenca, alineamiento del drenaje principal y tributarios y la ubicación de los vertimientos identificados.

2.1.2 Clasificación y localización de descargas

Dentro del PIOM de la quebrada Doña María se establece el proceso de planificación, uso y manejo de los recursos naturales de la microcuenca, de manera que se mantenga o restablezca un adecuado equilibrio entre el aprovechamiento social y económico de tales recursos y la conservación de la estructura y la función físico biótica de la cuenca (MINAMBIENTE,2014).

Para ejecutar el PIOM es fundamental realizar el diagnóstico general de la cuenca, teniendo en cuenta los diferentes medios (bióticos y abióticos) que interactúan en los ecosistemas enmarcados en el área de la cuenca. Por ejemplo, en el componente hidrológico y de calidad del agua se establece la ubicación (tramo de la quebrada) y las características físico-químicas y microbiológicas de los vertimientos identificados.

La ubicación de los vertimientos se puede visualizar en la sección de presentación de resultados en el mapa 3.

2.2 IDENTIFICACIÓN DE VERTIMIENTOS POR MEDIO DE IMÁGENES TÉRMICAS

Para identificar los vertimientos utilizando imágenes térmicas se realizaron las siguientes actividades:

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

2.2.1 Planeación del trabajo en campo

Se realizó una prueba piloto para establecer los criterios para la toma de las imágenes térmicas. Adicionalmente, se configuró la aplicación para recopilar y administrar los datos georreferenciados durante el trabajo en campo.

A partir de la prueba piloto se estableció la necesidad de tomar las imágenes térmicas en horario nocturno para evitar el efecto de los rayos del sol en el resultado de las fotografías.

A partir de la información secundaria, se decidió efectuar los recorridos a pie por una de las márgenes de la corriente.

El trabajo en campo se realizó los días 25 de julio de 2018, 13, 17 y 22 de agosto de 2018, 22 de septiembre de 2018 y 3 de octubre del 2018.

Para la ejecución de las actividades se utilizó la cámara térmica FLUKE y un celular con la aplicación ODK para almacenar la información en tiempo real.

2.2.2 Obtención de imágenes térmicas

Se tomaron imágenes térmicas utilizando la cámara FLUKE de la Universidad EIA siguiendo la planeación establecida en el numeral anterior.

Como se mencionó en la introducción de este trabajo, se recorrieron varias quebradas, entre ellas la Doña María, La Mosca, Las Palmas y el río Rionegro. Durante los recorridos se prestó atención a los vertimientos de las viviendas ubicadas sobre ambas márgenes del cauce, las descargas pluviales de vías y obras de alcantarillado municipal y las descargas de industriales aledañas a las fuentes hídricas mencionadas.

Luego de ubicar una descarga de aguas residuales se procedió a tomar las imágenes térmicas con la cámara, no sin antes permitir que el dispositivo se estabilizara y calibrara la escala de temperatura de acuerdo a las condiciones *in-situ*. Posteriormente, se enfocó en el punto exacto donde la descarga contaminante llegaba a la corriente y finalmente se tomaron las imágenes verificando que permitieran distinguir claramente la variación de temperatura del agua.

Además de las imágenes térmicas tomadas en campo, se tomaron fotografías georreferenciadas con la aplicación ODK.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

2.2.3 Análisis de las imágenes térmicas

Para analizar las imágenes térmicas adquiridas se realizaron varios procedimientos. En primer lugar, las imágenes se descargaron de la cámara en formato Is2. Posteriormente, se exportaron a formato raster para procesar la información con ayuda de herramientas SIG. Luego se trazaron perfiles longitudinales y transversales para examinar la temperatura a lo largo de las quebradas. Los perfiles de temperatura se crearon trazando una línea representativa en sentido del vertimiento y varias líneas perpendiculares al vertimiento. Las líneas se convirtieron en rasters que posteriormente se transformaron en una capa de puntos para poder exportar la información de temperatura de cada pixel a Excel. La Ilustración 25, en la sección de resultados, detalla el procedimiento.

2.3 ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD

Para evaluar la factibilidad de la utilización de imágenes térmicas para la detección de aguas residuales industriales se realizaron las siguientes actividades:

En primer lugar, se verificó que los vertimientos identificados coincidieran con la base de datos suministrada y que, de acuerdo con el número de vertimientos, el uso de esta tecnología pudiera representar una ventaja para las autoridades ambientales. Este análisis inicial llevó a una reflexión sobre otros temas como, por ejemplo: costo de la tecnología vs. utilización considerando los límites térmicos de vertimiento según la norma colombiana, facilidad de implementación (cobertura, practicidad, representatividad) vs. tipos comunes de descargas encontrados, y otras ventajas y desventajas mencionadas por la literatura científica. Con este análisis se concluyó sobre la factibilidad de utilizar imágenes térmicas en labores de monitoreo de descargas, el cual era el objeto de esta investigación.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

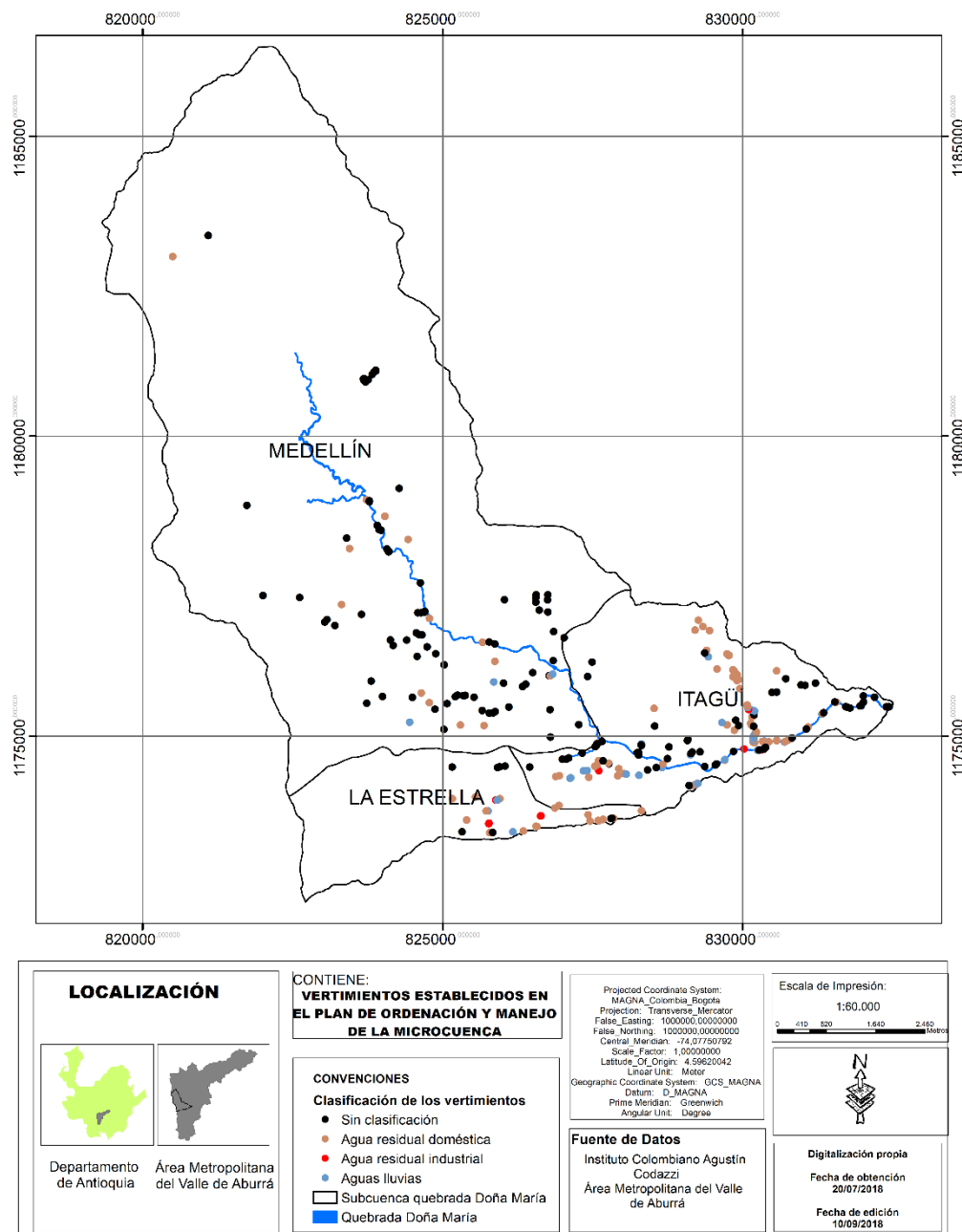
3.PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1 CONSTRUCCIÓN DE LA LÍNEA BASE

3.1.1 Clasificación y localización de descargas

En el PIOM (planes integrales de ordenamiento y manejo de microcuenca) de la quebrada Doña María se establecieron 304 vertimientos, de los cuales 102 se clasificaron como agua residual doméstica, 9 como agua residual industrial, 38 aguas lluvias y 155 sin clasificación. En el mapa 2 se ilustra la ubicación y clasificación de los vertimientos en la microcuenca según los siguientes colores: café para vertimientos residuales domésticos, azul para descargar de agua lluvia, rojo para vertimientos de tipo industrial y negro para descargas sin clasificación.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



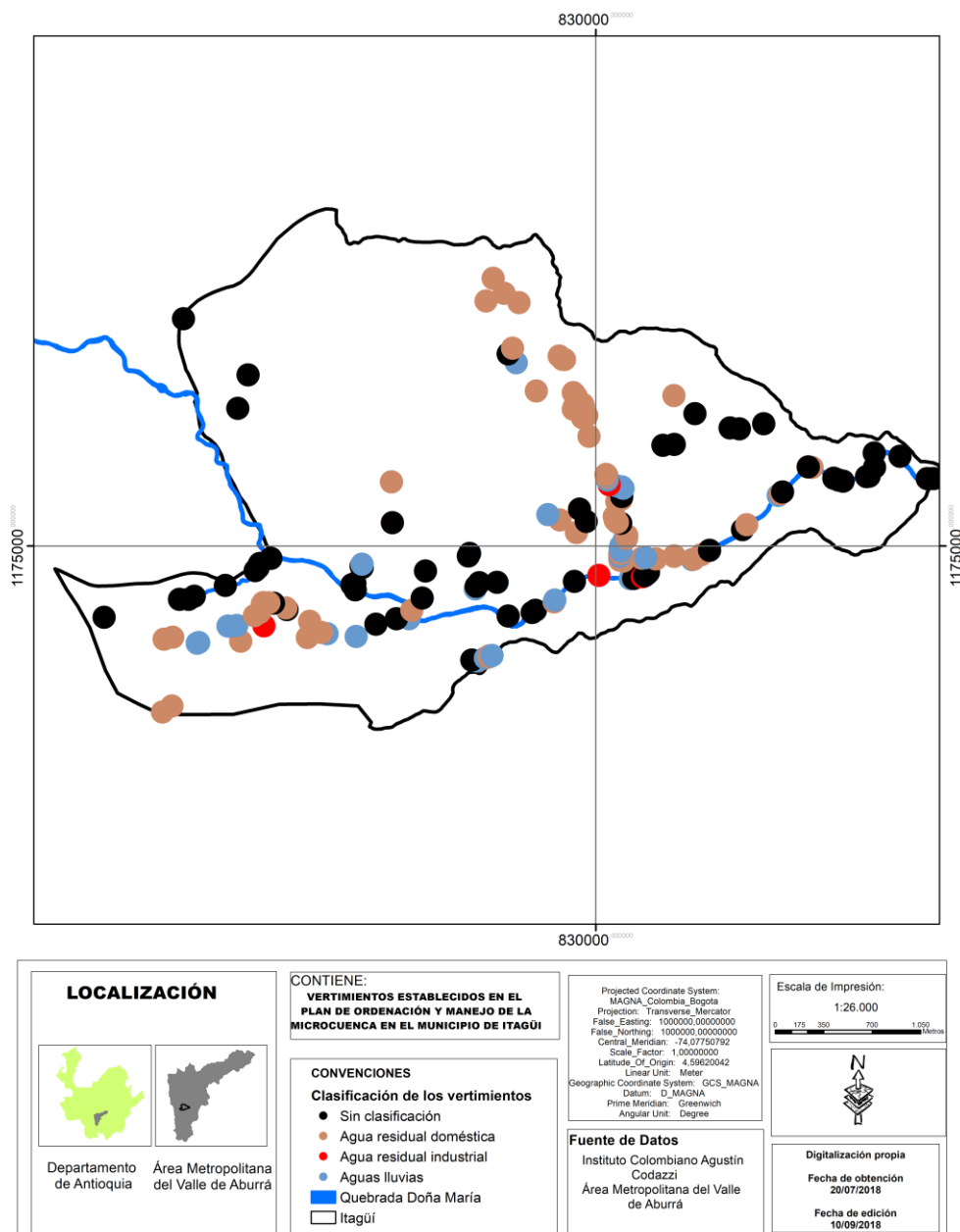
Mapa 2: Vertimientos identificados en el PIOM de la quebrada Doña María

Fuente: Elaboración propia con información de AMVA y UNAL 2006

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Dentro de los vertimientos identificados, 175 se localizan en el municipio de Itagüí. De tipo doméstico se clasificaron 71, de agua residual industrial 5, de agua lluvia 32 y por último se encontraron 67 vertimientos sin clasificación. Lo anterior es descrito en el mapa 3.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



Mapa 3: Vertimientos establecidos en el plan de ordenación y manejo de la microcuenca de la quebrada Doña María, municipio de Itagüí

Fuente: Elaboración propia con información de AMVA y UNAL 2006

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

3.1.2 Temperatura de cuerpos de agua

La temperatura de cuerpos hídricos está influenciada por la latitud, la altitud, la estación, la hora del día, la circulación del aire, la capa de nubes, la cantidad de flujo, la profundidad del cuerpo de agua y la presencia de luz solar directa (UNESCO, 2018). En general, las aguas superficiales suelen estar dentro del rango de temperatura de 0 a 30 °C, aunque las "aguas termales" pueden alcanzar los 40 °C o más (UNESCO, 2018). En países con estaciones las temperaturas fluctúan entre mínimos que se producen durante el invierno o los períodos húmedos y máximos en el verano o las estaciones secas, especialmente en aguas poco profundas (UNESCO, 2018).

En países ubicados en la zona ecuatorial, como Colombia, la temperatura de los cuerpos de agua se ve influenciada por las zonas de convergencia intertropical y las precipitaciones que estas pueden formar. En los meses más fríos, las temperaturas de los ríos son mayores a los 18 °C (Syvitski , Cohen, Kettner, & Brakenridge, 2014). El calor del sol impulsa la circulación global de los océanos y la atmósfera de la Tierra. Gran parte de esa radiación solar inicialmente incide en los trópicos, durante todo el año. Por lo tanto, la temperatura del agua de los océanos tropicales generalmente excede los 20 °C (68 °F) y permanece relativamente constante durante todo el año (Water Encyclopedia, 2018).

Las actividades antrópicas también son un factor que puede afectar la temperatura del agua. Muchas industrias utilizan el agua de los ríos en sus procesos. El agua se trata antes de volver al río, pero es más cálida de lo que era antes. La escorrentía que ingresa a un arroyo suele ser más cálida que el arroyo y aumentará su temperatura general (Vernier, 2018). Por ejemplo, para mantener el funcionamiento de las centrales termoeléctricas se requiere que el calor residual de las estaciones de generación eléctrica se transfiera al agua de refrigeración obtenida de cuerpos de agua locales, como un río, lago u océano. El agua de descarga se mezcla rápidamente con el agua del cuerpo receptor y el aumento medio de la temperatura después de la mezcla es inferior a 2 °C (Advameg Inc, 2018)

Un cambio en la temperatura del agua puede afectar la salud general de los organismos acuáticos, cambiando así la calidad de la corriente. Cuando la temperatura del agua llega a ser demasiado caliente o demasiado fría, los organismos se estresan, disminuyendo su resistencia a los contaminantes, enfermedades y parásitos (Vernier, 2018). En la tabla 5 se observa rangos de temperatura óptimos de algunos organismos.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Organismo	Rango de temperatura °C
Trucha	5 – 20
Pez de agua dulce smallmouth bass	5 – 28
Larvas de mosquito	10 – 25
Larva del insecto plecoptera	10 – 25
Insecto corizidae	10 – 25
Pez de agua dulce carpa	10 – 25
Mosquito	10 – 25
Pez gato	20 – 25

Tabla 5: Temperatura óptima de algunos organismos

Fuente: (Vernier, 2018)

El aumento de la temperatura afecta los procesos físicos, químicos y biológicos del cuerpo del agua. A medida que aumenta la temperatura del agua las reacciones químicas también lo hacen, provocando la disminución de la solubilidad de los gases dentro del agua como el O₂, CO₂, N₂, CH₄ y otros (UNESCO, 2018). Por otro lado, la tasa metabólica de los organismos depende de la temperatura. En aguas cálidas, las tasas de respiración aumentan, lo que lleva a un mayor consumo de oxígeno y una mayor descomposición de la materia orgánica. Las tasas de crecimiento también aumentan (esto es más notable para las bacterias y el fitoplancton que duplican sus poblaciones en períodos de tiempo muy cortos), lo que lleva a un aumento de la turbidez del agua, el crecimiento de macrófitos y la proliferación de algas, cuando las condiciones de nutrientes son adecuadas (UNESCO, 2018).

En la ilustración 11 se observa el crecimiento de macrófito por el aumento de la temperatura, y las condiciones adecuadas de nutrientes en los de los embalses del Bajo Ebro en España. La temperatura del agua, juegan sin duda un importante papel en la regulación del crecimiento de los macrófitos. En los meses de verano cuando las temperaturas son mayores a los 12 grados centígrados se presenta el mayor crecimiento del organismo.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



Ilustración 11: Crecimiento en macrófito en cuerpos de agua en España

Fuente: (Gobierno de España,2010)

3.1.3 Temperatura de vertimientos

La temperatura de las aguas residuales domésticas suele ser más alta que la del cuerpo de agua. Esto se debe a la utilización de agua caliente en los hogares y la calefacción dentro del sistema de tuberías. Generalmente, la temperatura de las aguas residuales es de 10 a 21 °C y varía dependiendo de la ubicación geográfica donde se genera y descarga el vertimiento (Toprak, 2018). La temperatura en un agua residual doméstica suele tener un orden de 2 °C por encima del cuerpo hídrico. Las aguas residuales provenientes de industrias alimenticias y las aguas residuales procedentes de sistemas de refrigeración generan los mayores calentamientos en cuerpos de agua, los cuales son mayor a 2 °C (DSpace, 2018).

Los aumentos de temperatura de 1 a 2 ° C pueden alterar las comunidades acuáticas porque son letales para algunas especies y pueden afectar el crecimiento y la reproducción de otras. El aumento de la temperatura del agua a solo 2 a 3 °C por encima del óptimo para algunos insectos acuáticos puede reducir en gran medida el número de huevos producidos por las hembras porque se usa más

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

energía para apoyar tasas metabólicas más altas y menos para la producción de huevos (Dodds & Whiles, 2010).

En Colombia las temperaturas de los vertimientos de aguas residuales dependen del sector y región geográfica, donde se generan. En la tabla 6 se resumen las temperaturas máximas y mínimas encontradas para cada sector.

Sector	Temperatura mínima °C	Temperatura máxima °C
Aguas residuales domésticas	12	30
Alimentos cárnicos	22	37
Alimentos lácteos	18	28
Alimentos dulces y chocolates	20	35
Bebidas y cervezas	25	35
Textil, tintorerías	28	50
Química orgánica	20	35
Papel reciclado	30	40
Centrales térmicas	40	70
Frigoríficos	15	25

Tabla 6: Temperatura promedio de aguas residuales en Colombia

Fuente: (Ana Patricia Restrepo, 2018)

La línea base del proyecto estará conformada por los vertimientos localizados por el AMVA en la quebrada Doña María, el rango de temperatura de un cuerpo hídrico sin alteración aparente que para Colombia será mayor a 18 °C y la temperatura de los vertimientos que, según la bibliografía revisada, si se observa una diferencia de 2 °C entre la temperatura del vertimiento y cuerpo hídricos se revisará si hay descargas. En la tabla 7 se resume la temperatura de un cuerpo hídrico sin alteración y la temperatura promedio de las aguas residuales domésticas en Colombia y en Estados Unidos.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Fuente de agua	Temperatura °C
Cuerpo hídricos sin afectación en Estados Unidos (UNESCO, 2018)	0 a 30
Cuerpo hídricos sin afectación en Colombia	>18
Aguas residuales domésticas en Estados unidos (Toprak, 2018)	10 a 20
Aguas residuales domésticas en Colombia (Jamel, 2018)	12 a 30

Tabla 7: Temperatura promedio de aguas residuales domésticas y cuerpos hídricos sin afectación en Colombia y en Estados Unidos

Fuente: (UNESCO, 2018), (Toprak, 2018), (Ana Patricia Restrepo, 2018)

3.2 IDENTIFICACIÓN DE VERTIMIENTOS POR MEDIO DE IMÁGENES TÉRMICAS

En esta sección, inicialmente se explicará la metodología de obtención y análisis de imágenes térmicas y, posteriormente, se discutirán los resultados. Se describirá la planeación del trabajo en campo, los factores que se tuvieron en cuenta para realizar la toma de imágenes térmicas como la hora de adquisición de las imágenes, el número de fotos y la recopilación de información en campo. Por último, se explicará la creación de perfiles de temperatura con la información térmica de las imágenes obtenidas para obtener la temperatura de la descarga, del cuerpo hídrico y de la zona de mezcla.

3.2.1 Planeación del trabajo en campo

En primer lugar, se realizaron varias pruebas piloto para determinar la hora óptima de adquisición de las imágenes térmicas, el número de imágenes y la documentación de cada punto registrado.

Hora de adquisición

La hora de adquisición de las imágenes térmicas es determinante para la calidad de la información. Las lecturas térmicas se ven afectadas por la radiación solar, no solamente porque se eleva la temperatura del cuerpo de agua y con ello disminuye

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

el contraste frente a las descargas domésticas dificultando su identificación, sino también porque calienta otros objetos presentes en el cuerpo de agua como vegetación y rocas, lo que dificulta también el trabajo ya que, como se indicó en la sección anterior, la diferencia entre el agua residual y la de una quebrada puede ser de solo 2 grados centígrados.

Los autores Lezzi y Todisco (2015), en su investigación *Stream temperature estimated in situ from thermal-infrared images: best estimate and uncertainty*, establecieron como fuentes de incertidumbre elementos como corteza, ramas, pastos muertos, hojas, suelo, arena y rocas, los cuales tienen temperaturas diferentes a las del agua del río y afectan la medición de la temperatura del cuerpo de agua.

En la foto 1 se puede apreciar una imagen de la quebrada Las Palmas, tomada a las 12 del día el 25 de julio de 2018. En ella se pueden apreciar elementos calientes que corresponden a la vegetación, rocas, basura e infraestructura. Se aprecia, además, una descarga de agua residual doméstica proveniente de los comercios aledaños. Al comparar la temperatura de la descarga, la del cuerpo de agua y la de otros elementos como rocas o basura, se encontró que se dificulta la identificación de la descarga. La temperatura de la vegetación (16,8 °C, ver foto 1) y de los elementos como roca y concreto (17,2 °C) era más elevada pero cercana a la temperatura del cuerpo hídrico (16 °C) lo cual generaba un contraste menor entre los elementos expuestos, la descarga (18,2 °C) y el cuerpo hídrico.



Foto 1: Imagen térmica y a color en la quebrada Las Palmas a las 12:00 pm el 25 de julio de 2018

En la foto 2 se presenta una imagen tomada a las 6 de la mañana en la misma zona. A diferencia de la anterior, no se aprecian cuerpos calientes y es mucho más evidente la entrada de agua de una alcantarilla que cruza la vía Las Palmas. El contraste de temperaturas entre el vertimiento (16 °C, ver foto 2), el cuerpo de agua (14,5 °C) y los elementos expuesto como la vegetación (11,5 °C) era mayor sin la presencia de la luz solar, lo cual facilitó la identificación del vertimiento. No obstante, se identificó otro problema, que a esa hora no hay actividades comerciales y, por tanto, no hay descargas de agua residual.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

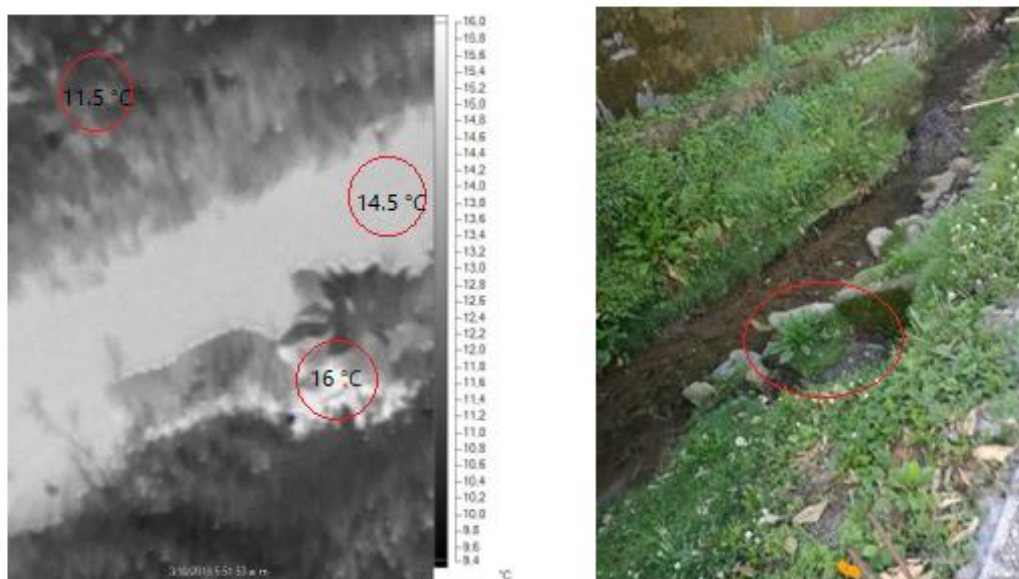


Foto 2: Imagen térmica y a color en la quebrada Las Palmas a las 6:00 am

La seguridad en la zona de estudio también fue un factor fundamental para la elección del rango horario. Las pruebas piloto evidenciaron mayor tráfico vehicular y peatonal en las horas de la mañana en las zonas aledañas a las quebradas, puesto que las personas se dirigen a sus lugares de trabajo, lo que dinamiza el sector. Por el contrario, en la noche las calles aledañas a las quebradas son solitarias, en especial después de las 10:00 pm.

Estos primeros hallazgos mostraron algunas limitaciones de la tecnología, la hora del día era importante para lograr el mayor contraste entre el cuerpo de agua y los vertimientos, pero quizá eso afectaría la representatividad de las descargas por la poca actividad antrópica. Se decidió “sacrificar” el nivel de actividad de los usuarios y evitar el efecto de la radiación solar, por lo que los recorridos se llevaron a cabo en horas de la madrugada, antes de que saliera el sol a pesar de que las zonas podrían ser no tan seguras para la investigadora y los equipos.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Número de fotos

Dentro de la planeación de trabajo en campo se realizaron varias tomas con la cámara térmica Fluke para establecer la posibilidad de construir imágenes panorámicas de los cuerpos de agua y con ello analizar tramos completos de quebradas. Las imágenes panorámicas están formadas por varias fotos individuales, como se muestra en ilustración 12.



Ilustración 12: Construcción de una imagen panorámica

Fuente: (Adobe, 2018)

Las imágenes térmicas son más complejas de analizar, ya que proporcionan información monocromática, además de que tienen menos definición (160 x 120 píxeles por foto), en comparación con una foto a color.

Lo anterior dificultó la alineación de las imágenes para crear fotos térmicas panorámicas. Adicionalmente, las características ópticas de la cámara Fluke no facilitaron la alineación de las imágenes, lo que originó imágenes panorámicas distorsionadas. Debido a ello, las imágenes adquiridas en campo tienen una cobertura limitada.

Recopilación de información en campo

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

El siguiente aspecto que se definió durante la planeación del trabajo en campo fue el método para documentar las observaciones. En lugar de utilizar lápiz, papel y un GPS se empleó la aplicación Open Data Kit (ODK, 2018). ODK es una plataforma que fue desarrollada para el levantamiento de información georreferenciada en campo. La información puede ser alfanumérica o fotográfica. Para su uso se debe configurar un proyecto en la plataforma web *ODK built*. En ella se configuran los campos que serán solicitados con cada entrada de información (ver ilustración 13). En este caso, el proyecto se configuró con los siguientes campos:

- Coordenadas de la descarga recolectadas en el sistema geodésico mundial 1984 (WGS 84)

- Fecha y hora de la toma

- Presencia de color

- Presencia de olor

- Pregunta: ¿se visualiza a simple vista el vertimiento?

- Pregunta: ¿el vertimiento tiene alguna influencia térmica por otra fuente, como el concreto?

- Estimación de volumen: 1 bajo, 2 medio, 3 alto

- Comentarios adicionales

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



Ilustración 13: Configuración del proyecto en la plataforma ODK Built

Para guardar la información del proyecto de *ODK Built* en línea se sincronizó la interfaz con la plataforma *Google Cloud*, la cual permite almacenar la información en la nube y generar la ULR necesaria para realizar la sincronización completa del sistema con la aplicación *ODK Collect*, que es la que se instala en el dispositivo móvil (celular o tablet) para la recopilación de información en campo (ver ilustración 14).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

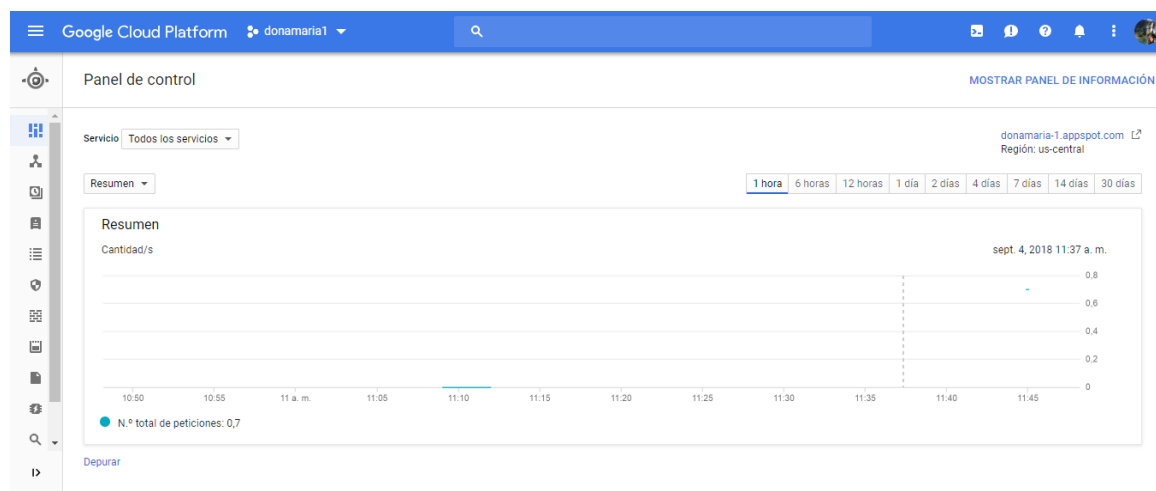


Ilustración 14: Sincronización del proyecto ODK built con la interfaz Google Cloud

Para guardar la información de las salidas de campo en la web se utilizó la aplicación del celular *ODK Collect* (ver ilustración 15). La app es gratuita y requiere configurarse con la URL generada en *Google Cloud*.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

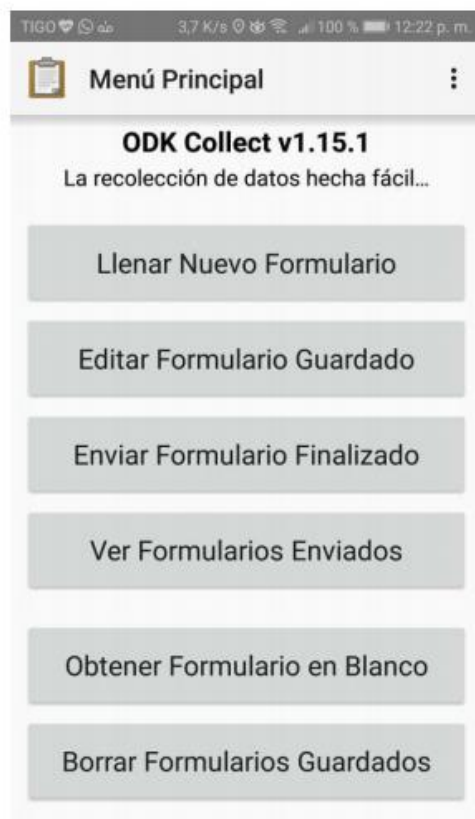


Ilustración 15: App para celular ODK Collect

Para cada vertimiento identificado se diligenció una entrada en el formulario, el cual se almacenó en la URL generada en *Google Cloud*. La información se guardó en la nube y se accedió a ella por medio la página (URL). La información de la web se ordenó cronológicamente, dependiendo de la hora del envío del formulario (ver ilustración 16). Adicionalmente, la plataforma permitió descargar de manera grupal o individual los formularios y descargarlos en formato .csv, .kml o .json.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

meta instanceID	coordenadas Latitude	coordenadas Longitude	coordenadas Altitude	coordenadas Accuracy	fecha	foto	color	olor	tipo	calorexterior	caudal	comentario
✗ uid:6c3019ed-068c-43d9-8658-e95ab55001f0	6.182474999999999	-75.59518333333334	1526.1	4.6	Fri Aug 17 11:31:00 UTC 2018		no	si	visible	si	1	Al lado de una zona industrial
✗ uid:baaf1365-7dc2-4fc6-a2e7-4022c65f90a6	6.181674999999999	-75.5995	1514.7	3.3	Wed Aug 22 10:07:00 UTC 2018		no	no	visible	si	2	Al lado de una empresa de estructuras metálicas
✗ uid:81f331f3-7123-453e-a36b-660b15d6dbe0	6.178401666666666	-75.60246166666667	1500.9	4.8	Wed Aug 22 10:26:00 UTC 2018		si	no	visible	no	1	Es una descarga de espuma su vertimiento debe ser aguas arriba. Debajo de la estatua
✗ uid:10505a7d-c61a-46fe-89fc-019bd54057be	6.176193333333333	-75.60622333333335	1575.3	3.0	Wed Aug 22 10:42:00 UTC 2018		no	no	visible	si	1	No hay vertimiento ni cambio de color
✗ uid:8626d479-77c2-43c6-aa70-4aca65a18342	6.175614999999999	-75.60911166666666	1489.0	4.9	Wed Aug 22 10:53:00 UTC 2018		si	no	visible	si	1	Al lado de una construcción de edificios

Ilustración 16: Almacenamiento de la información de campo en la web

La información recolectada con ODK permitió crear de manera eficiente los mapas 5 y 6 de vertimientos y la tabla 8 con la información de cada uno. Los mapas 5 y 6 se crearon exportando el conjunto de formularios en formato KML. Utilizando el software ArcGIS 10.6.1, el archivo KML se transformó a capa de información (.shp) para generar una capa de puntos. La tabla 8 se realizó en Excel copiando y pegando manualmente la información. Este proceso resultó eficiente debido a que la información estaba ordenada del primer vertimiento encontrado a el último.

Procesamiento de información térmica

Para analizar las imágenes térmicas se realizaron varias actividades. Inicialmente, se calculó la temperatura promedio de cuerpos hídricos sin alteración aparente para establecer puntos de comparación con las imágenes térmicas con vertimientos. También se construyeron perfiles de temperatura de cuerpos hídricos sin alteración aparente para compararlos con los perfiles de temperatura de las imágenes con vertimientos.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Temperatura promedio de cuerpos de agua sin alteración aparente

Para estimar la temperatura promedio de cuerpos de agua sin alteración aparente se tomaron tres imágenes térmicas de cuerpos hídricos en la quebrada de la Universidad EIA, el río Rionegro y un trayecto de la quebrada Las Palmas. Estas imágenes fueron transformadas a formato raster para ser procesadas con ayuda del software ArcGIS.

En cada imagen se dibujó manualmente un polígono del área sin alteración en el cuerpo de agua. Los polígonos resultantes fueron convertidos a formato raster, que posteriormente se transformaron en una capa de puntos para exportar la información de temperatura de cada pixel y calcular el promedio aritmético de los datos. Las fotos 3 y 4 muestran el procedimiento.

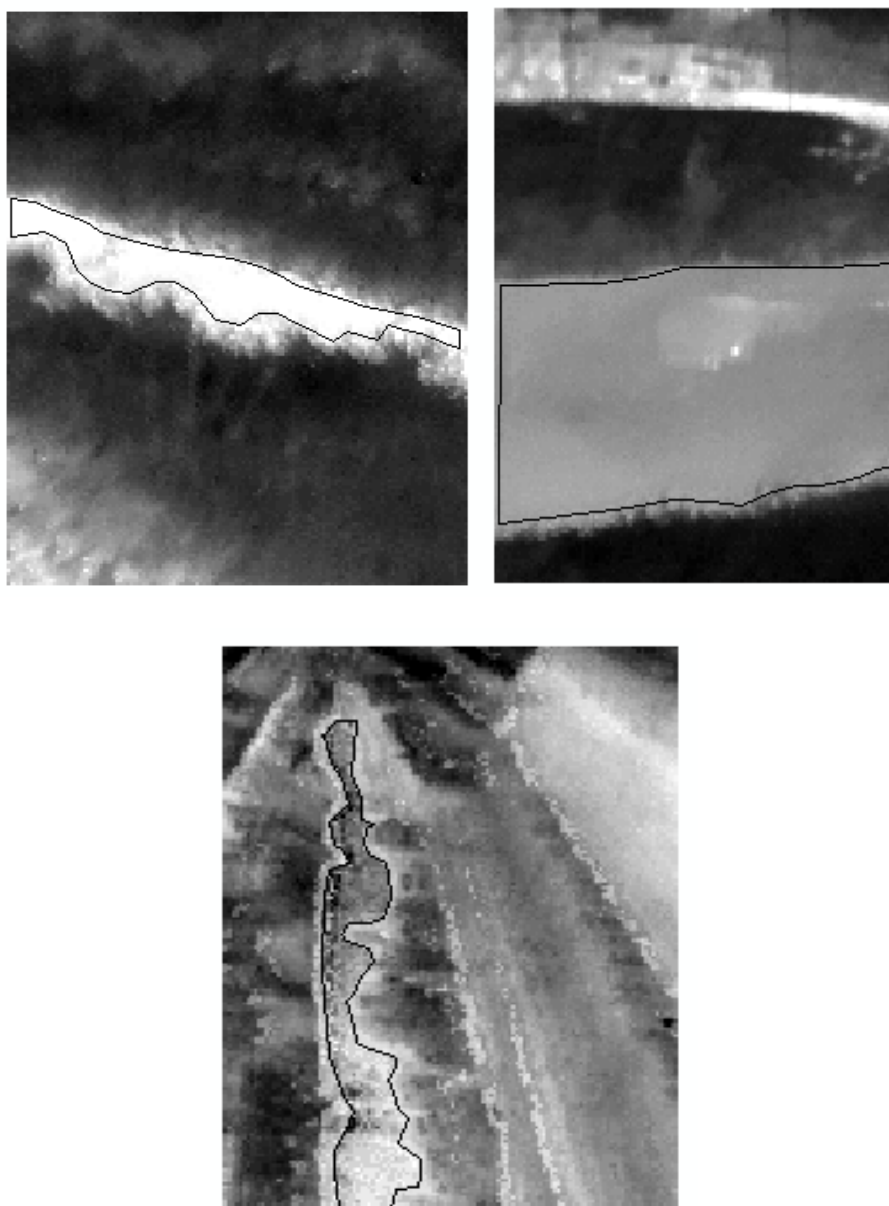


Foto 3: Polígonos para la extracción de información térmica en la quebrada de la Universidad EIA, el río Rionegro y la quebrada Las Palmas

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

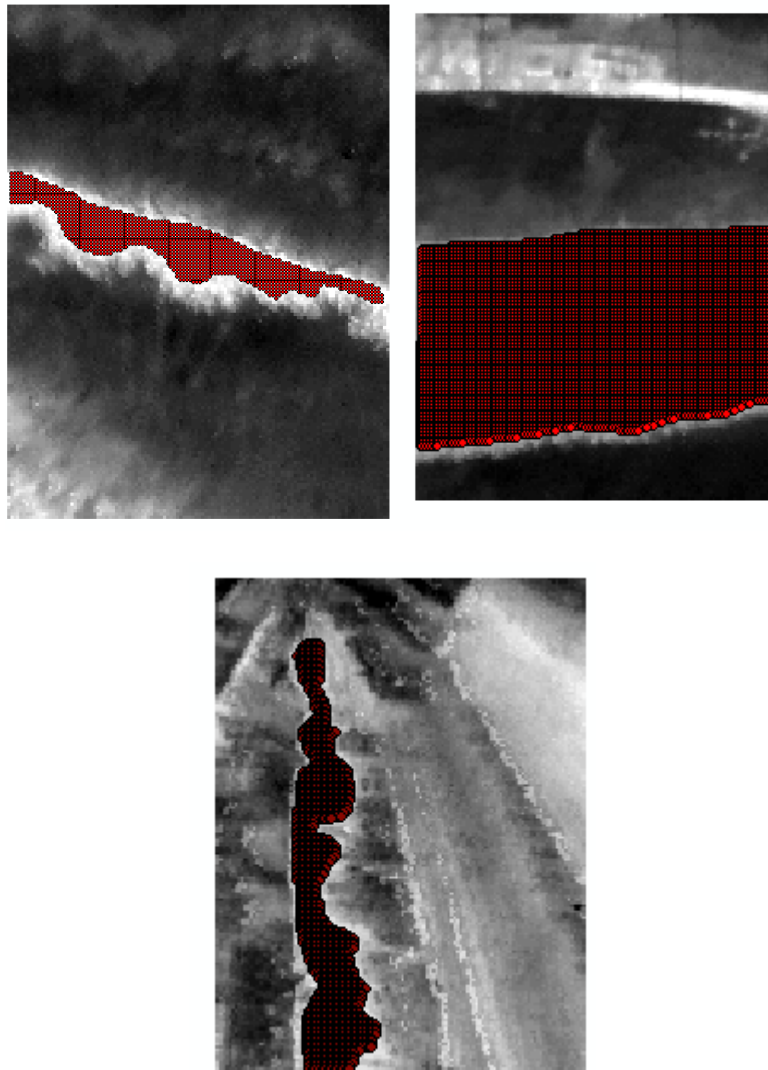


Foto 4: Capa de puntos con información de temperatura de la quebrada de la UEIA, el río Rionegro y la quebrada Las Palmas

De la capa de puntos se obtuvo la información para estimar la temperatura promedio, temperatura máxima y mínima de un cuerpo hídrico sin alteración. La tabla 9 ilustra los resultados.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Perfiles de temperatura

La metodología definida para analizar todas las imágenes térmicas consistió en establecer perfiles de temperatura de los cuerpos de agua. En el artículo *Exploring streamwater mixing dynamics via handheld thermal infrared imagery* de Antonelli et al. (2017) se propone la adquisición de los datos de temperatura por medio de líneas representativas trazadas dentro del cuerpo hídrico (ver ilustración 17). De cada línea se obtiene la información de temperatura de cada pixel para establecer la zona de mezcla de dos cuerpos de agua. Con este procedimiento, los autores construyeron perfiles trazando líneas representativas en dirección del vertimiento y líneas perpendiculares a la línea del vertimiento para analizar la distribución de temperatura a lo largo y ancho del cuerpo de agua.

En este trabajo se siguió el procedimiento de Antonelli et al. (2017), tanto para los cuerpos hídricos sin alteración aparente, como los que presentaban descargas para estimar la temperatura del vertimiento, de la zona de mezcla y del cuerpo hídrico.

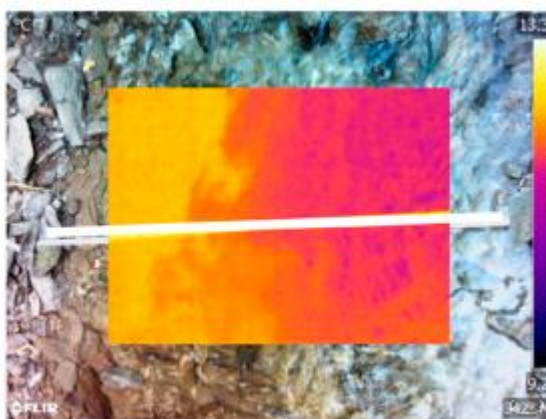


Ilustración 17: Eje trazado para establecer el perfil de temperatura del cuerpo hídrico

Fuente: (Antonelli et al., 2017)

Los ejes longitudinales y transversales se trazaron como vectores y, posteriormente, fueron convertidos a formato raster para exportar el valor de la temperatura de cada pixel. El procedimiento fue realizado utilizando el software ArcGIS.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Las ilustraciones de la 18 a la 24 describen la creación de los perfiles de temperatura para las imágenes térmicas que presentaban vertimientos. La ilustración 25 resume todo el procedimiento.

Para crear los perfiles de temperatura, fue necesario dibujar polígonos que albergara la descargar y el cuerpo de agua (ver ilustración 17). Este procedimiento se realizó con ayuda del software ArgGIS luego de convertir las imágenes que estaban en formato .IS2 a formato raster.



Ilustración 18: Área del cuerpo hídrico que contiene el vertimiento.

Fuente: (Elaboración propia, 2018)

Con ayuda del software ArcGIS se recortó el polígono creado para facilitar el procesamiento de la información. Ver ilustración 19.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

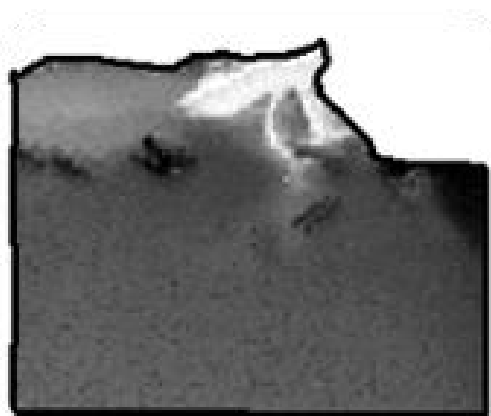


Ilustración 19: Recorte del raster que contiene el área de interés

Fuente: (Elaboración propia, 2018)

Luego del recorte del raster, se creó una línea representativa en sentido del vertimiento (ver ilustración 20) y líneas perpendiculares a la establecida a favor de la descarga (ver ilustración 21) para analizar la distribución de temperatura a lo largo y ancho del cuerpo de agua.

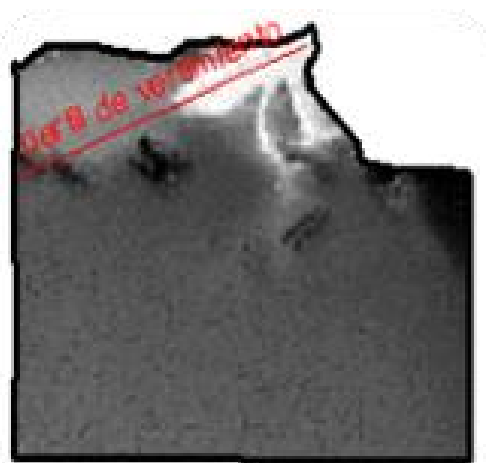


Ilustración 20: Línea representativa en dirección del vertimiento (línea roja)

Fuente: (Elaboración propia, 2018)

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

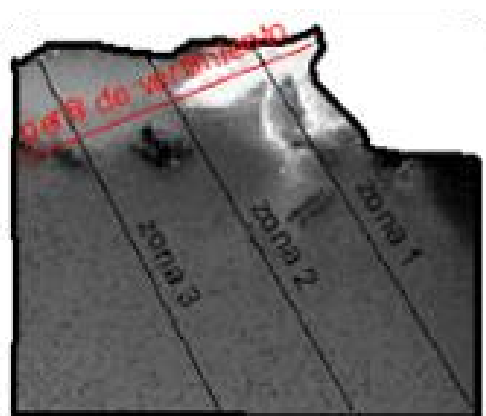


Ilustración 21: Líneas perpendiculares a la línea del para establecer zonas de interés (líneas negras zona 1, zona 3 y zona 3)

Fuente: (Elaboración propia, 2018)

Todas las líneas establecidas se convirtieron en rasters para almacenar la información de temperatura del pixel correspondiente. Ver ilustración 22.



Ilustración 22: Conversión del formato de las líneas para almacenar la información de temperatura

Fuente: (Elaboración propia, 2018)

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Los raster creados a partir de las líneas establecidas en sentido del vertimiento y perpendicular al mismo, se transformaron en capas de puntos para exportar la información de la temperatura de cada pixel a un cuadro de Excel. Ver ilustración 23.

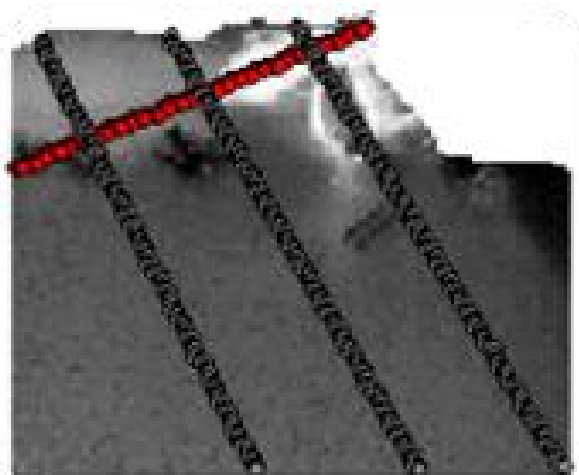


Ilustración 23: Transformación de los rasters en capas de puntos para exportar la tabla de atributos a un archivo en Excel

Fuente: (Elaboración propia, 2018)

Por último, se exportó a Excel las capas de atributos de las capas de puntos para identificar la temperatura de cada pixel y establecer los perfiles de temperatura. Ver ilustración 24

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

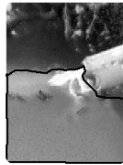
pointid	Temperatura °C
1	14,8
2	14,7
3	14,7
4	14,5
5	14,4
6	14,5
7	14,6
8	14,7
9	14,6
10	14,8
11	14,8
12	14,7
13	14,6
..	..

Ilustración 24: Tabla de atributos de las capas de puntos con información de temperatura de cada pixel

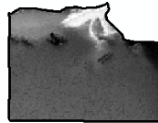
Fuente: (Elaboración propia, 2018)

En la ilustración 25 se resumen los pasos para establecer los perfiles de temperatura.

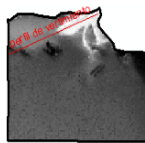
La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



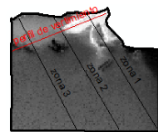
Delimitación del área del cuerpo hídrico que contiene el vertimiento



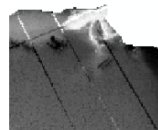
Recorte del raster que contiene el área de interés



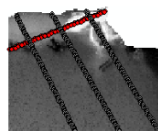
Creación de la línea representativa en dirección del vertimiento



Creación de las líneas perpendiculares a la línea del vertimiento para establecer zonas de interés



Conversión de todas las líneas en rasters para almacenar la información de temperatura



Transformación de los rasters en capas de puntos para exportar la tabla de atributos a un archivo en excel

puntid	Temperatura
1	14.8
2	14.7
3	14.7
4	14.5
5	14.4
6	14.5
7	14.6

Exportación de la tabla de atributos de las capas de puntos a excel

Ilustración 25: Procedimiento general para obtener los perfiles de temperatura en cuerpos hídricos

Fuente: (Elaboración propia, 2018)

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

3.2.2 Obtención de imágenes térmicas

Se realizaron 5 salidas de campo para detectar vertimientos. Dos en la quebrada Doña María en Itagüí, una en la quebrada La Mosca en el municipio de Guarne y en el río Rionegro y dos en la quebrada Las Palmas.

Quebrada Doña Maria

Los días 17 y 22 de agosto de 2018 en las horas de la madrugada se tomaron fotos térmicas de la quebrada Doña María en la zona urbana del municipio de Itagüí.

Para la detección de vertimientos se caminó por la orilla de la quebrada desde la desembocadura de la quebrada en el río Medellín, cerca de la calle 75 #42-140 (bomba de gasolina Texaco #3) hasta la calle 47A #53-121 (cercana del supermercado Metro Cencosud), es decir, se recorrieron aproximadamente 3 km. La accesibilidad para realizar la toma de fotos térmicas fue limitada, ya que la quebrada se encontraba rodeada de edificios, muros, casas, entre otras estructuras que dificultaron el paso.

En el mapa 4 se puede observar el recorrido que se realizó por la quebrada Doña María. El recorrido no fue continuo en todas las secciones de la quebrada, ya que existía infraestructuras que impedían el acceso a la quebrada y se tuvo que tomar caminos alternos para realizar la toma de las imágenes térmicas. La línea gris de mapa 4 ilustra el trayecto realizado y la línea azul representa la quebrada Doña María.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



Mapa 4: Trayecto realizado en la quebrada Doña María

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Algunas zonas aledañas a la quebrada eran oscuras, solas y generaban un ambiente inseguro, por tal razón se contó con la presencia de la Policía Nacional. Para asegurar el acompañamiento policiaco, el protocolo dice que se debe llamar al CAI más cercano con 10 minutos de. Las llamadas se realizaron para las dos salidas de campo, pero se tuvo que esperar más de 30 minutos en ambas salidas para que los patrulleros llegaran. Lo anterior implicó un retraso en la logística de las salidas.

Durante los recorridos se encontraron muchos sitios con vertederos, tubos e infraestructuras sin ningún efluente (ver fotos 5 y 6). Los vertimientos de aguas residuales seguramente se realizan en un horario diferente al de la salida de campo y por eso no se registraron caudales.

En la foto 5 se observó un tubo por donde posiblemente salgan descargas de aguas residuales. En el momento de la captura de la imagen no se evidencio vertimiento. La toma de la imagen fue a las 5:40 am y a esta hora en muchos hogares apenas se están levantando y preparándose para ir al lugar de trabajo o de estudio o las personas que habitan la vivienda siguen dormidos.



Foto 5: Posibles efluentes en la quebrada Doña María (imagen RGB izquierda, térmica derecha)

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



Foto 6: Posibles efluentes en la quebrada Doña María (imagen RGB izquierda, térmica derecha)

En la foto 6 se evidenció un tubo donde posiblemente se presente descargas de aguas residuales. La foto fue tomada a las 5:40 am y en ese instante no se evidencio ningún vertimiento ya que la temperatura del cuerpo hídrico permaneció en 17,8 °C.

Los vertimientos de aguas residuales de la quebrada solo se lograron percibir por la presencia de vertederos, infraestructura o efluentes perceptibles al ojo humano (ver foto 7), puesto que al escanear la quebrada con la cámara térmica no era sencillo identificar las descargas entre múltiples elementos con distintas temperaturas como: rocas, maleza, residuos de todo tipo e infraestructura de concreto o metal. En la foto 7 el vertimiento no es visible en la imagen térmica puesto que tiene una temperatura de 20,8°C, en tanto que las rocas aledañas 20°C.

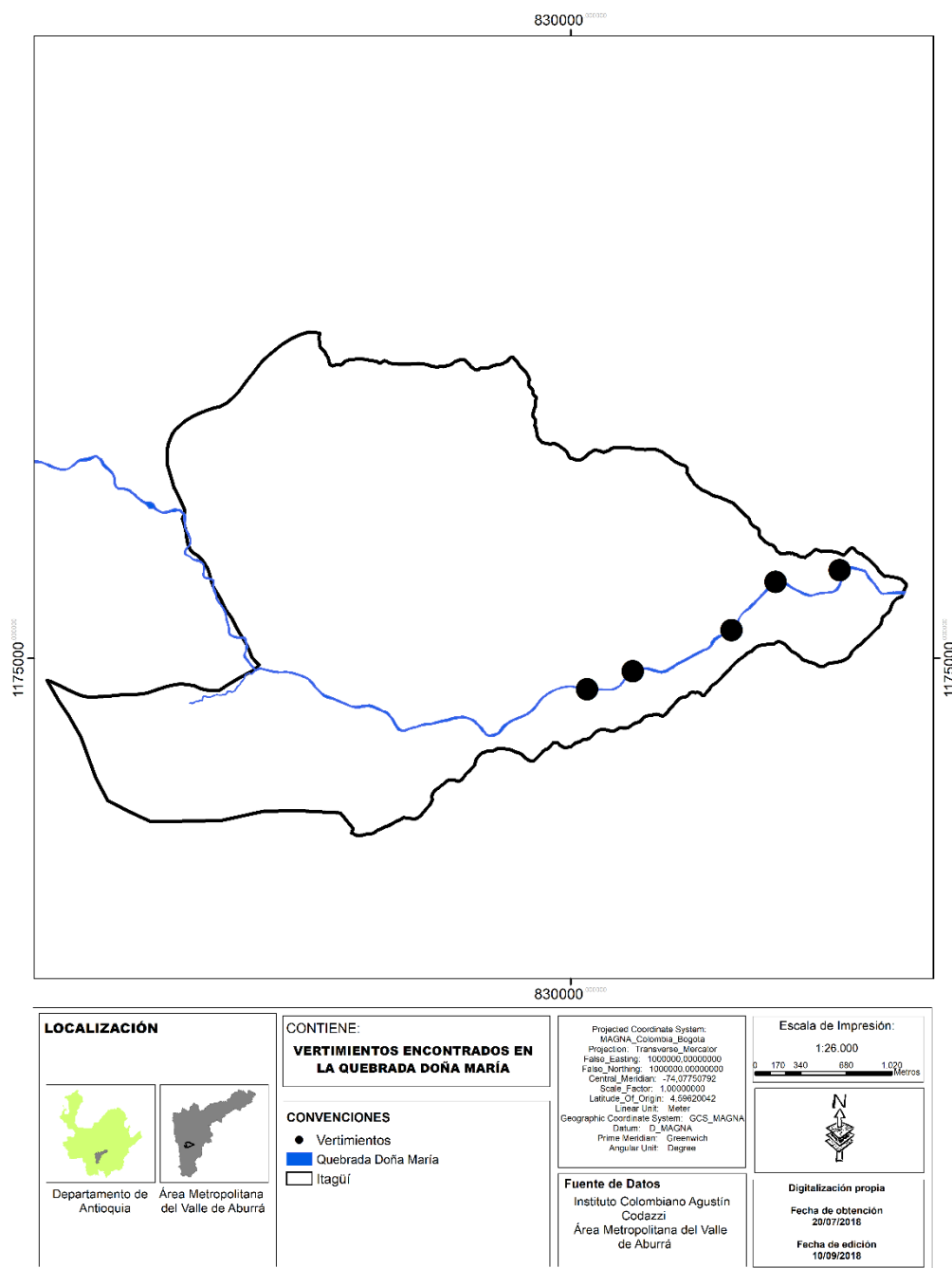
Se encontraron, en total, 5 vertimientos de aguas residuales, los cuales se presentan en el mapa 5.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



Foto 7: Vertimiento de agua residual en la quebrada Doña María (imagen RGB izquierda, térmica derecha)

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



Mapa 5: Vertimientos encontrados en la quebrada Doña María en el municipio de Itagüí usando imágenes térmicas

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Quebrada La Mosca

El día 22 de septiembre de 2018 se realizó una salida de campo en horas de la madrugada a la quebrada La Mosca, en el municipio de Guarne. Se recorrió la quebrada desde la plaza de mercados de la zona urbana hasta el estadio Nando Alvarez, es decir, 1 km aproximadamente.

La zona de estudio resultó segura y de fácil acceso para la toma de imágenes. La quebrada está rodeada de viviendas y no se observaron edificios ni infraestructuras que limitaran el paso.

Al igual que en la salida de campo realizada en la quebrada Doña María, los vertimientos de aguas residuales de la quebrada solo se lograron percibir por la presencia de vertederos, infraestructura o efluentes perceptibles al ojo humano (ver fotos 8 y 9). Se encontraron en total 2 vertimientos de aguas residuales, los cuales se presentan en el mapa 6.

En la foto 8 se evidenció la presencia de un vertimiento porque se percibió el efluente a simple vista. Al analizar la imagen se encontró que la temperatura del cuerpo hídrico era de 17,2 °C, la temperatura de la vegetación 16,4 °C y la temperatura del vertimiento de 17,9 °C. Esta última medición tiene demasiadas incertidumbres por la vegetación presente por donde pasa el vertimiento la cual puede disminuir la temperatura real del vertimiento.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



Foto 8: Vertimiento de agua residual en la quebrada La Mosca (imagen RGB izquierda, térmica derecha)

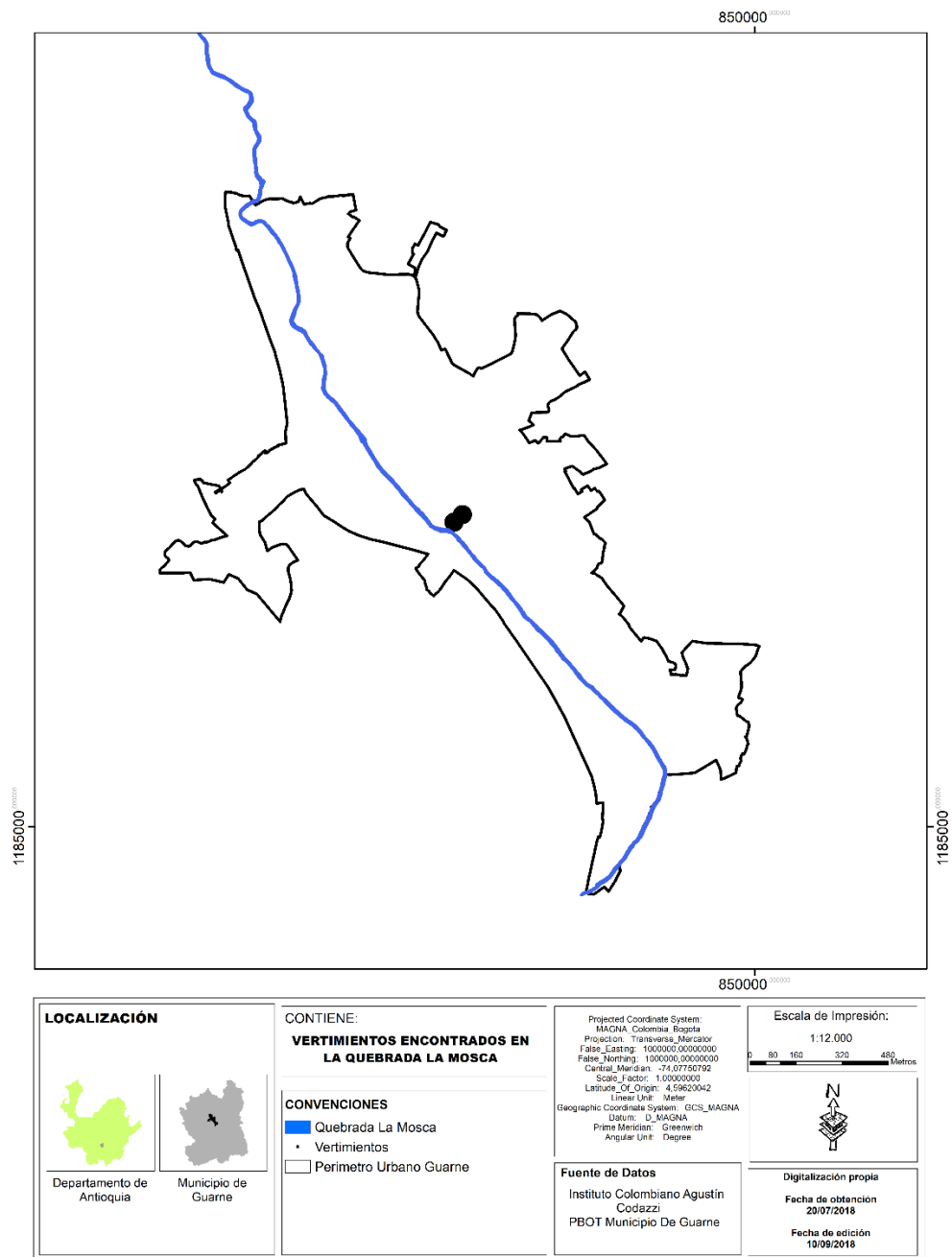
En la foto 9 se evidenció la presencia del vertimiento por la presencia de un vertedero de concreto. Las temperaturas del vertimiento, del cuerpo hídrico y la zona de mezcla se discutirán en la sección de análisis de las imágenes térmicas.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



Foto 9: Vertimiento de agua residual en la quebrada La Mosca (imagen RGB izquierda, térmica derecha)

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



Mapa 6: Vertimientos encontrados en la quebrada La Mosca en el municipio de Guarne

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Río Rionegro

El día 22 de septiembre de 2018 se realizó una salida de campo en horas de la madrugada al río Rionegro. Se caminó a orillas del río por el parque lineal del municipio dentro de la zona urbana desde el centro comercial San Nicolás hasta la glorieta donde se intersectan la calle 47 con la 43. La distancia recorrida fue de 1 km, aproximadamente.

De todos los lugares de estudio el río Rionegro fue el más accesible y cómodo a la hora de tomar las fotos. No tenía infraestructuras, viviendas o edificios que obstaculizaron el paso. Lo anterior se debe a la implementación de andenes, espacio público y ciclorutas dentro del parque lineal. Sin embargo, no se encontró ningún vertimiento evidente. No se lograban percibir a simple vista infraestructuras de vertederos dentro del río y la diferencia de temperatura dentro del cuerpo de agua no indicó la presencia de alteraciones evidentes (ver foto 10).

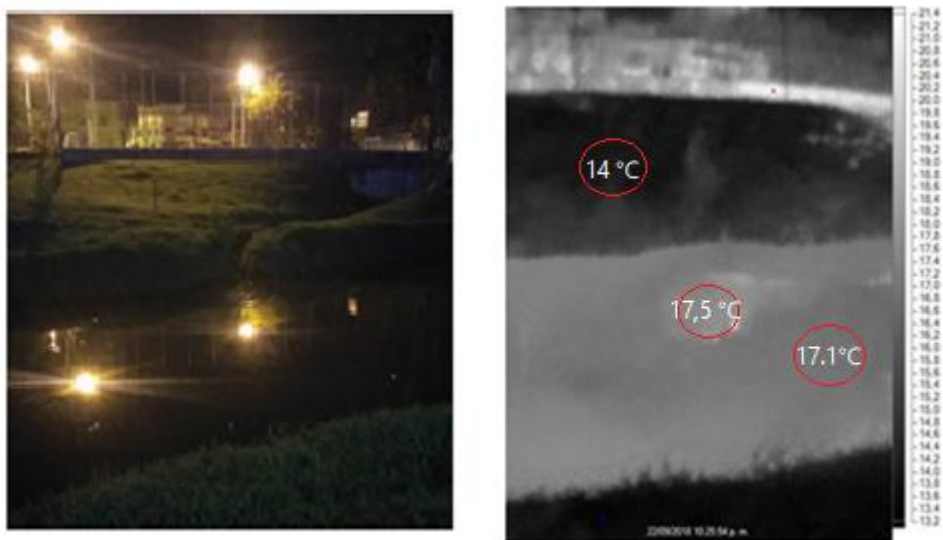


Foto 10: Imagen a color (izquierda) y térmica (derecha) del río Rionegro

En la foto 10, los valores más altos de temperatura se debieron a la reflexión especular de las lámparas dentro del cuerpo de agua, lo que generó falsos puntos calientes y la alteración de la medición (basado en FLIR, 2018), en este caso el valor fue de 17,5 °C. La temperatura del cuerpo de agua fue de 17,1 °C y la

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

temperatura de la vegetación 14 °C. En la sección de análisis de imágenes térmicas se discutirá detalladamente esta imagen.

Quebrada Las Palmas

El día 3 de octubre del 2018 se realizó una salida de campo a la quebrada Las Palmas por los lados del restaurante Sancho Paisa. El recorrido fue corto y solo se percibió una descarga en la quebrada, la cual se identificó por la presencia de la infraestructura del vertedero (ver foto 11). Durante la salida, el celular no tenía instalada la aplicación ODK Collect, ni se contaba con GPS. Solo se logró tomar las fotografías térmicas y normales del vertimiento, por lo que no se incluye un mapa.

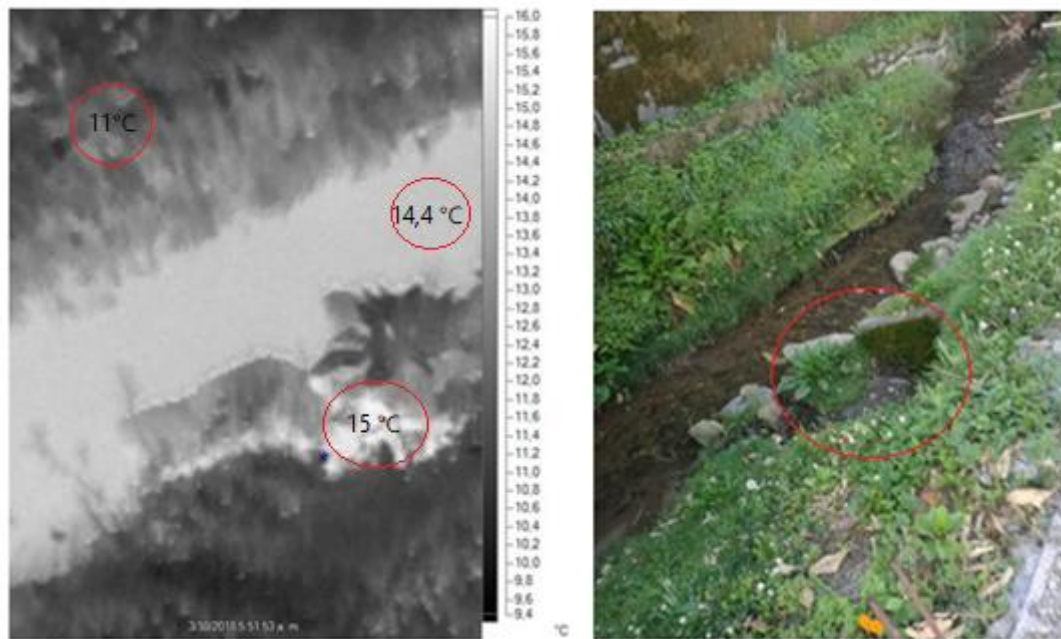


Foto 11: Vertimiento de agua residual en la quebrada Las Palmas (imagen RGB izquierda, térmica derecha)

La fotografía 11 fue tomada a las 6:00 am. Se observa la presencia de un vertimiento por la presencia de un vertedero de concreto. La temperatura del vertimiento fue de

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

15 °C y la temperatura del cuerpo hídrico fue de 14,4°C. La temperatura de la vegetación es de 11 °C. En la sección de análisis de imágenes térmicas se discutirá detalladamente esta imagen.

En la tabla 8 se resumen los vertimientos encontrados de las salidas de campo con sus principales características. Se encontraron 5 vertimientos en la quebrada Doña María y 2 vertimientos en la quebrada La Mosca. Para la descarga de la quebrada Las Palmas no se contaba con la aplicación ODK por eso no se incluyó en la tabla 8. Los vertimientos encontrados en el río Rionegro no tenían un caudal visible de descarga.

Todos los vertimientos se evidenciaron por la presencia de infraestructura como vertederos, tubos o efluentes visibles (ver tabla 8). Se caracterizó cualitativamente el caudal de los vertimientos en una escala de 1 a 3 siendo 3 el valor más alto. Ningún vertimiento alcanzó el valor máximo de caudal. La caracterización cualitativa de olor, color, caudal y la existencia de infraestructuras que calienten los vertimientos no son criterios suficientes para establecer si la descarga es de agua residual, doméstica, lluvia o procedente de actividades industriales. Para caracterizar mejor los vertimientos se requieren de la evaluación más exhaustiva de parámetros físico químicos del agua como, pH, sólidos suspendidos, turbiedad, DBO, BQO entre otros. El río Rionegro fue el cuerpo de agua con mayor caudal y posiblemente esto dificultó la identificación de algún vertimiento en la zona. En la sección análisis de imágenes térmicas se explicará con mayor detalle porque las fotos del río Rionegro describen un cuerpo hídrico sin alteración aparente.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

# vertimiento	Quebrada/ Río	Latitud	Longitud	Altitud	Fecha	Hora	Color	Olor	Tipo de vertimiento	Calentamiento por otra fuente	Caudal 1-3	Comentario
1	Doña María	6,182475	- 75,595183	1526,1	17/08/2018	6:31:00 a. m.	no	si	visible	si (vertedero de concreto)	1	Al lado de una zona industrial
2	Doña María	6,181675	- 75,599500	1514,7	22/08/2018	5:07:00 a. m.	no	no	visible	si (vertedero de concreto)	2	Al lado de una empresa de estructuras metálicas
3	Doña María	6,178402	- 75,602462	1500,9	22/08/2018	5:26:00 a. m.	si	no	visible	no	1	Es una descarga que contiene espuma su vertimiento debe ser aguas arriba
4	Doña María	6,175615	- 75,609112	1489,0	22/08/2018	5:53:00 a. m.	si	no	visible	si (vertedero de concreto)	1	A lado de una construcción de edificios
5	Doña María	6,174395	- 75,612182	1561,2	22/08/2018	6:07:00 a. m.	no	no	visible	Si (tubo de concreto y plástico)	1	Al lado del jumbo de Itagüí
6	La Mosca	6,276910	- 75,442348	2146,8	22/09/2018	8:32:00 p. m.	no	no	visible	no	2	Agua estancada
7	La Mosca	6,277145	- 75,442085	2126,5	22/09/2018	8:38:00 p. m.	si	no	visible	si (vertedero de concreto)	2	Vertimiento de color café
8	Rionegro	6,149700	- 75,372343	2092,1	22/09/2018	10:14:00 p. m.	no	no	visible	no	0	No se ve caudal de descarga
9	Rionegro	6,151133	- 75,370558	2105,6	22/09/2018	10:24:00 p. m.	no	no	visible	no	0	No se ve caudal de descarga

Tabla 8: Resumen de los vertimientos encontrados en las salidas de campo

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

3.2.3 Análisis de las imágenes térmicas

Siguiendo la metodología establecida para el procesamiento de la información térmica, los resultados obtenidos se describen en este capítulo. Se desarrollaron dos secciones. La primera evidencia los resultados de cuerpos hídricos sin alteración aparente. La segunda analiza las fotos térmicas con vertimientos.

Resultados de cuerpos hídricos sin alteración aparente

Las imágenes térmicas tomadas en la quebrada de la UEIA y de río Rionegro fueron en zonas aparentemente inalteradas. A continuación, se describen los resultados.

Quebrada de la UEIA

Los ejes para establecer los perfiles de temperatura de la quebrada y las temperaturas de las zonas de interés se muestran en la foto 12.

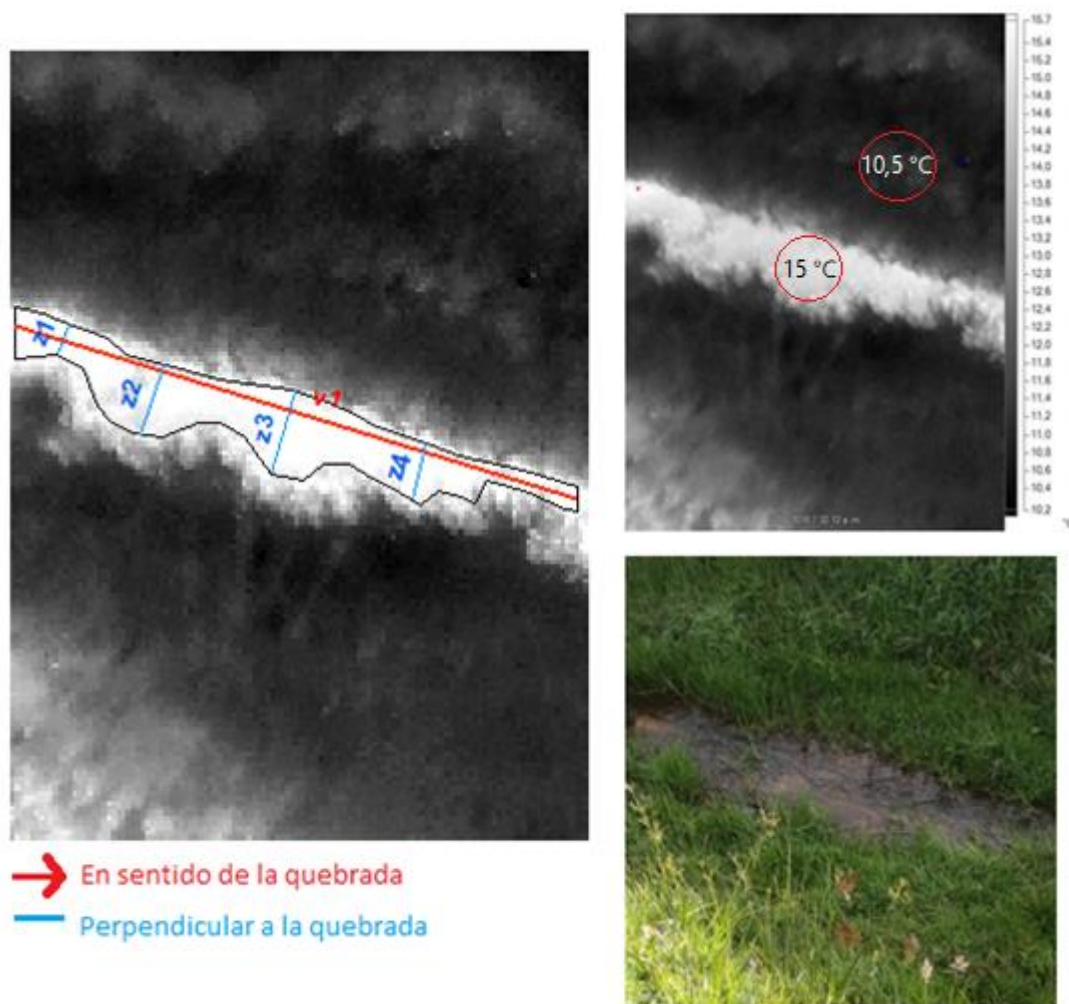
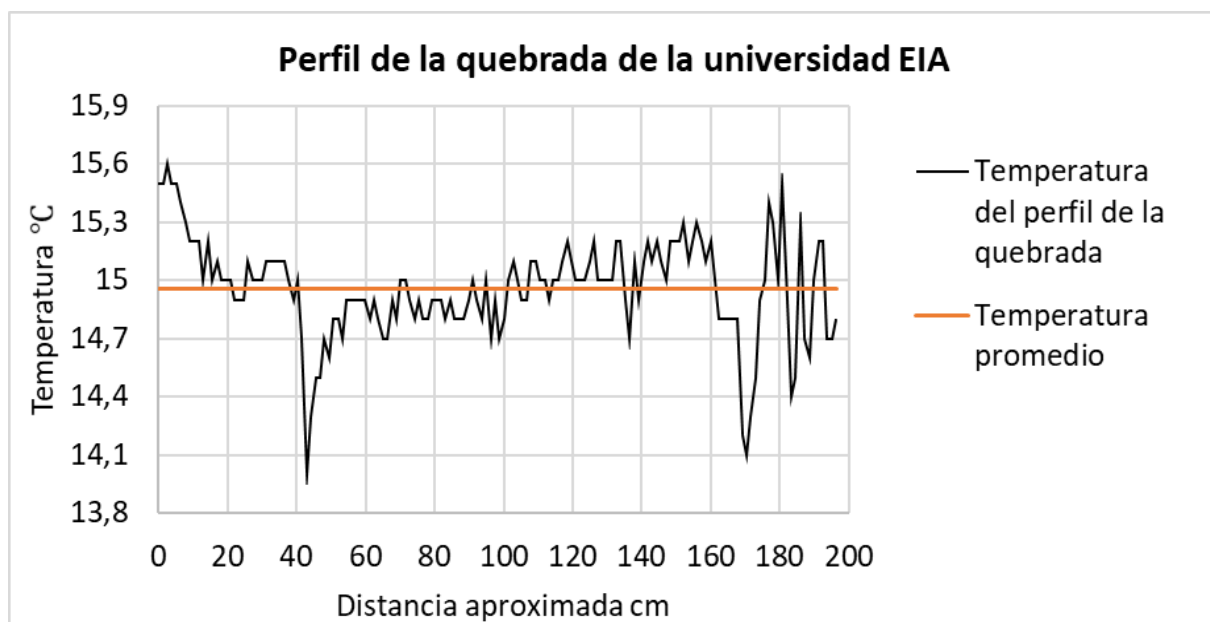


Foto12: Ejes para perfiles térmicos en la quebrada sin alteración aparente en la Universidad EIA (en blanco y negro fotos térmicas)

El perfil de temperatura de la quebrada de la universidad EIA se estableció a través de la línea v1 (ver gráfica 1). La distancia se estimó mediante el conteo de los píxeles de la imagen basado en la cobertura observada de cada imagen. En este caso, la línea roja (v1) tenía una longitud aproximada de 2 m.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



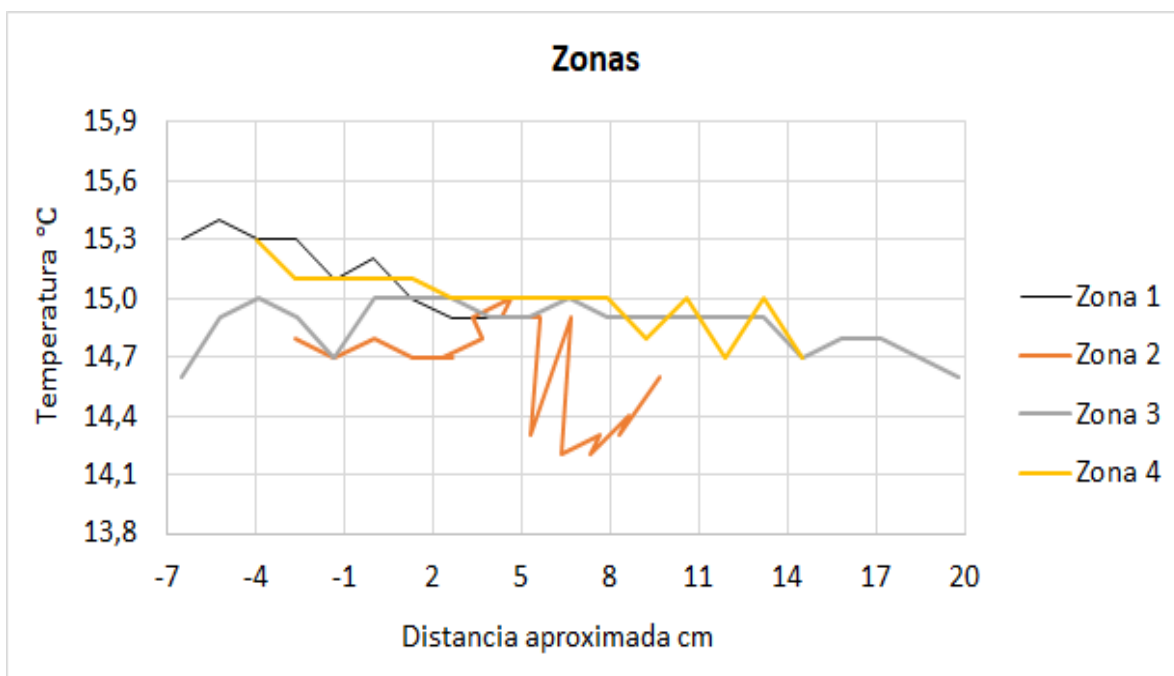
Gráfica 1: Perfil de temperatura de la quebrada Universidad EIA a lo largo del eje longitudinal

La temperatura de la quebrada en la Universidad EIA fluctuó entre 14,0 y 15,6 °C. Los valores más bajos de temperatura corresponden a la vegetación localizada dentro de la quebrada, la cual tuvo una temperatura menor al cuerpo hídrico debido a la ausencia de radiación solar y la influencia del viento sobre las hojas (10,5°C).

La temperatura promedio de la quebrada de la Universidad EIA fue de 14,8°C. La temperatura más alta fue de 15,7 °C. La diferencia entre la temperatura promedio y la temperatura máxima fue menor a un grado centígrado, lo que indica que posiblemente el cuerpo de agua esté sin alteración aparente teniendo en cuenta que los aumentos de temperatura de 1 a 2 ° C pueden afectar las comunidades acuáticas (Dodds & Whiles, 2010).

Para los ejes transversales, correspondientes a los nombrados como z1, z2, z3 y z4, se observaron los siguientes perfiles de temperatura (ver gráfica 2).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



Gráfica 2: Perfil de temperatura a lo largo de los ejes transversales 1, 2, 3 y 4 de la quebrada de la Universidad EIA

Las temperaturas obtenidas a lo largo de los ejes transversales están comprendidas entre 14,2 y 15,4 grados centígrados. La zona 2 fue la que mayor variación de temperaturas presentó. Lo anterior se debió a la alta presencia del pasto (con una temperatura de 10,5°C) dentro de la quebrada. Las fluctuaciones generadas en las zonas 1, 3 y 4 fueron menores a 1 grado centígrado. La temperatura promedio de la quebrada fue de 14,8 °C y no se observó una temperatura anormal que, de indicios de presentarse zona de mezcla dentro de la quebrada aparte de las generadas por la vegetación.

Es por lo anterior, que se concluye que esta quebrada se encuentra sin alteración aparente ya que las diferencias encontradas en la temperatura son menores a un grado centígrado y es consecuente con la línea base del proyecto.

Río Rionegro

Los ejes para establecer los perfiles de temperatura del río Rionegro se muestra en la foto 12.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

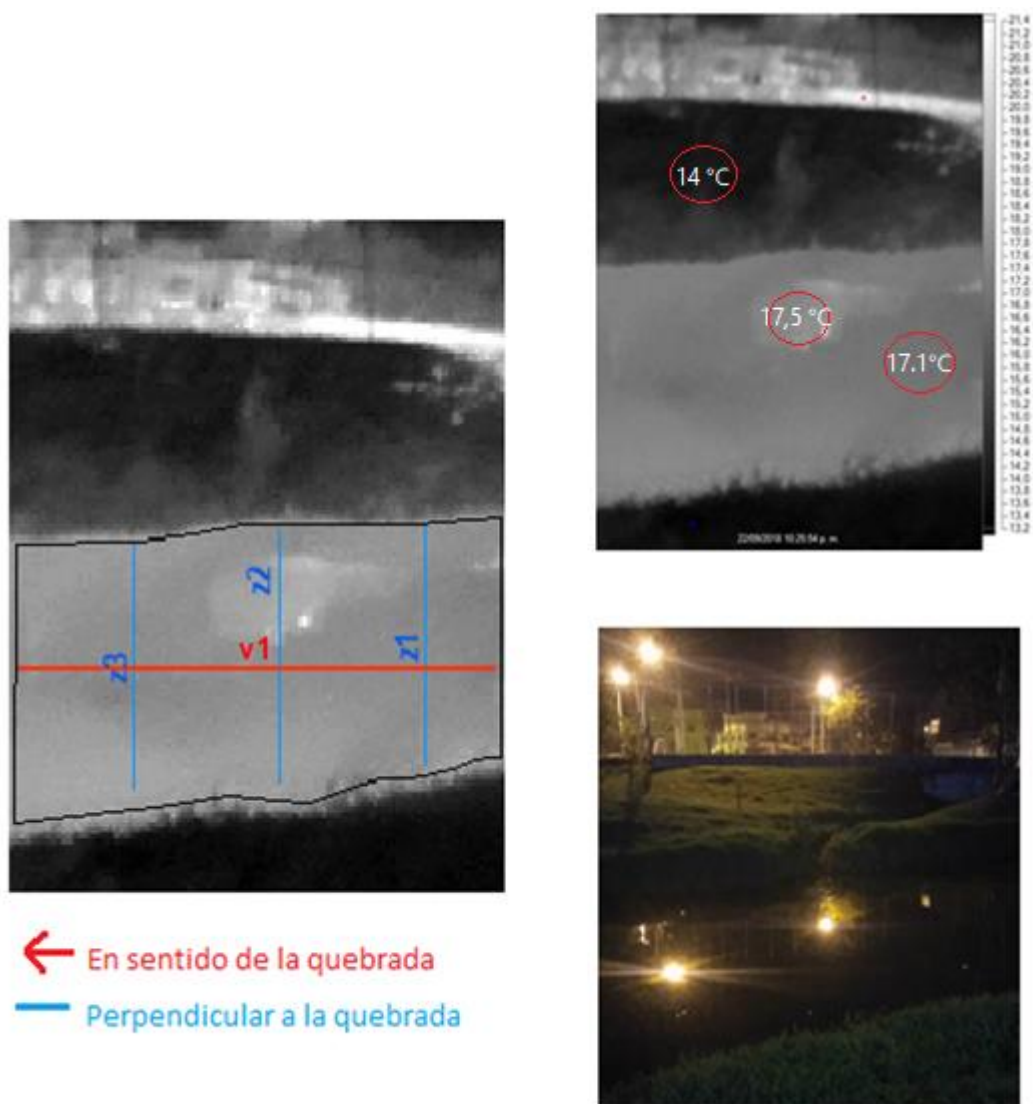
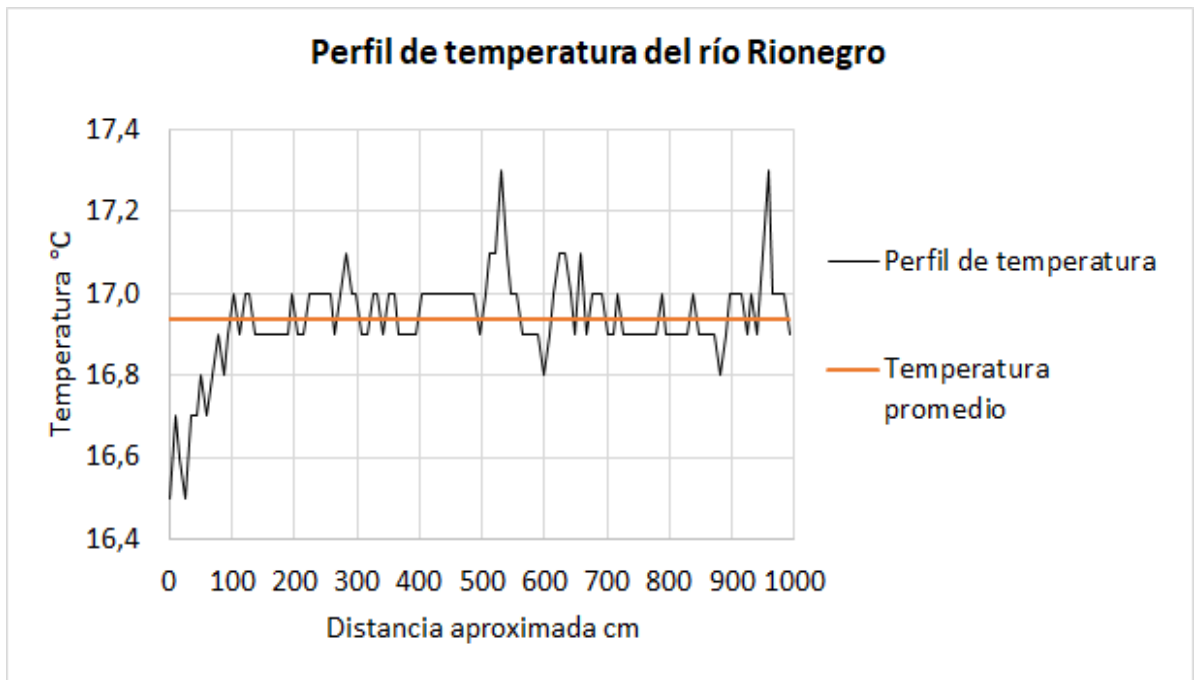


Foto 12: Ejes para perfiles de temperatura en el río Rionegro

El perfil de temperatura del río Rionegro fue obtenido sobre la línea v1 (ver gráfica 3).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

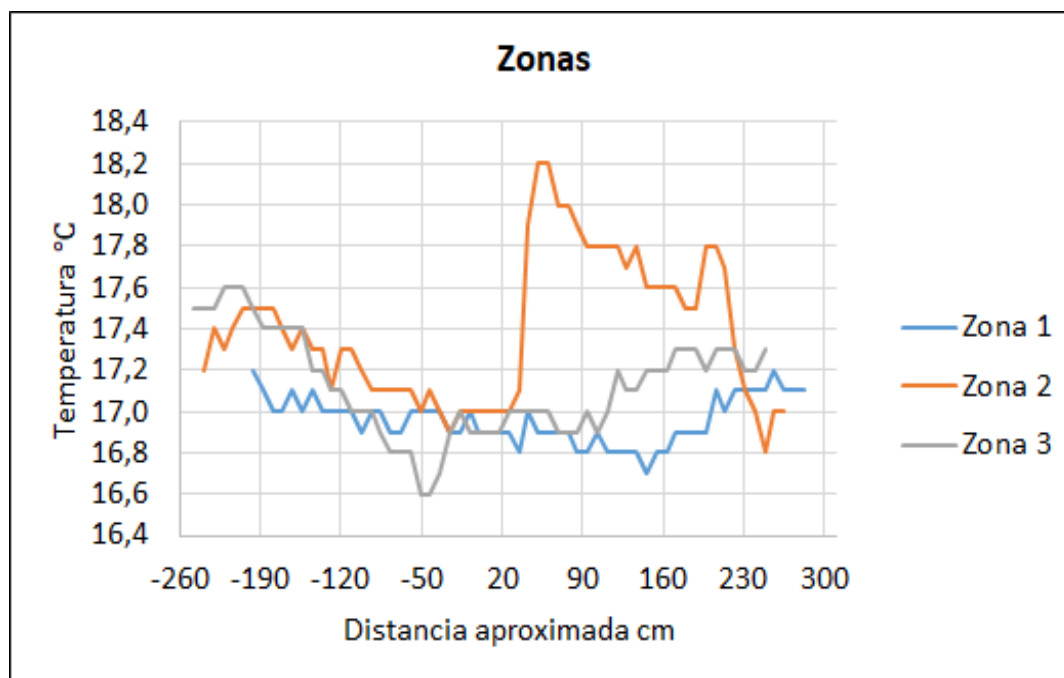


Gráfica 3: Perfil de temperatura del río Rionegro a lo largo del eje longitudinal

A lo largo del eje longitudinal, el río Rionegro presentó una temperatura entre 16,5 °C y 17,3 °C. Los valores más altos de temperatura se debieron a la reflexión especular de las lámparas dentro del cuerpo de agua, lo que generó falsos puntos calientes y la alteración de la medición (basado en FLIR, 2018), en este caso el valor generado por la reflexión de la luz fue de 17,5 °C. No se observa un cambio de temperatura significativo fuera de los establecidos por la luz de las lámparas. El valor promedio del cuerpo de agua fue de 17,1 °C

Para los ejes transversales 1, 2 y 3, correspondientes a la nomenclatura z1, z2 y z3, se observó los perfiles de temperatura mostrados en la gráfica 4.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



Gráfica 4: Perfil de temperatura en lo largo de los ejes transversales 1, 2, 3 del río Rionegro

Las temperaturas de los ejes transversales están comprendidas entre los 16,6 y 18,2 grados centígrados. La zona 2 es la zona con mayor variación de temperatura. Lo anterior es debido a la presencia del reflejo de las lámparas dentro del cuerpo de agua. Las diferencias de temperatura encontradas en la zona 1 fueron menores a un grado centígrado. Si no se tuviese en cuenta las variaciones de temperatura en la zona 2 y 3 por la presencia del reflejo de las lámparas, las diferencias de temperaturas encontradas de todas las zonas no serían mayores a 1 grado centígrado.

Es por lo anterior, que se concluye que el río Rionegro se encuentra sin alteración aparente ya que las diferencias encontradas en la temperatura del cuerpo hídrico son menores a un grado centígrado exceptuando las zonas donde las reflexiones especulares de la luz de las lámparas generan falsos puntos calientes. Sin embargo, esta información debe ser corroborada con la ayuda de termómetros puntuales, para determinar la desviación de las mediciones.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Del procedimiento para obtener las temperaturas promedio de cuerpos de agua sin alteración aparente se obtuvieron los siguientes datos (ver tabla 9).

Nombre de la quebrada o Río	Temperatura promedio °C	Temperatura máxima °C	Temperatura mínima °C	Hora de toma de la imagen
Río Rionegro	17,1	21	16,1	10:00 p. m.
Quebrada Universidad EIA	14,8	15,7	13,2	6:00 a. m.
Quebrada Las Palmas	13,8	14,4	12,6	6:00 a. m.

Tabla 9: Temperaturas de cuerpos hídricos sin alteración aparente

Las diferencias entre las temperaturas máximas y mínimas para cada cuerpo hídrico son debidas a las emisividades generadas por elementos expuestos como piedras, vegetación, concreto y reflexión especular de la luz de lámparas, las cuales generan incertidumbre y son las causantes de las desviaciones de las mediciones.

Para la quebrada de la Universidad EIA y la quebrada Las Palmas la diferencia entre la temperatura promedio y la temperatura máxima fue menor a dos grados centígrados, lo que indica que posiblemente estos dos cuerpos de agua estén sin alteración aparente teniendo en cuenta que los aumentos de temperatura de 1 °C a 2 °C pueden afectar las comunidades acuáticas (Dodds & Whiles, 2010).. Para el río Rionegro la diferencia entre la temperatura promedio y la temperatura máxima encontrada en el cuerpo hídrico es mayor a 2 grados centígrados. A pesar del resultado, se concluye que el río Rionegro esta aparentemente inalterado, ya que las reflexiones especulares de la luz de las lámparas generan incertidumbres que están afectando la medición de la temperatura y debe ser verificada con información obtenida de termómetros puntuales.

La temperatura promedio del río Rionegro fue mayor a las establecidas en la quebrada de la Universidad EIA y la quebrada Las Palmas. Lo anterior da indicios al posible calentamiento generado solo por la influencia de las zonas urbanas en los cuerpos de agua. El río Rionegro atraviesa la zona urbana del municipio, en cambio las fotos de las quebradas de la Universidad EIA y la quebrada Las Palmas posiblemente tienen menos intervención antrópica, lo cual explica los resultados obtenidos.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Resultado de cuerpos hídricos con vertimientos

A continuación, se muestran los resultados de las imágenes térmicas obtenidas en campo con sus respectivos vertimientos de la quebrada Las Palmas, Doña María y La Mosca.

Quebrada Las Palmas

En la foto 13 se observó uno de los vertimientos de la quebrada Las Palmas, identificado por la presencia de un vertedero, el cual se señaló con un círculo rojo.

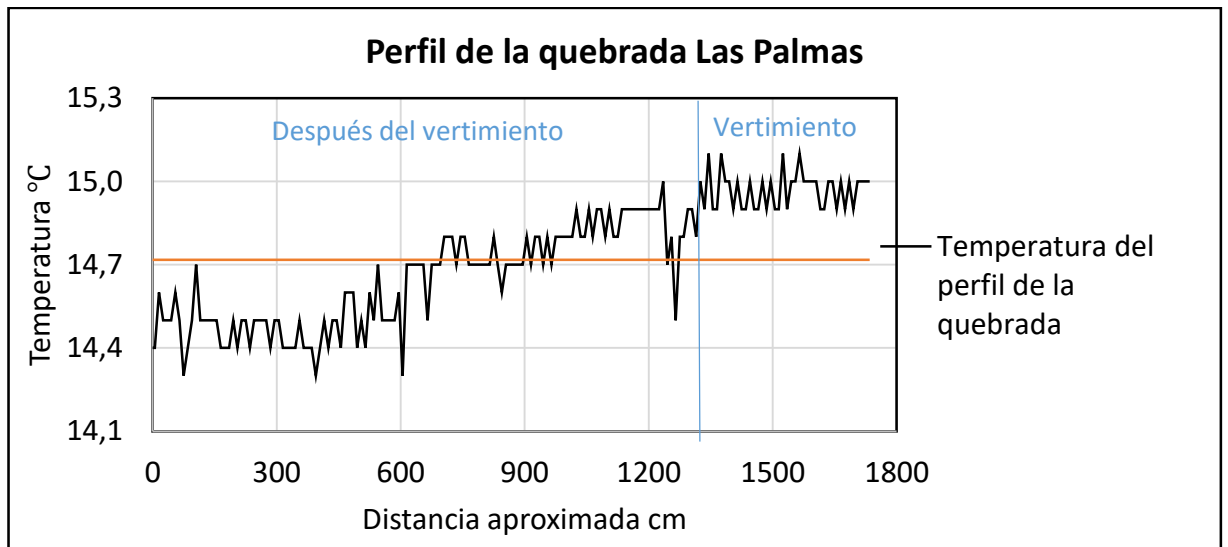
La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



Foto 13: Vertimiento encontrado en la quebrada Las Palmas

El perfil de temperatura longitudinal de la quebrada Las Palmas se obtuvo utilizando la línea v1 (ver gráfica 5)

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



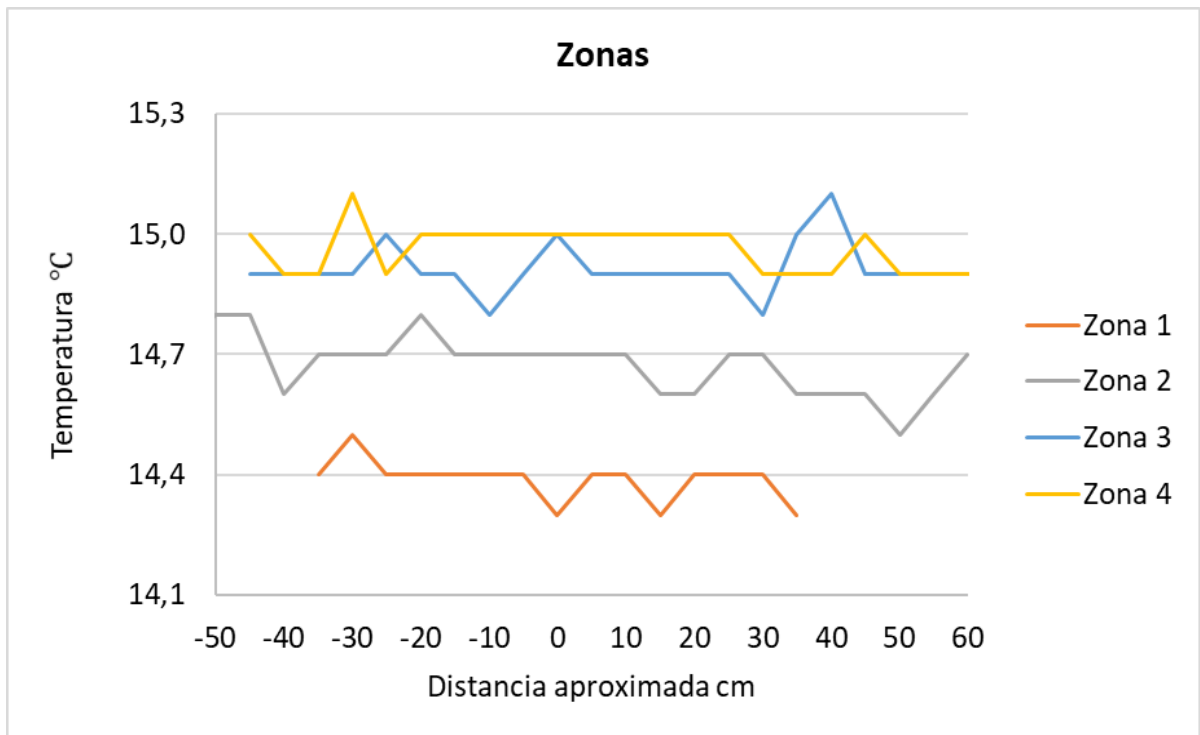
Gráfica 5: Perfil de temperatura a lo largo del eje longitudinal de la quebrada Las Palmas

El perfil de temperatura de la quebrada muestra un incremento significativo. Lo anterior se debe a la presencia del vertimiento entre los ejes z3 y z4. A lo largo de la quebrada se observan diversos materiales con una amplia variedad de temperaturas y emisividades como piedras, corteza, ramas, pastos muertos, hojas y suelo representados en las diversas fluctuaciones de la gráfica. Un ejemplo de estas temperaturas es la de la vegetación la cual era de 11 °C.

La presencia del vertimiento se evidencio de manera directa por la existencia del vertedero por el cual fluía un efluente hacia la quebrada. En la gráfica 5 se observan 3 temperaturas significativa, la temperatura de la quebrada, la zona de mezcla y el vertimiento. En los primeros 300 cm se observa una tendencia a 14,4 °C que posiblemente sea la temperatura de la quebrada, luego de los 300 cm se incrementa la temperatura de la quebrada estableciendo la zona de mezcla, con un valor promedio aproximado de 14,8 °C Y la temperatura del vertimiento tiene un valor de 15 °C.

Los perfiles de temperatura transversales de la quebrada Las Palmas se obtuvieron utilizando las líneas z1, z2, z3 y z4 (ver gráfica 6)

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



Gráfica 6: Perfiles de temperatura a lo largo de los ejes transversales 1, 2, 3 y 4 de la quebrada Las Palmas

Las temperaturas obtenidas en los ejes 1, 2, 3 y 4 están comprendidas desde 14,3 hasta 15,1 grados centígrados. La zona 1 fue la más alejada del vertimiento, lo cual es consecuente con la gráfica ya que contiene los valores más bajos de temperatura. La temperatura promedio de cuerpo de agua se estimó en 14,7 °C. El vertimiento ingresa a la quebrada entre las zonas 3 y 4. La temperatura de la zona de mezcla fue de 14,8 °C aproximadamente.

La identificación del vertimiento utilizando la cámara térmica resultó difícil por la cantidad de incertidumbres y materiales externos que afectaban el contraste de temperatura en el cuerpo hídrico. Solo cuando se procesó la imagen para obtener las gráficas 4 y 5, se identificaron las temperaturas del vertimiento, de la zona de mezcla y del cuerpo hídrico y se validó la presencia de la descarga. Por otro lado, de acuerdo con la línea base, posiblemente el vertimiento sea de agua residual doméstica por que la temperatura del vertimiento se encuentra entre 12°C y 30°C (ver tabla 6). Sin embargo, se deben medir otros parámetros físico-químicos de la

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

descarga para tener argumentos más contundentes para caracterizar el tipo de vertimiento.

Quebrada Doña María

En la quebrada Doña María se analizaron los vertimientos mostrados en las fotos 13,14 y 15.

En la foto 13 se identificó una descarga proveniente de un vertedero de concreto.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

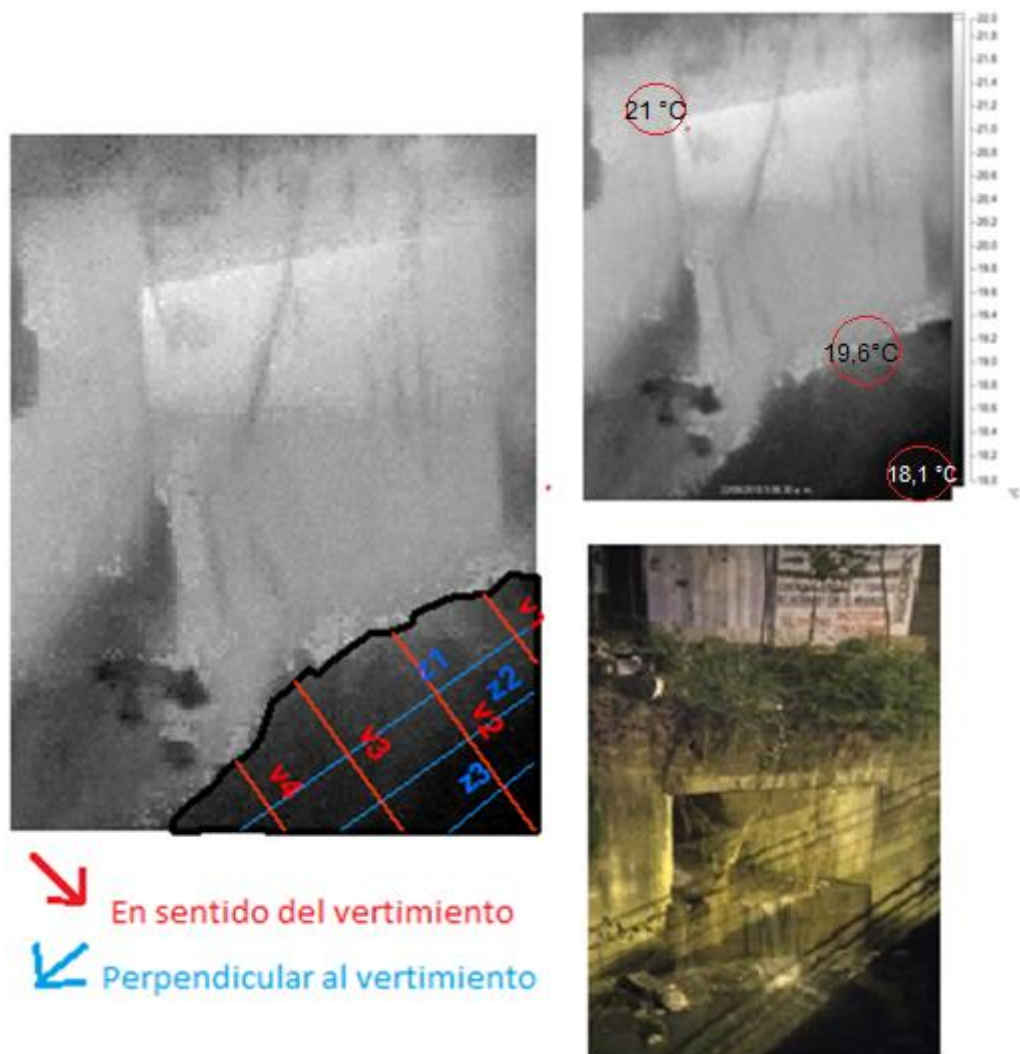
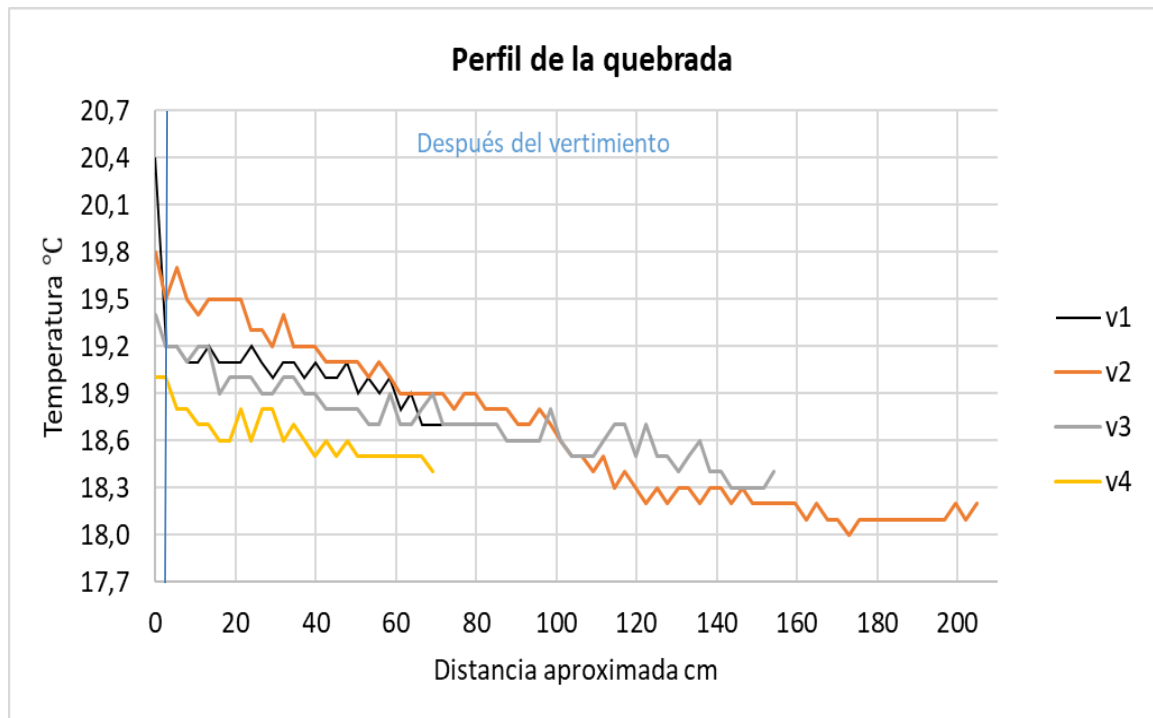


Foto 13: Vertimiento 1 en la quebrada Doña María

Para el análisis de la foto 13 se trazaron varios ejes en sentido del vertimiento. Éstos están representados por las líneas v1, v2, v3 y v4. La decisión fue tomada porque el vertedero en la imagen abarca una amplia zona (alrededor de 2 m). La gráfica 7 presenta los perfiles de la temperatura longitudinales en la quebrada.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

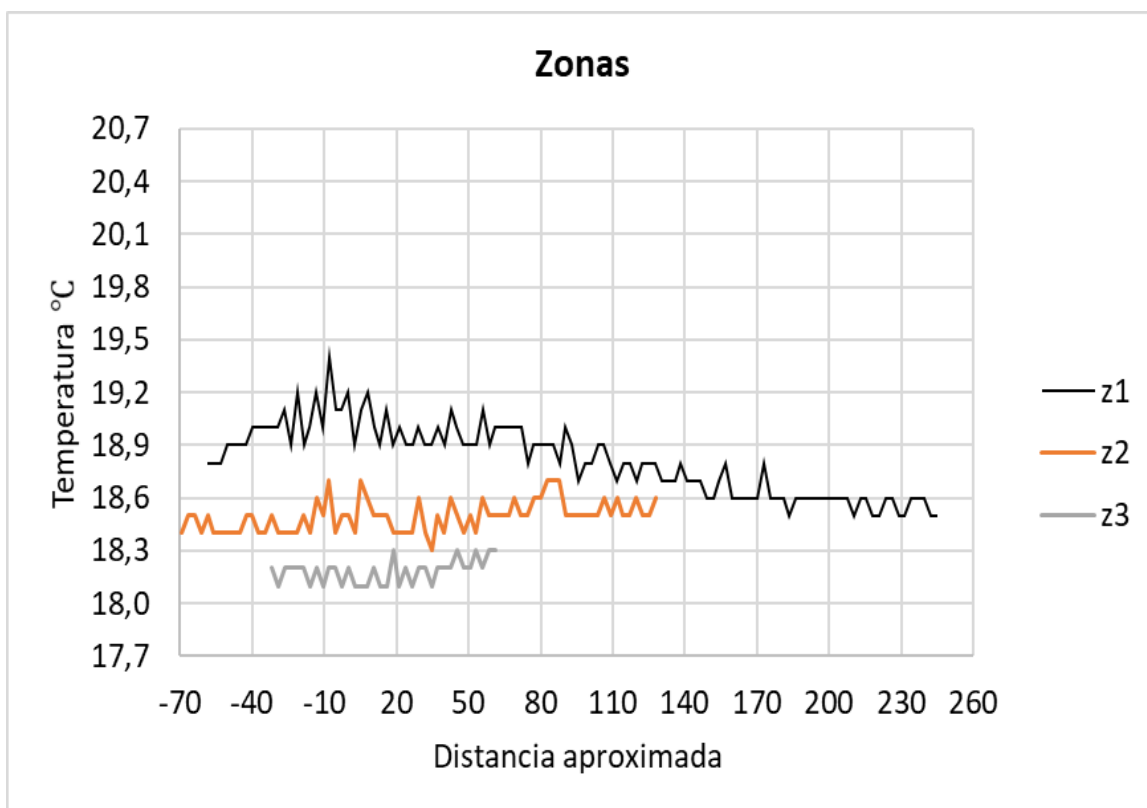


Gráfica 7: Perfiles longitudinales de temperatura de la quebrada Doña María para el vertimiento 1

Las zonas más cercanas al vertimiento tuvieron las temperaturas más elevadas. A medida que el vertimiento avanzó por el cuerpo de agua disminuyó su temperatura en todos los casos. Los caudales en los ejes v1, v2, v3 y v4, a simple vista, parecieran ser distintos, pero los perfiles de temperatura se comportaron de manera similar. La temperatura del cuerpo de agua se ve influenciada, posiblemente, por la presencia del vertedero de concreto, el cual tiene una temperatura de 21 °C. V2 es el eje más representativo para estimar las temperaturas del vertimiento (19,6 °C), la zona de mezcla (18,9 °C) y la temperatura del cuerpo hídrico (18,1 °C).

Los perfiles de temperatura transversales de la quebrada Doña María se obtuvieron utilizando las líneas z1, z2, z3 y z4 (ver gráfica 8).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



Gráfica 8: Perfil de temperatura en los ejes transversales 1, 2 y 3 en la quebrada Doña María para el vertimiento 1

El eje transversal z3 fue el más alejado del vertimiento, por tal razón se utilizó para estimar la temperatura del cuerpo de agua (18,1 °C). De los ejes z1 y z2 la gráfica no fue precisa para calcular la temperatura del vertimiento ni la temperatura de la zona de mezcla.

Al igual que la anterior foto, la identificación del vertimiento utilizando la cámara térmica resultó difícil por la cantidad de incertidumbres y materiales externos que afectaban el contraste de temperatura en el cuerpo hídrico. Solo cuando se procesó la imagen para obtener las gráficas 7 y 8, se identificaron las temperaturas del vertimiento, de la zona de mezcla y del cuerpo hídrico y se validó la presencia de la descarga. Por otro lado, de acuerdo con la línea base, posiblemente el vertimiento sea de agua residual doméstica por que la temperatura del vertimiento se encuentra entre 12°C y 30°C (ver tabla 6). Sin embargo, se deben medir otros parámetros

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

físico-químicos de la descarga para tener argumentos más contundentes para caracterizar el tipo de vertimiento.

En la foto 14 se observa la segunda descarga analizada en la quebrada Doña María. El vertimiento se identificó por la cantidad de espuma estancada en la quebrada. Se trazó el eje longitudinal (v1) en dirección del flujo de agua y los 5 ejes transversales z1, z2, z3, z4 y z5 perpendicular a v1 (ver foto 14)

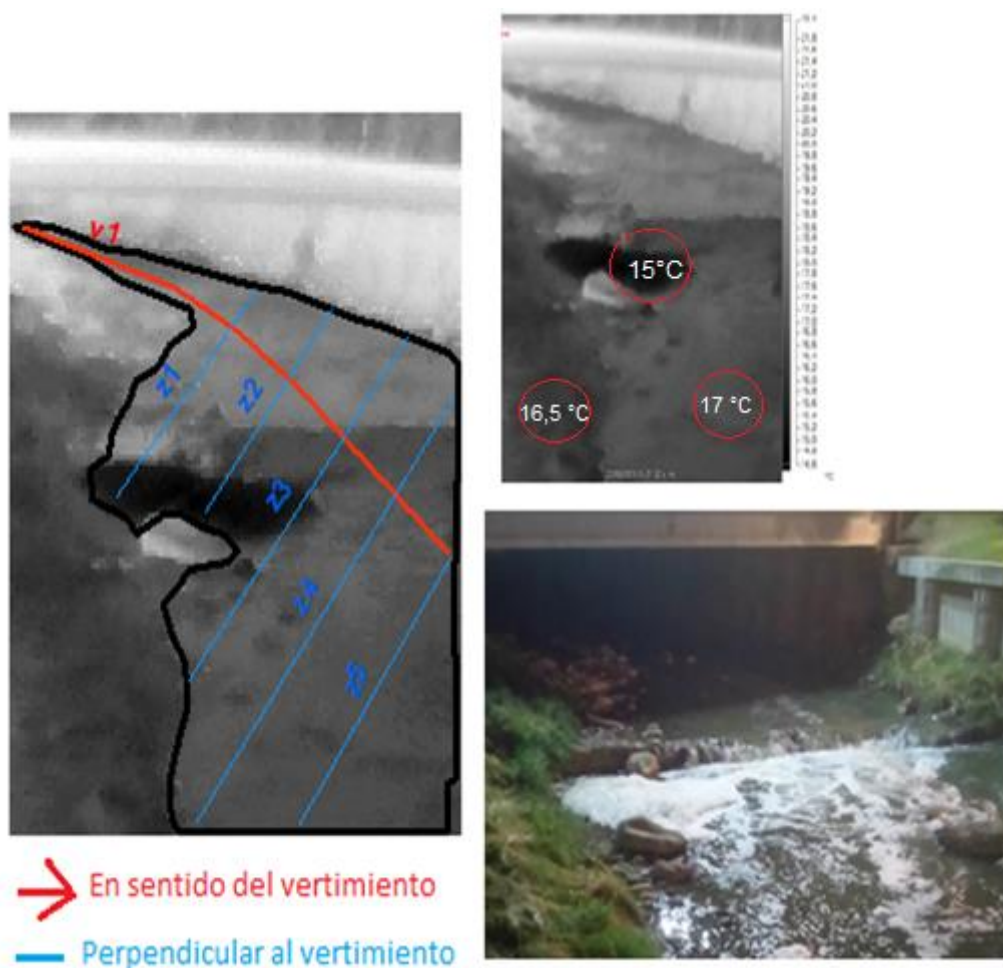
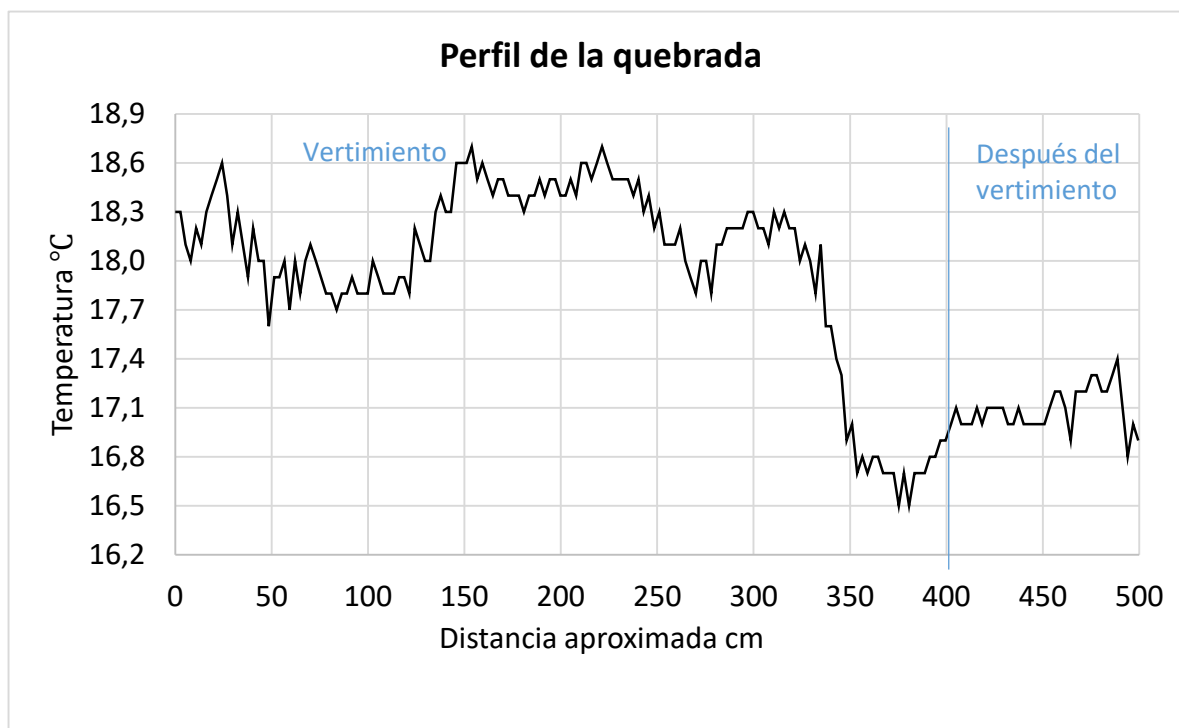


Foto 14: Vertimiento 2 en la quebrada Doña María

El perfil de temperatura longitudinal de la quebrada Doña María se obtuvo utilizando la línea v1 (ver gráfica 9).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

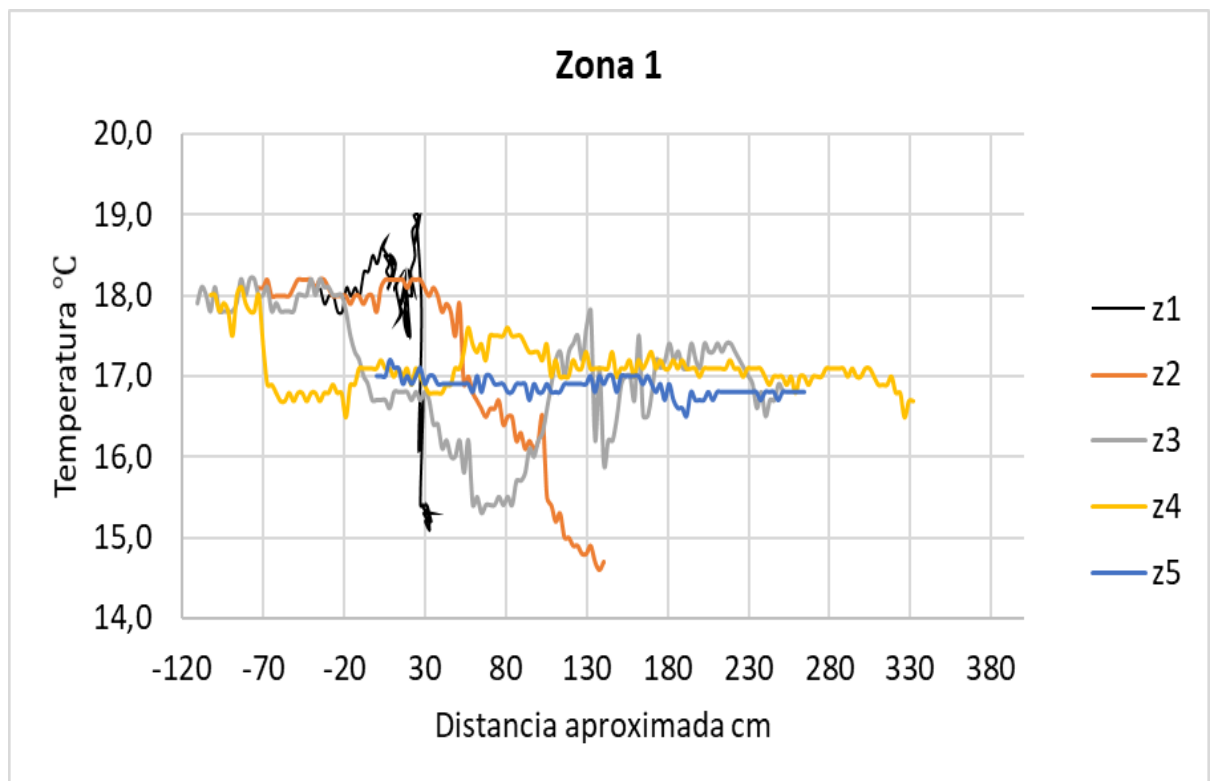


Gráfica 9: Perfil longitudinal de temperatura de la quebrada Doña María para el vertimiento 2

En la gráfica 9 se observa una disminución drástica de temperatura generada por la presencia de espuma, con un valor de temperatura aproximado de 15 °C. Existen fuentes de incertidumbres como rocas y material orgánico que afectan la lectura. La temperatura del material vegetal es de 16,5 °C La información presentada en la gráfica presentó muchas fluctuaciones y no fue suficiente para estimar la temperatura del vertimiento, del cuerpo de agua, ni de la zona de mezcla.

Los perfiles de temperatura transversales de la quebrada Doña María se obtuvieron utilizando las líneas z1, z2, z3, z4 y z5 (ver gráfica 10).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



Gráfica 10: Perfiles de temperatura a lo largo de los ejes transversales 1, 2, 3, 4 y 5 para el vertimiento 2

El eje transversal z1, z2 y z3 presentaron una disminución de la temperatura debido a presencia de la espuma. La temperatura en z5 se estabilizó en 17 °C. Posiblemente para ese trayecto esa sea la temperatura de la quebrada. No se pudo determinar la temperatura de la zona de mezcla ni la del vertimiento.

En la foto 15 se observa una descarga en la quebrada Doña María por la evidencia de un vertedero. El eje longitudinal (v1) se trazó en dirección del vertimiento de agua y los 4 ejes transversales z1, z2, z3, z4 perpendicular a v1 (ver foto 15).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

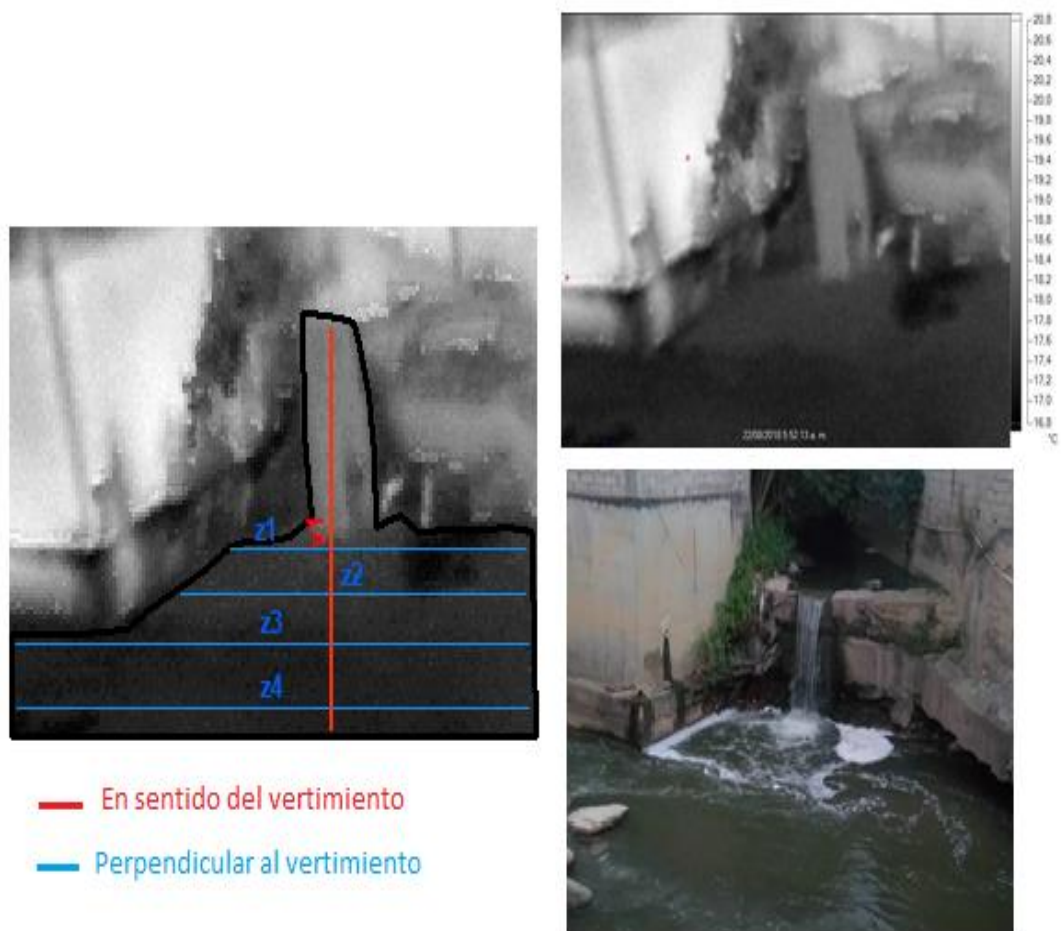
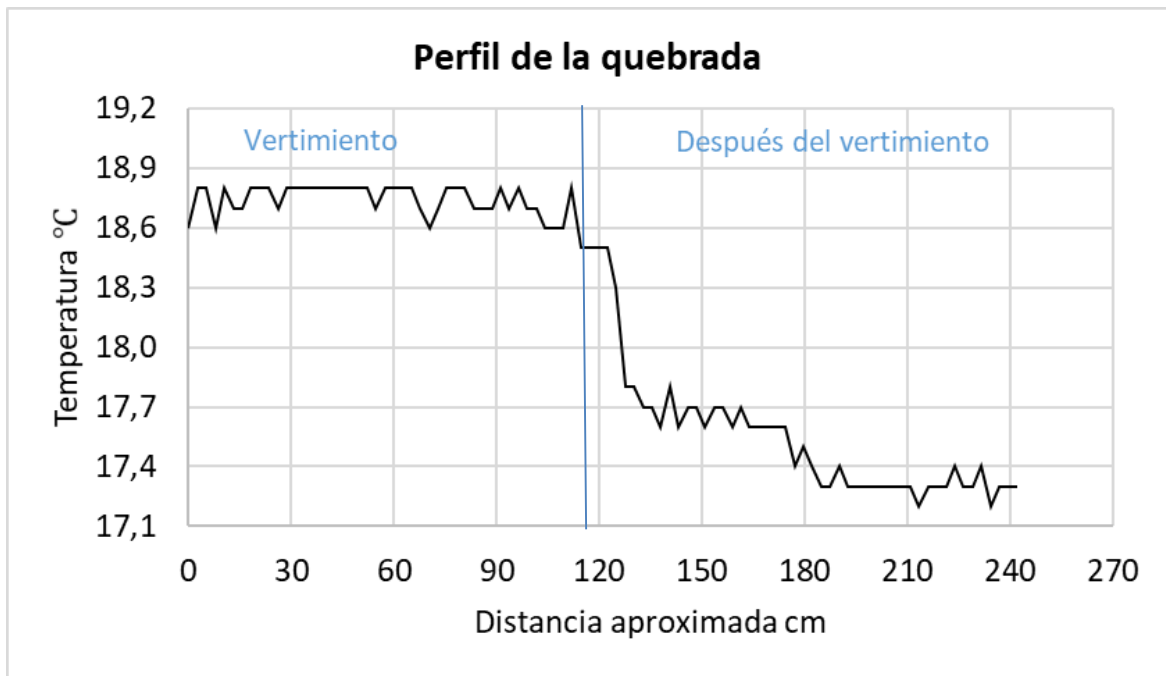


Foto 15: Vertimiento 3 en la quebrada Doña María

El perfil de temperatura longitudinal de la quebrada Doña María se obtuvo utilizando la línea v1 (ver gráfica 11).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

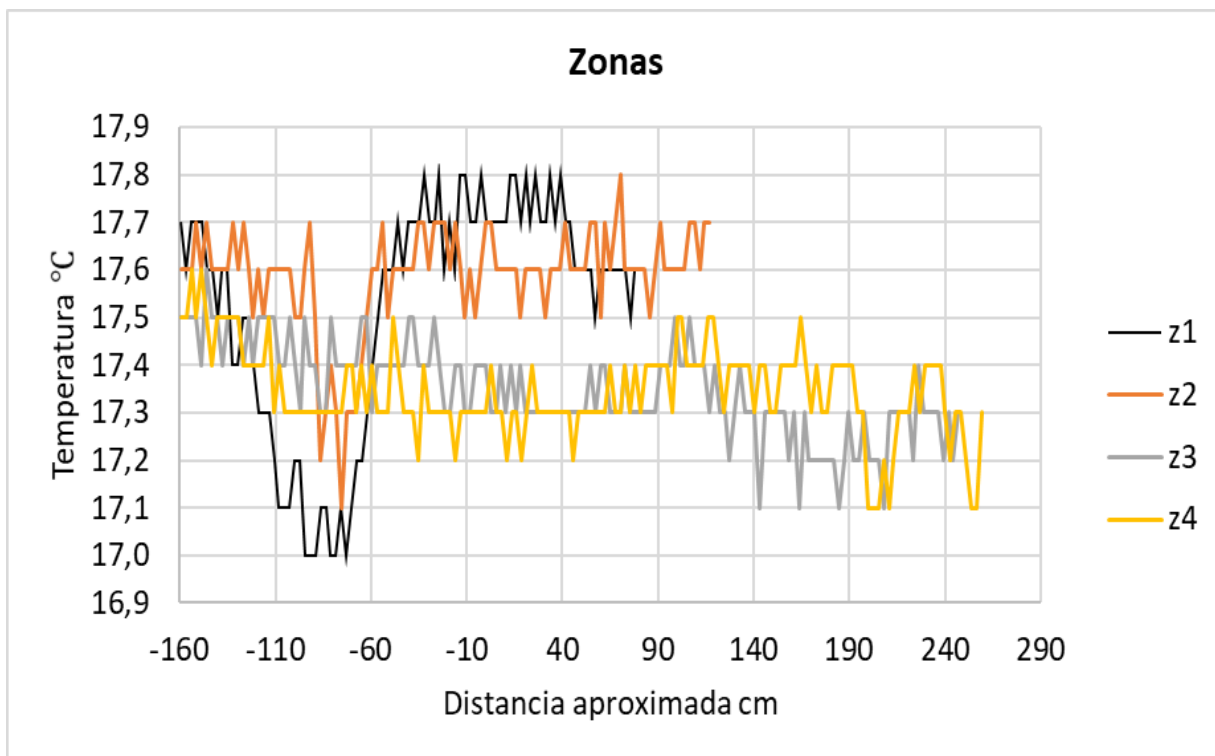


Gráfica 11: Perfil longitudinal de temperatura de la quebrada Doña María para el vertimiento 3

En la gráfica 11 se pudo evidenciar la temperatura del vertimiento, de zona de mezcla y del cuerpo hídrico. La temperatura del vertimiento se aproximó a los 18,7 °C, correspondiente a los primeros 120 cm del perfil. La zona de mezcla fue de 17,7 °C teniendo en cuenta la distancia entre los 130 hasta los 170 cm y la temperatura de la quebrada 17,2 °C, fue establecida a partir de los 180 cm.

Los perfiles de temperatura transversales de la quebrada Doña María se obtuvieron utilizando las líneas z1, z2, z3 y z4 (ver gráfica 12).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



Gráfica 12: Perfiles de temperatura a lo largo de los ejes transversales 1, 2, 3 y 4 de la imagen 5

De la gráfica 12 no se obtuvo información sobre la temperatura del vertimiento. La temperatura del cuerpo de agua coincide con el promedio de la temperatura de la zona z4 (17,2 °C), la cual fue la más alejada del vertimiento, y la temperatura de la zona de mezcla se estableció con los incrementos en z1 y z2, que en promedio llegó hasta los 17,7 °C.

La identificación del vertimiento utilizando la cámara térmica resultó difícil por la cantidad de incertidumbres y materiales externos que afectaban el contraste de temperatura en el cuerpo hídrico. Solo cuando se procesó la imagen para obtener las gráficas 11 y 12, se identificaron las temperaturas del vertimiento, de la zona de mezcla y del cuerpo hídrico y se validó la presencia de la descarga. Por otro lado, de acuerdo con la línea base, posiblemente el vertimiento sea de agua residual doméstica por que la temperatura del vertimiento se encuentra entre 12°C y 30°C (ver tabla 6). Sin embargo, se deben medir otros parámetros físico-químicos de la

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

descarga para tener argumentos más contundentes para caracterizar el tipo de vertimiento.

Quebrada La Mosca

De la quebrada La Mosca se analizó el vertimiento representado en la foto 16. El eje longitudinal se trazó en dirección del vertimiento (v_1) y los 3 ejes transversales z_1 , z_2 , z_3 perpendiculares a v_1 (ver foto 16).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

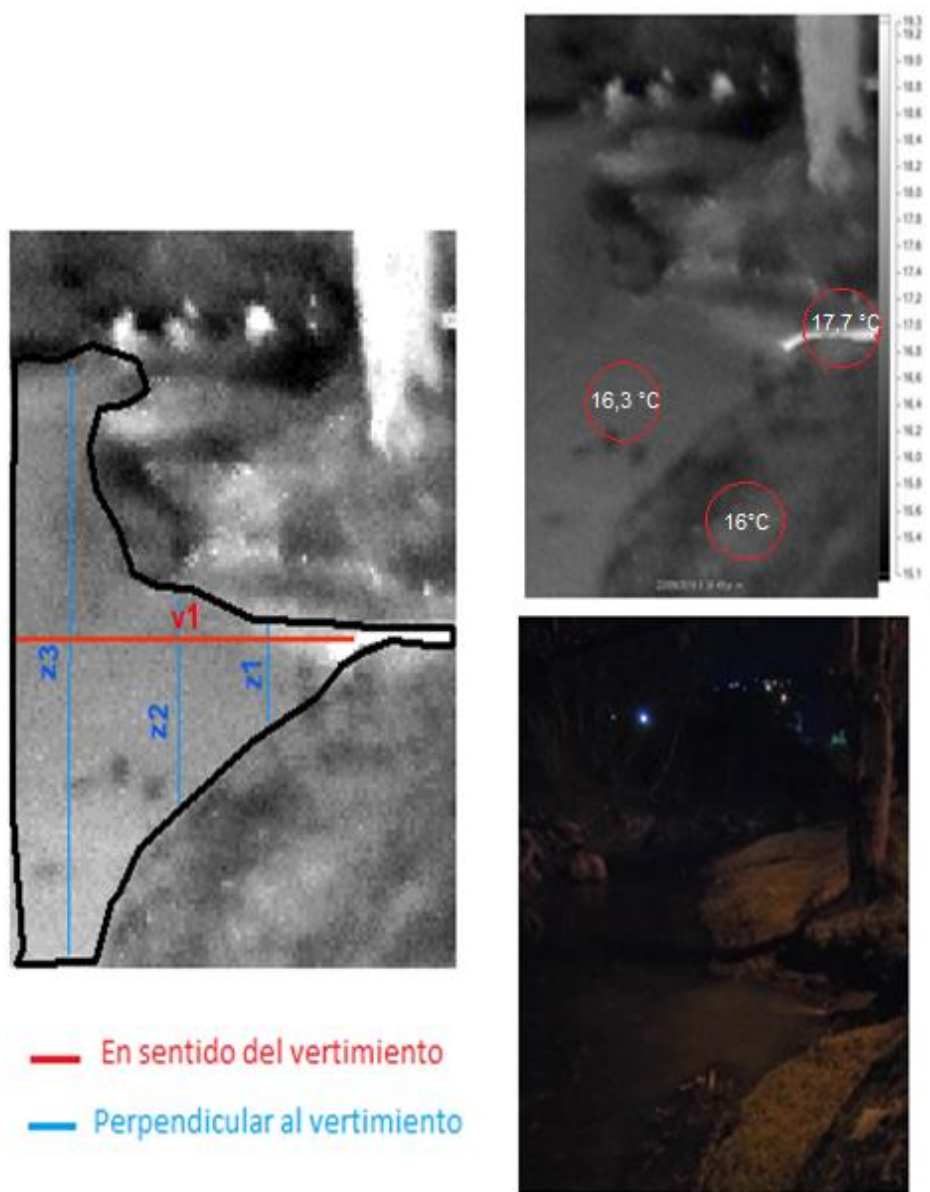
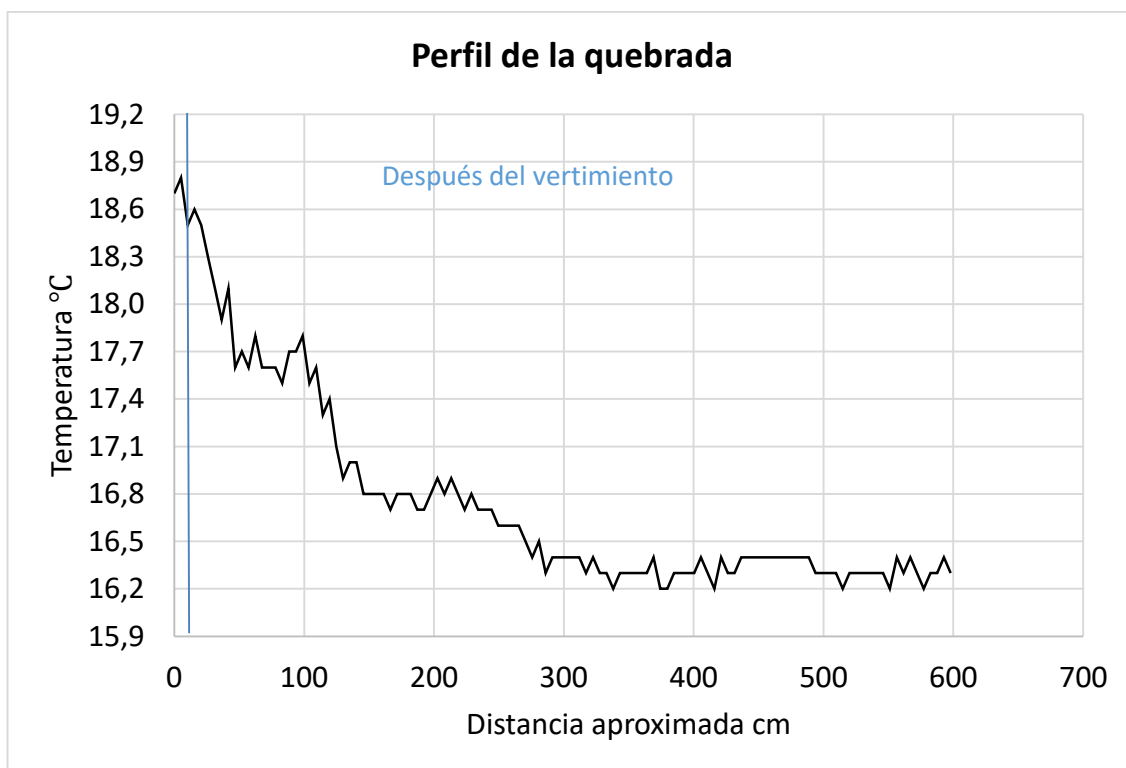


Foto 16: Imágenes térmica y a color de una descarga en la quebrada La Mosca

El perfil de temperatura longitudinal de la quebrada La Mosca se obtuvo utilizando la línea v1 (ver gráfica 13).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

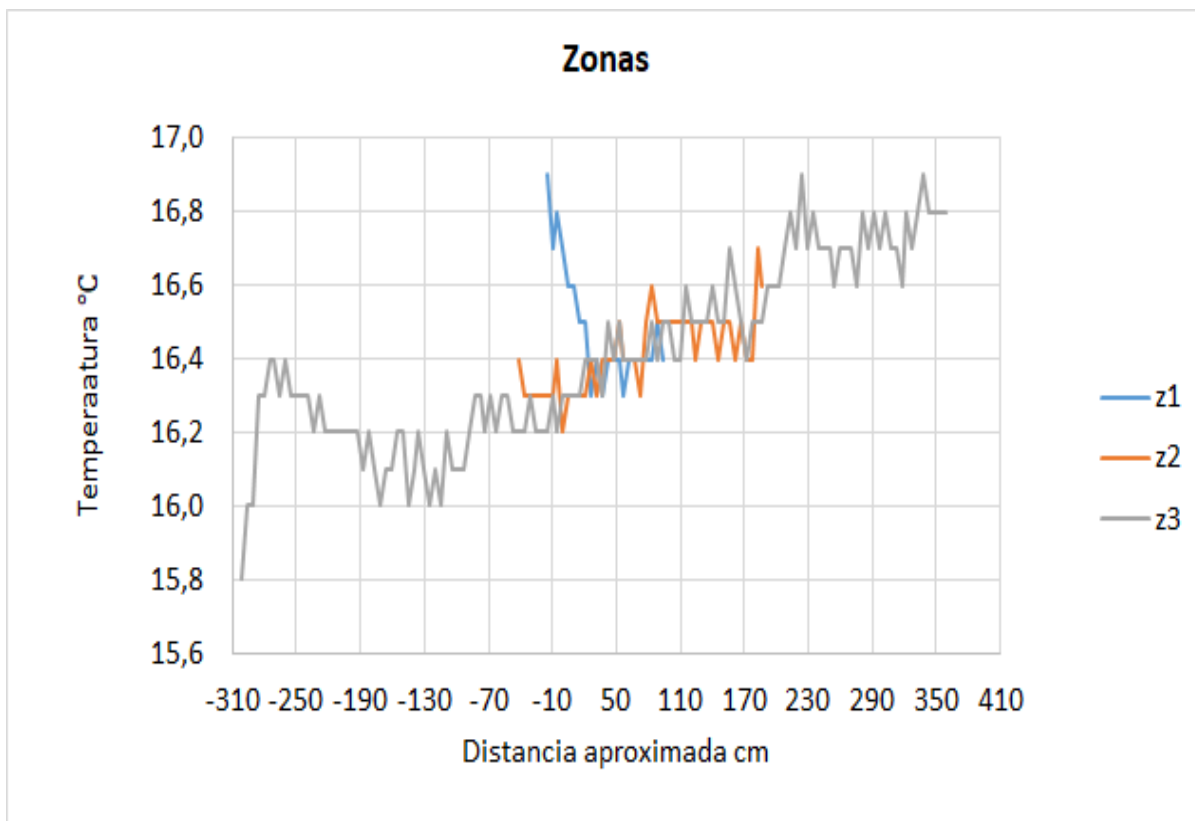


Gráfica 13: Perfil longitudinal de temperatura de la quebrada La Mosca

En la gráfica 13 se pudo evidenciar la temperatura del vertimiento, de zona de mezcla y del cuerpo hídrico. La temperatura del vertimiento se aproximó a los 17,7 °C, correspondiente a los primeros 120 cm del perfil. La zona de mezcla fue de 16,6 °C, teniendo en cuenta la distancia entre los 120 cm hasta los 290 cm, y la temperatura de la quebrada 16,3 °C fue establecida a partir de los 300 cm. También se pueden observar pequeñas fluctuaciones en la gráfica que posiblemente sea por la temperatura de la cobertura vegetal que es 16 °C aproximadamente.

Los perfiles de temperatura transversales de la quebrada Doña María se obtuvieron utilizando las líneas z1, z2, z3 y z4 (ver gráfica 14).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



Gráfica 14: Perfiles de temperatura a lo largo de los ejes transversales 1, 2 y 3 en la quebrada La Mosca

La gráfica 14 muestra un incremento de temperatura dentro del eje z1 debido al vertimiento. La zona de mezcla se evidenció en z3 desde los -70 cm hasta los 350 cm. Las temperaturas del vertimiento, de la zona de mezcla y del cuerpo de agua se no pudieron calcular con los perfiles transversales, pero sí con el perfil longitudinal.

La identificación del vertimiento utilizando la cámara térmica resultó difícil por la cantidad de incertidumbres y materiales externos que afectaban el contraste de temperatura en el cuerpo hídrico. Solo cuando se procesó la imagen para obtener las gráficas 13 y 14, se identificaron las temperaturas del vertimiento, de la zona de mezcla y del cuerpo hídrico y se validó la presencia de la descarga. Por otro lado, de acuerdo con la línea base, posiblemente el vertimiento sea de agua residual

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

doméstica por que la temperatura del vertimiento se encuentra entre 12°C y 30°C (ver tabla 6). Sin embargo, se deben medir otros parámetros físico-químicos de la descarga para tener argumentos más contundentes para caracterizar el tipo de vertimiento.

A continuación, se resumen las temperaturas estimadas en los cuerpos de agua, de los vertimientos y de la zona de mezclas en las imágenes analizadas (ver tabla 10).

# vertimiento	Quebrada	Temperatura estimada del cuerpo de agua °C	Temperatura estimada del vertimiento °C	Temperatura estimada de la zona de mezcla °C
1	Las palmas	14,4	15	14,8
1	Doña María	18,1	19,6	18,9
2	Doña María	17	-	-
3	Doña María	17,2	18,7	17,7
1	La Mosca	16,3	17,7	16,6

Tabla 10: Temperatura estimada de los cuerpos de agua, de los vertimientos y de las zonas de mezcla

De las quebradas analizadas se observó una temperatura mayor en las quebradas Doña María y La Mosca, posiblemente por la alta actividad urbana de las dos quebradas. La influencia del concreto, y en especial las descargas subterráneas que no son percibibles por el ojo humano, como lo menciona Woods Hole Oceanographic Institution, en su publicación “*submarine groundwater discharge: identification and quantification via remote sensing, hydrologic sampling, and geochemical tracers*” (Woods Hole Oceanographic Institution, 2018), las cuales incrementan la temperatura de los cuerpos de agua, afectando la vida acuática.

Las temperaturas estimadas del vertimiento, del cuerpo de agua y de la zona de mezcla se obtuvieron por medio del análisis de las imágenes en el software ArgGIS. El cálculo se realizó de manera empírica y los valores encontrados tienen incertidumbres debido a las emisividades que generan algunos objetos como las piedras, la cobertura vegetal, infraestructura como vertederos o tubos entre otros.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Para que la medición sea precisa se debe contar con termómetros puntuales que validen la información.

No es posible identificar el tipo de vertimiento solo con la identificación térmica del cuerpo de agua, del vertimiento y de la zona de mezcla. Se debe tener en cuenta la caracterización físico-química del agua para tener argumentos cuantitativos que permitan establecer la procedencia de la descarga. De los resultados obtenidos podemos afirmar que posiblemente los vertimientos encontrados sean de agua residual doméstica por el rango de temperatura que se encuentran (12-30 °C) (ver tabla 6) y la temperatura entre la descarga y el cuerpo hídrico no superó los 2 °C.

Todas las descargas eran inferiores a 40 °C, lo que da indicios que cumplen con los requisitos térmicos de la legislación colombiana. Sin embargo, la diferencia de temperatura entre los vertimientos y la temperatura del cuerpo de agua era mayor del grado centígrados exceptuando la descarga 2 en la quebrada Doña María y el vertimiento de la quebrada las Palmas. Lo anterior indica que al parecer se está incumpliendo parámetros internacionales como los establecidos por la EPA y afectando la comunidad acuática. Los aumentos de temperatura de 1 a 2 °C pueden alterar las comunidades acuáticas porque son letales para algunas especies y pueden afectar el crecimiento y la reproducción de otras. El aumento de la temperatura del agua a solo 2 a 3 °C por encima del óptimo para algunos insectos acuáticos puede reducir en gran medida el número de huevos producidos por las hembras porque se usa más energía para apoyar tasas metabólicas más altas y menos para la producción de huevos (Dodds & Whiles, 2010).

De los 5 vertimientos encontrados en la quebrada Doña María solo 3 fueron analizados con el procesamiento de la imagen térmica, ya que las imágenes obtenidas de los dos vertimientos faltantes tenían muchas incertidumbres que limitaban el procesamiento. Por ejemplo, en la foto 7 se evidenció la presencia de material vegetativo y rocoso por donde fluía la descarga. El caudal era bajo por lo que no se evidenció la temperatura del vertimiento. El mismo problema se evidenció en el segundo vertimiento encontrado en la quebrada La Mosca. Es por lo anterior, que solo se procesaron 5 imágenes térmicas en los 3 cuerpos hídricos.

3.3 ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD

En esta sección se analiza la viabilidad de la utilización de imágenes térmicas para la detección de vertimientos y, en general, la pertinencia de utilizar esta tecnología

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

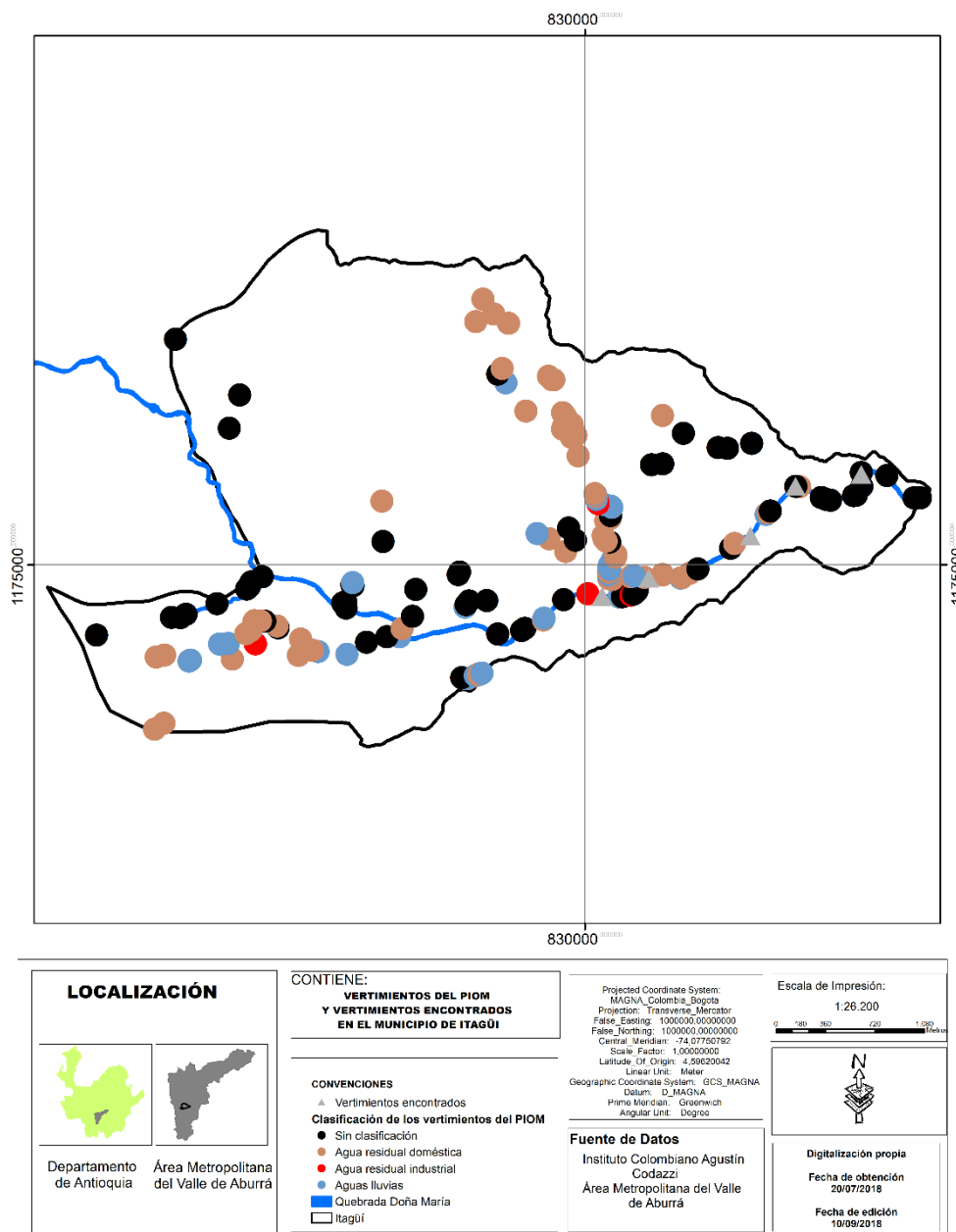
en el análisis de contaminación térmica de cuerpos de agua.

3.3.1 Comparación de las descargas registradas con las identificadas

Las descargas identificadas por el AMVA en la quebrada Doña María se encuentran en el mapa 2. Al superponer las descargas oficiales del AMVA y las identificadas se obtuvo el mapa 7. Los círculos son las descargas identificadas por el AMVA y los 5 triángulos grises representan las descargas identificadas por medio de imágenes

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

térmicas.



Mapa 7: Vertimientos del PIOM y vertimientos encontrados en la quebrada Doña María

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

No fue posible comparar todas las descargas identificadas con las registradas por AMVA. La mayoría de los vertimientos registrados se encontraron sin clasificación y las características cualitativas del vertimiento observadas en campo, como el color, estimación del caudal, presencia de olor y demás consideraciones que se describieron en la sección de la planeación del trabajo en campo, no fueron suficientes para caracterizar los vertimientos en aguas residuales industriales, aguas residuales domésticas o aguas lluvias.

Solo dos de los vertimientos encontrados estaban a una distancia aproximada de entre 3 y 15 m de los vertimientos registrados por el AMVA. El resto de los vertimientos encontrados no coincidieron con la ubicación de las descargas identificadas por la autoridad ambiental y aunque estaban próximos a varios vertimientos identificados (a más de 100 m), con la información adquirida en campo no fue suficiente para asegurar la inclusión de las descargas en la base de datos de la autoridad ambiental. Es por lo anterior que se puede concluir que posiblemente de los 5 vertimientos identificados sólo dos están incorporados en el registro del AMVA.

En cuanto a la cantidad de puntos identificados, se encontraron pocos vertimientos en campo por varios factores. La accesibilidad para tomar fotos de la quebrada fue limitada. La presencia de infraestructura, casas, muros, vegetación impidieron el paso para tomar fotos continuas del cuerpo hídrico. Muchas de las zonas se quedaron sin visitar, ya que se tomaron rutas alternas para tomar fotos de la mayor cantidad de vertimientos visibles (ver mapa 4). Ningún vertimiento encontrado superó los 40 °C. Lo anterior, dificultó la detección cualitativa de los vertimientos con solo la imagen térmica obtenida con la cámara térmica Fluke.

Por otro lado, de la base de datos establecida por el AMVA no se conoce hasta el momento el método que utilizaron para establecer los vertimientos, si necesitaron información de entidades externas como la empresa de servicios públicos de alcantarillado (EPM) para su formulación y si han realizado alguna salida de campo de verificación para actualizar la base de datos del 2008.

En conclusión, la detección de vertimientos ilegales utilizando la cámara térmica de mano no es viable ni eficiente. Lo anterior es debido a las limitaciones de la herramienta en el tema de cobertura, procesamiento de la información y accesibilidad para realizar la toma. Sin embargo, puede ser utilizada como una herramienta de apoyo para estimar la temperatura de vertimientos identificados y zonas de estudio de interés, ya que esta tecnología permite detectar y estimar rápidamente cambios de temperatura menores a los 2 °C en cuerpos de agua, lo que resulta provechoso para detectar afectaciones en los ecosistemas acuáticos.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Por otro lado, se deben realizar más estudios que establezcan cuales son los deltas de temperatura para establecer las zonas de mezcla entre el vertimiento y el cuerpo hídrico para mejorar la detección de los vertimientos.

La cámara térmica de mano es liviana, pequeña (28,4 x 8,6 x 13,5 mm), de fácil manejo y transporte para estimar temperaturas en cuerpos hídricos. Las mediciones obtenidas de esta herramienta pueden ser validas in situ. Tiene un campo visual de 31 ° x 22,5 ° y una resolución espacial de 3,39 mirad. A continuación, se resumen en la tabla 11 las ventajas y desventajas de las tecnologías de detección térmica para identificar vertimientos con una estimación de precios.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Tecnología	Ventajas de la herramienta para la detección de vertimientos	Desventajas de la herramienta para la detección de vertimientos	Precio (CO) Aproximado
Cámaras térmica de mano	1.Herramienta liviana y de fácil manejo 2 .Sirve como herramienta de apoyo para estimar la temperatura de vertimientos identificados	1.Cobertura limitada, la cual depende del ángulo de la toma de la imagen y la resolución 160 x 120 pixeles por foto (Fluke, 2012) 2.Estimación de temperatura de cuerpos hídricos con incertidumbres. La precisión de la tecnología está entre + 2 °C a 25 °C (Fluke, 2012) 3.Accesibilidad a las zonas de estudio limitada. En este proyecto la presencia de infraestructuras como casas, edificios y muros impedían el acceso al cuerpo hídrico para tomar la foto	\$10.408.216 (precio de la cámara FLUKE i100 de la Universidad EIA)
Sensores térmicos aéreos/ imágenes satelitales	1.Mayor cobertura y accesibilidad a la zona de estudio (hasta 100 km) (Handcock et al, 2012)	1.Estimación de temperatura de cuerpos hídricos con incertidumbres por la presencia de nubosidades y radiación solar 2.Herramienta compleja y requiere mayor procesamiento de la información 3.Se deben realizar correcciones atmosféricas 4. Imágenes satelitales pueden ser gratuitas	\$12.058.196 (Precio estimado con el valor de un dron de \$1.649.980 más el valor de una cámara térmica) (Falabella, 2018)
Termómetros puntuales	1.Estimación de temperatura precisa y puntual	1. Cobertura y accesibilidad a las zonas de estudio limitada (132,7 mm2) 2.Herramienta liviana y de fácil manejo 3. No tienen georreferencia los datos	\$ 237.858 (Viaindustria, 2018)

Tabla 11: Ventajas y desventajas de las tecnologías térmicas para la detección de vertimientos con precios estimados

Los termómetros son la herramienta más económica para medir temperatura en cuerpos hídricos, sin embargo, la cobertura de la herramienta es limitada. Por otro lado, los sensores aéreos tienen mayor cobertura (ver tabla 11) pero la información se debe procesar y realizar correcciones atmosféricas para poder estimar la temperatura del cuerpo hídrico. Por otro lado, el precio de la tecnología es mucho más elevada. Por la viabilidad económica y todos los beneficios que tiene una cámara térmica de mano, las autoridades ambientales pueden adquirirlas para

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

obtener información térmica de fácil procesamiento que ayude a la realización de sus labores de vigilancia y control en cuerpos de agua.

Para detectar vertimientos ilegales y con base a los resultados obtenidos en este proyecto, una alternativa posiblemente viable es la utilización de sensores térmicos aéreos para tener mayor cobertura junto a la utilización de termómetros puntuales que permitan la verificación y corrección de las mediciones. Para establecer la factibilidad de esta solución se deben realizar estudios técnicos y financieros que se realicen en otros proyectos de investigación.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

4. CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES

Con relación al primero objetivo sobre la construcción de la línea base se concluye que en Colombia la información de los vertimientos establecidos por las corporaciones autónomas regionales se encuentra incompleta y de difícil acceso para la población. Para acceder a la información fue necesario la implementación de derechos de petición dirigido al AMVA. La capa de información sobre los vertimientos en la quebrada Doña María estaba incompleta ya que la mayoría de las descargas se encontraban sin clasificación. Se desconoce el método que utilizaron para identificar, clasificar y verificar la ubicación de las descargas. Al parecer la información suministrada no fue fruto de actividades rutinarias, es decir, no pareciera que forme parte del día a día de las autoridades ambientales, sino que fuese el resultado de proyectos puntuales, por lo que podría esperarse que esos datos estén desactualizados.

Por otra parte, la línea de base en términos de los límites de vertimiento también es muy laxa en Colombia, comparada con los requerimientos establecidos por autoridades ambientales como la EPA. Ningún vertimiento encontrado superó los 40 grados centígrados, pero las diferencias de temperatura entre el vertimiento y el cuerpo de agua si superó el grado centígrado (el límite establecido por la EPA). Al parecer, con los valores máximos permisibles de temperatura para vertimientos establecidos en la legislación colombiana no son suficientes para recuperar las quebradas en su componente biótico.

La línea base que se construyó en el transcurso de este trabajo quedó incompleta por la falta de información que comparte las autoridades ambientales y la falta de claridad en la información suministrada. Entre más tecnología y métodos se utilice para detectar vertimientos, se puede construir líneas bases más sólidas y representativas que fomente el cuidado, preservación y restauración de los cuerpos de agua.

Para el segundo objetivo sobre la identificación vertimientos por medio de imágenes térmicas se considera que las imágenes térmicas son una tecnología que permite evaluar de manera general la temperatura superficial de cuerpos de agua. Sin embargo, la limitación de esta tecnología está relacionada con las emisividades de materiales como piedras, material orgánico entre otros las cuales generan incertidumbres que afectan la lectura de la temperatura y deben ser corroboradas con la medición de la temperatura con métodos tradicionales (termómetros).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Por otro lado, la accesibilidad de los cuerpos de aguas está limitada por infraestructuras como casas, edificios, muros y cercos, lo que dificulta la captura en tierra. Para la detección de vertimientos ilegales se sugiere utilizar sensores remotos de infrarrojo que permitan una mayor cobertura de las zonas de interés, acompañados de termómetros puntuales para verificar las lecturas de temperatura. Se requieren estudios de factibilidad técnica y económica que soporten la utilización de esta tecnología.

El tercer objetivo está relacionado con la factibilidad de utilizar imágenes térmicas para la detección de aguas residuales. Se llegó a la conclusión que las cámaras de captura de imágenes por infrarrojo de manos no son la herramienta más eficiente para encontrar vertimientos. La cámara cubre áreas pequeñas comparadas con la cobertura de las imágenes satelitales infrarrojas o los sensores remotos adaptados a aeronaves, pero puede ser utilizada en campo como herramienta de apoyo que facilite la estimación de temperatura de vertimientos puntuales identificados y de zonas de estudio de interés.

A pesar de estos resultados, se considera que el uso de esta tecnología puede ofrecer ventajas a las autoridades ambientales, sobre todo en la detección de descargas notorias, como las presentadas en el río Aburrá cuando ha adquirido color, y el cambio de temperatura que se genera entre el vertimiento y el cuerpo hídrico puede ser identificado por esta tecnología. Tal fue el caso de lo observado en las quebradas La Mosca, donde en plena oscuridad se pudo identificar vertimientos con una diferencia de temperatura de 2 grados centígrados entre el cuerpo de agua y la descarga.

5.BIBLIOGRAFÍA

- Adobe. (25 de Octubre de 2018). *Create and edit panoramic images*. Obtenido de About Photomerge: <https://helpx.adobe.com/nz/photoshop/using/create-panoramic-images-photomerge.html>
- Advameg Inc. (25 de Noviembre de 2018). *Thermal Pollution*. Obtenido de <http://www.pollutionissues.com/Te-Un/Thermal-Pollution.html>
- Alcaldía de Itagüí . (19 de Agosto de 2017). *Itagüí sigue avanzando*. Obtenido de <http://www.itagui.gov.co/municipio>
- Amperis Products S.L. (20 de Octubre de 2018). *Cámaras termográficas*. Obtenido de <https://www.amperis.com/productos/camaras-termograficas/#funcionamiento>
- AMVA. (2008). Localización, delimitación y extensión de la zona de estudio. En AMVA, *Plan de ordenación y manejo de la microcuenca de la quebrada Doña María, municipios de tagüí; La Estrella y Medellín* (pág. 19). Medellín: Área Metropolitana del Valle de Aburrá.
- ANLA. (25 de Octubre de 2017). *Permiso de vertimientos*. Obtenido de www.anla.gov.co/permiso-vertimientos-aguas-residuales
- Antonelli, M., Klaus, J., Smettem, K., Teuling, A. J., & Pfister, L. (2017). Exploring Streamwater Mixing Dynamics via handheld thermal infrared imagery. *Water*, 1-16.
- Área Metropolitana. (19 de Agosto de 2017). *RECURSO HÍDRICO*. Obtenido de Permiso de vertimientos de aguas residuales: <http://www.metropol.gov.co/recursohidrico/Pages/vertimientos.aspx>
- CIGEA. (1998). *Metodología para la evaluación aproximada de la carga contaminante*. Habana: Agencia de medio ambiente.
- Dodds, W. K., & Whiles, M. R. (2010). Chapter 16 - Responses to Stress, Toxic Chemicals, and Other Pollutants in Aquatic Ecosystems,. En *Freshwater Ecology* (págs. 399-436). Academic Press.
- DSpace. (25 de Noviembre de 2018). *Capítulo 2*. Obtenido de Aguas residuales: clasificación, características y composición: <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/6087/5/CAPITULO%202.pdf>

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

- EPA. (2007). *Draft national pollutant discharge elimination sytem (NPDES) permit to discharge to wathers of the united states pursuant to the clean water act (CWA)*. Massachusetts Bay : Northeast Gateway Energy Bridge .
- Falabella. (25 de Noviembre de 2018). *Drones profesionales*. Obtenido de https://www.falabella.com/falabella-cl/category/cat6040009/Drones-Profesionales?mkid=CA_P1_PRR_013387&navAction=push
- FARADAYOS. (25 de Noviembre de 2018). *Las 3 fallas más comunes en una instalación eléctrica*. Obtenido de <https://faradayos.blogspot.com/2014/01/fallas-electricas-instalaciones-sobrecarga-cortocircuito-aislamiento.html>
- FLIR. (2 de octubre de 2017). *La cámara infrarroja*. Obtenido de <http://www.flir.es/corporate/display/?id=41523>
- FLIR. (25 de Octubre de 2018). *Guía sobre termografía para aplicaciones en edificios y energía renovable*. Obtenido de Cámaras termográficas para la inspección de paneles solares: http://www.flirmedia.com/MMC/THG/Brochures/T820325/T820325_ES.pdf
- Fluke. (2012). *Manual de uso Ti100, Ti105, Ti110, Ti125*. EE.UU: Fluke Corporation.
- Gierach, M. M., Holt, B., Trinh, R., Pan, J. B., & Rains, C. (2017). Satellite detection of wastewater diversion plumes in Southern California. *ELSEVIER*, 171-182.
- Gobierno de España. (2010). *Asistencia técnica para el control de macrófitos: Mejora de la gestión de los embalses del Bajo Ebro*. Barcelona: URS España (United Research Services España, S.L. - Sociedad Unipersonal).
- Goel, P. K. (2006). *Water Pollution: Causes, Effects and Control*. New Age International.
- Gutierrez Claverol, M. (1993). Imagenes de infrarrojo térmico. En *Compendio de teledetección geológica* (pág. 163). Oviedo: Universidad de Oviedo.
- Handcock, R. N., Torgersen, C. E., Cherkauer, K. A., Gillespie, A. R., Tockner, K., Faux, R. N., & Tan, J. (2012). Thermal infrared remote sensing of water temperature in riverine landscapes. *Fluvial Remote Sensing for Science and Management*.
- IDEAM. (2014). *Estudio Nacional del Agua*. Bogotá: IDEAM.
- Iezzi, F., & Todisco, M. T. (2015). Stream temperature estimated in situ from thermal-infrared. *IOP Publishing*.
- Incropera, F. P., & De Witt, D. P. (1999). Radiación de cuerpo negro. En *Fundamentos de transferencia de calor* (pág. 646). Mexico: Prentice hall hispanoamerica.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Insatec. (25 de Noviembre de 2018). *Aplicaciones de la termografía en medicina*. Obtenido de http://www.insatecsl.com/termografia_medicina.htm

Jamel, H. (25 de Octubre de 2018). *Physical Characteristics of Sewage*. Obtenido de Temperature: <https://www.aboutcivil.org/characteristics-sewage-physical>

Ling, f., Foody, G. M., Du, H., Ban, X., Li, X., Zhang, Y., & Du, Y. (2017). Monitoring thermal pollution in rivers downstream of dams with landsat ETM+ thermal infrared images. *Remote sensing*, 1-16.

MINAMBIENTE. (2014). *Guía técnica para la formulación de los planes de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas*. Bogotá: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

MINAMBIENTE. (2017 de Septiembre de 2017). *Minambiente presenta nueva Norma de Vertimientos que permitirá mejorar la calidad agua del país*. Obtenido de <http://www.minambiente.gov.co/index.php/noticias/1700-minambiente-presenta-nueva-norma-de-vertimientos-que-permitira-mejorar-la-calidad-agua-del-pais>

Ocean imaging. (25 de Noviembre de 2018). *Thermal Discharge*. Obtenido de https://www.oceani.com/services/svcs_thermal_encinas.html

ONU Mujeres. (25 de Octubre de 2017). *Entidad de las naciones unidas para la igualdad de género y el empoderamiento de las mujeres*. Obtenido de <http://www.endvawnow.org/es/articles/959-estudios-de-linea-de-base.html>

PROMAX. (2 de Octubre de 2017). *Cámara Termográfica: Cómo funcionan y por qué pueden ser necesarias*. Obtenido de <http://www.promax.es/esp/noticias/400/camara-termografica-como-funcionan-y-por-que-pueden-ser-necesarias>

PROMAX. (25 de Noviembre de 2018). *Cámara Termográfica: Cómo funcionan y por qué pueden ser necesarias*. Obtenido de Aplicaciones de la cámara termográfica: <http://www.promax.es/esp/noticias/400/camara-termografica-como-funcionan-y-por-que-pueden-ser-necesarias>

Quintero, J. (28 de Julio de 2017). Por tercer día consecutivo tiñen las aguas de río Medellín. *El Colombiano*.

Ramirez, Restrepo, & Cardeñosa, M. (1999). ÍNDICES DE CONTAMINACIÓN PARA CARACTERIZACIÓN DE AGUAS CONTINENTALES Y VERTIMIENTOS. FORMULACIONES. *CT&F - Ciencia, Tecnología y Futuro*, 89-99.

Syvitski, J. P., Cohen, S., Kettner, A. J., & Brakenridge, G. R. (2014). How important and different are tropical rivers? An overview. *ELSEVIER*, 5–17.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

- Tamayo, M. T. (1999). *Serie: Aprender a investigar módulo 5: el proyecto de investigación*. Bogotá: ICFES.
- Toprak, H. (25 de Octubre de 2018). *Toprak Home Page*. Obtenido de Wastewater engineering: <http://web.deu.edu.tr/atiksu/ana52/aryen3.html>
- UNESCO. (25 de Octubre de 2018). *A guide to use of biota, Sediments and Water in environmental monitoring*. Obtenido de Chapter 3* - Selection of water quality variables : http://www.who.int/water_sanitation_health/resourcesquality/wqachapter3.pdf
- USGS. (25 de Octubre de 2017). *USGS Groundwater Information: Hydrogeophysics Branch*. Obtenido de Handheld Thermal Imaging Cameras for Groundwater/Surface-water Interaction Studies: <https://water.usgs.gov/ogw/bgas/thermal-cam/>
- Vásquez, J. E. (31 de Octubre de 2015). El río Medellín amaneció de color rojo. *El Colombiano*.
- Vernier. (25 de Octubre de 2018). *Water Quality – Temperature*. Obtenido de http://www2.vernier.com/sample_labs/ESV-10-COMP-water_quality_temperature.pdf
- Viaindustria. (25 de Noviembre de 2018). *Termómetro digital fijo*. Obtenido de <https://www.viaindustrial.com/productos.asp?nombre=Termometros%20digitales%20fijos>
- Vollmer, M., & Mollmann, K. P. (2011). *Infrared thermal imaging*. WILEY-VCH.
- Water encyclopedia. (25 de Noviembre de 2018). *Oceans, Tropical*. Obtenido de <http://www.waterencyclopedia.com/Oc-Po/Oceans-Tropical.html>
- Woods Hole Oceanographic Institution. (30 de Octubre de 2018). *Aerial Infrared Imagery*. Obtenido de Submarine groundwater discharge: identification and quantification via remote sensing, hydrologic sampling, and geochemical tracers: <http://www.whoi.edu/page.do?pid=17135>
- Zapata Restrepo, A. M., & Cano, D. (2013). *Red de monitoreo ambiental en la cuenca hidrográfica del río Aburra en jurisdicción del área metropolitana-Fase IV*. Medellín: Universidad de Antioquia.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.