

Universidad Andina Simón Bolívar

Sede Ecuador

Área de Ambiente y Sustentabilidad

Maestría en Cambio Climático, Sustentabilidad y Desarrollo

**Análisis del fenómeno Isla de Calor Urbana en la ciudad de Riobamba
para los años 2015, 2016 y 2017**

Víctor Hugo Pérez Cobo

Tutor: Remigio Hernández Cevallos

Quito, 2023



Cláusula de cesión de derecho de publicación

Yo, Víctor Hugo Pérez Cobo, autor de la tesis intitulada “Análisis del fenómeno Isla de Calor Urbana en la ciudad de Riobamba para los años 2015, 2016 y 2017”, mediante el presente documento de constancia de que la obra es de mi exclusiva autoría y producción, que la he elaborado para cumplir con uno de los requisitos previos para la obtención del título de Magíster en Cambio Climático, Sustentabilidad y Desarrollo en la Universidad Andina Simón Bolívar, Sede Ecuador.

1. Cedo a la Universidad Andina Simón Bolívar, Sede Ecuador, los derechos exclusivos de reproducción, comunicación pública, distribución y divulgación, durante 36 meses a partir de mi graduación, pudiendo por lo tanto la Universidad, utilizar y usar esta obra por cualquier medio conocido o por conocer, siempre y cuando no se lo haga para obtener beneficio económico. Esta autorización incluye la reproducción total o parcial en los formatos virtual, electrónico, digital, óptico, como usos en red local y en internet.
2. Declaro que en caso de presentarse cualquier reclamación de parte de terceros respecto de los derechos de autor/a de la obra antes referida, yo asumiré toda responsabilidad frente a terceros y a la Universidad.
3. En esta fecha entrego a la Secretaría General, el ejemplar respectivo y sus anexos en formato impreso y digital o electrónico.

01 de diciembre del 2023



Firma: _____

Resumen

En la presente investigación se determina la intensidad y distribución espacial del fenómeno Isla de Calor Urbana en la ciudad de Riobamba, mediante los análisis de datos meteorológicos, temperatura de brillo a partir de imágenes satelitales y a través de un muestreo manual con termohigrómetro, nos encontramos con una leve intensidad de Isla de Calor Urbana en Riobamba.

Resaltando en el hallazgo del análisis de imágenes satelitales que en la ciudad se presenta un fenómeno de Isla de Calor Rural al norte de la ciudad en donde predominan suelos descubiertos con poca materia orgánica y vegetación. De igual manera, se pudo identificar que la presencia de partículas suspendidas, en este caso ceniza volcánica de los volcanes Sangay y Tungurahua, altera las observaciones radiométricas realizadas por satélites, dificultando la obtención de valores reales de temperatura.

Así mismo, se determina que la presencia de vegetación aporta a la humedad relativa del ambiente, lo cual permite que la temperatura ambiente se refresque.

A pesar de ser una ciudad intermedia en tamaño y poseer una temperatura relativamente fría (13 grados Celsius promedio anual), la ciudad de Riobamba presenta un fenómeno Isla de Calor Urbana, con una intensidad de 1.1 grados Celsius; este fenómeno se presenta en el centro-norte de la ciudad, lugares donde predominan las actividades comerciales, burocráticas y académicas.

Palabras clave: Isla - Calor - Urbana – Temperatura – Ciudad – Cambio Climático

Una especial dedicatoria a mi hija Luna Juliana Pérez porque quiero que esa chispa de curiosidad que lleva en sí, sea una catapulta para que explore el mundo que nos rodea y se encamine en el hermoso sendero de la investigación científica.

Agradecimientos

Este trabajo se pudo concretar gracias a mis abuelos, Margarita Oviedo y Víctor Hugo Pérez, quienes siempre me apoyaron e impulsaron a superarme cada día; a mi tío Wilson Pérez, que me brindó el ánimo y apoyo suficiente para encaminar la presente investigación. Así también, agradezco profundamente a mi tutor de tesis doctor Remigio Hernández, quien me ha compartido su valioso tiempo y sabiduría, y ha sabido darme luces en el trayecto de este trabajo. En suma, no puedo dejar pasar por alto el profundo agradecimiento a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, por facilitarme los datos meteorológicos para desarrollar la presente investigación.

Tabla de contenidos

Figuras y tablas	13
Introducción	15
Capítulo primero Isla de Calor Urbana, Teledetección, Misión Landsat	27
1. Isla de Calor Urbano	27
2. Teledetección	30
3. Misión Landsat	31
Capítulo segundo Metodología	33
1. Análisis de datos meteorológicos de la estación ESPOCH	33
2. Selección de imágenes satelitales	34
3. Medición de la ICU	36
4. Registro de temperaturas a partir de termohigrómetro manual.	40
Capítulo tercero Análisis y presentación de resultados	43
1. Análisis Datos meteorológicos	43
2. Análisis imágenes satelitales del 2015	44
3. Análisis imágenes satelitales del 2016	49
4. Análisis imágenes satelitales del 2017	52
5. Análisis de muestreo manual con termohigrómetro	55
Conclusiones y recomendaciones	61
Lista de referencias	65
Anexos	71
Anexo 1: altura de 1,50 m desde la superficie al sensor.	71
Anexo 2: Muestreo del punto de muestreo número 4.	72
Anexo 3: Muestreo del punto de muestreo número 10.	73
Anexo 4: Muestreo del punto de muestreo número 14.	74
Anexo 5: Muestreo del punto de muestreo número 3.	75
Anexo 6: Muestreo del punto de muestreo número 12.	76
Anexo 7: Muestreo del punto de muestreo número 8.	77
Anexo 8: Muestreo del punto de muestreo número 7.	78
Anexo 9: Caja de transporte de termohigrómetro.	79

Figuras y tablas

Figura 1. Distribución demográfica por sectores rurales y urbanos de Riobamba	16
Figura 2. Mapa de ubicación	19
Figura 3. Crecimiento urbano de Riobamba	22
Figura 4. Mapa de Límite Urbano Riobamba 2017	23
Figura 5. Evolución del área urbana de Riobamba	25
Figura 6. Gráfico de temperaturas mínimas, medias y máximas del 2015, 2016 y 2017 en Riobamba de la estación meteorológica ESPOCH	36
Figura 7. Mapa delimitación del área de estudio	39
Figura 8. Mapa puntos de muestreo con termómetro manual	43
Figura 9. Análisis de temperaturas mínimas, medias y máximas del 2015, 2016 y 2017 en Riobamba de la estación meteorológica ESPOCH	46
Figura 10. Mapa de temperatura de brillo del 2015	48
Figura 11. Mapa catastro minero en el área de estudio	49
Figura 12. Mapa Índice de Vegetación Normalizado NDVI del 2015	50
Figura 13. Mapa en color natural del 2015	51
Figura 14. Mapa de temperatura de brillo del 2016	52
Figura 15. Mapa en color natural del 2016	53
Figura 16. Mapa del Índice de Vegetación Normalizado NDVI del 2016	54
Figura 17. Mapa de temperatura de brillo del 2017	55
Figura 18. Mapa Índice de Vegetación Normalizado NDVI del 2017	56
Figura 19. Mapa en color natural del 2017	57
Figura 20. Temperaturas rurales y urbanas registradas manualmente	59
Figura 21. Registros de porcentaje de humedad relativa del muestreo manual	60
Figura 22. Mapa de calor de las temperaturas registradas con termohigrómetro manual	61
Tabla 1. Vinculación objetivos específicos con metodología aplicada.....	20
Tabla 2. Histórico del área urbana de la ciudad de Riobamba	3.
Tabla 3. Datos temperaturas mínimas, medias y máximas del 2015, 2016 y 2017 en Riobamba de la estación meteorológica ESPOCH.	35

Tabla 4. Fechas de búsqueda y selección de imágenes Landsat 8 para la descarga.	37
Tabla 5. Temperaturas registradas por la estación meteorológica ESPOCH en las fechas de descarga Imágenes satelitales.	38
Tabla 6. Temperaturas de registro manual con termohigrómetro.	58
Tabla 7. Mínima, media y máxima temperatura urbana y rural registrada.	59
Tabla 8. Mínima, media y máxima de porcentaje de humedad relativa ambiente urbana y rural registrada.	60

Introducción

El cambio climático trae consigo diferentes consecuencias negativas para el planeta. Una de sus principales causas es el incremento demográfico, especialmente en las ciudades con la consecuente presión a los recursos naturales, de los cuales dependen los seres humanos. Durante las últimas dos décadas, se ha vuelto cada vez más urgente la importancia de abordar las cuestiones ambientales en las ciudades de todo el mundo; esencialmente, debido a la evidencia irrefutable de un aumento en la sensación de calor, la presencia de sequías, la alteración de la biodiversidad y un deterioro en la salud humana, entre otros factores cruciales (Benítez 2013). Estos elementos prioritarios hacen que los impactos del cambio climático desde finales del siglo XX sean innegables. Para mediados del año 2021 en el planeta tierra vivían 7.837 millones de personas, de esta población el 56% habitaban en áreas urbanizadas, es decir: 4.388 millones de personas vivían hasta entonces en las ciudades (William and Flora Hewlett Foundation 2021). A raíz de la revolución verde y la implementación de políticas neoliberales, la tendencia al éxodo humano de áreas rurales a zonas urbanizadas se vio en incremento, por lo que cuestiones como la precarización laboral agrícola, la expropiación ilegal de tierras, necesidad de mejores días, salud y educación de calidad, fueron los motivantes para la migración del campo a la ciudad (Campos y Alcalá-Sánchez, 2012). Y, como se puede evidenciar en las cifras históricas, la población mundial se sigue concentrando en las ciudades; los datos sugieren que en 1950 menos del 30% vivía en las ciudades, mientras que para el 2000 esta cifra se elevó al 47%, en lo que respecta al 2021 el 56% y se prevé que para el 2030 la población habitando las ciudades será del 60% (Campos y Alcalá-Sánchez, 2012).

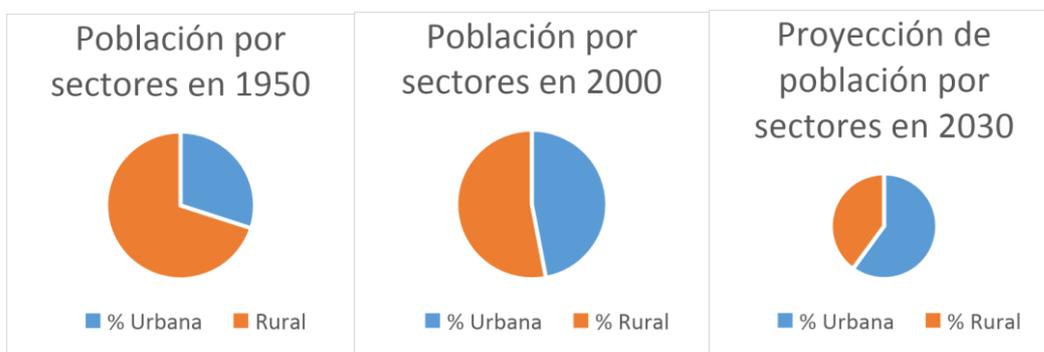


Figura 1. Distribución demográfica por sectores rurales y urbanos de Riobamba
Fuente: Campos y Alcalá-Sánchez, 2012.

La concentración de población en las ciudades consume más de la mitad de la energía primaria, en estos espacios se da una gran parte de las emisiones de CO₂ al ambiente, como consecuencia, es en las ciudades donde hay riesgos latentes por el cambio climático, por cuánto en estas se concentran: estrés por calor, movimientos en masa, eventos meteorológicos extremos, inundaciones costeras, contaminación del aire, sequías y escasez de agua (IPCC 2014). Una investigación muestra que ciudades con un millón de habitantes consumen diariamente 9.500 toneladas de combustible, lo que genera 950 toneladas de contaminantes atmosféricos (Maldonado 2009). Este nivel de consumo induce a la concentración de contaminantes atmosféricos en las áreas urbanas, con el subsiguiente aumento de las temperaturas ambientales de las ciudades. Es relevante aclarar que, son los países con alto ingreso económico y gran poder adquisitivo, los que generan más contaminación, particularmente por el estilo de vida (Margulis 2016).

El éxodo del campo a la ciudad, con el incremento demográfico en esta última, provoca el cambio del uso de suelo como producto de la demanda por espacio para habitar, provocando el reemplazo de coberturas de suelos agrícolas o naturales por asfalto, cemento y concreto. Entre el 2015 y 2020 las ciudades de ingresos bajos incrementaron su área en 1,5% anual (ONU-HABITAT 2020). Se conoce que en la superficie de las ciudades, la impermeabilización por una capa de asfalto y construcciones, provoca un escurrimiento más rápido de las precipitaciones y la subsiguiente escasa evaporación, lo cual trae consigo un aporte bajo a la humedad relativa y por consiguiente reduce la presencia de agua y su capacidad para refrigerar el ambiente en las ciudades, produciendo un fenómeno conocido como Isla de Calor Urbana (García 1995).

Tal es el caso, que en agosto del 2003 se experimentó una intensa ola de calor en diversas ciudades europeas (Reto 2003); un estudio realizado en 9 ciudades francesas demostró que 3,096 muertes extra se produjeron en agosto del 2003 debido a la ola de calor, y de las cuales, en su mayoría se dieron en los entornos urbanos (Tertre et al 2006). Otro estudio investigativo que evaluó el impacto en mortalidad y uso de energía en Estados Unidos, arrojó que las muertes por el fenómeno Isla de Calor Urbano (ICU) incrementaron en 1.1 por millón de habitantes (Lowe 2016). Es así como en New York cada año, más de 1.100 personas son hospitalizadas por estrés calórico y un poco más de 100 personas mueren (Green 2021). El contraste entre el análisis de datos tanto

satelitales como de ingresos hospitalarios y defunciones en Philadelphia USA, demostró que la distribución espacial de los fallecimientos por la ola de calor de 1993 se localizaba en los sectores más pobres y en donde la intensidad de la (ICU) fue mayor; demostrándose que la problemática en torno al fenómeno ICU tiene un mayor impacto a medida que avanzan los efectos negativos, sociales y ambientales del Cambio Climático (Johnson y Wilson 2009).

El proceso de urbanización provoca cambios en la naturaleza de la superficie terrestre, que devienen en la inevitable consecuencia de variaciones en las propiedades atmosféricas, alterando los balances de calor y generando el efecto Isla de Calor Urbano (ICU) (Verón 2010). Es así que, el fenómeno ICU aporta en gran medida en el incremento de la temperatura media del planeta, por cuanto las ciudades contribuyen con el calor antropogénico generado y que incide en el cambio climático mundial. El término ICU, que corresponde a las siglas de Isla de Calor Urbano, se distingue por la presencia de temperaturas elevadas en la ciudad. En un entorno urbano, los traslados de personas y mercancías, el consumo de combustibles fósiles, el uso de electrodomésticos, los procesos industriales y productivos, son las fuentes de calor y, como consecuencia, contribuyen al aumento de temperatura y al impacto ambiental de las áreas urbanas. Muchas de las veces, la huella ecológica de las ciudades sobrepasa sus límites espaciales y se extiende a escalas regionales (Rodríguez 2010). Con el fenómeno ICU se puede incrementar los efectos negativos del cambio climático: alterando los patrones de lluvia, empeorando la contaminación del aire, incrementando el riesgo de inundaciones y teniendo incidencia en el descenso en la calidad de vida y agua (Heaviside et al 2017).

Para el análisis y estudio del fenómeno Isla de Calor Urbano se han aplicado diferentes métodos a lo largo del tiempo, empezando por el uso de termómetros manuales en el registro de temperaturas de las ciudades y posterior, con el advenimiento de las tecnologías espaciales y satelitales, se aplicó la teledetección para su análisis. Sin embargo, el estudio con sus diferentes metodologías tiene sus limitantes por cuanto la morfología y densidad constructiva de la ciudad, estos son factores que determinan la presencia o ausencia de calor en el interior de las ciudades, así como también, tienen incidencia en la circulación de aire, por ello, o bien puede refrescar, o incrementar la temperatura ambiente en la ciudad. Otras dificultades para el estudio de ICU son la ausencia de estaciones meteorológicas fijas en las zonas urbanas, sumando esto a la dificultad administrativa para el acceso a los datos meteorológicos.

En la aplicación del método de teledetección, factores como nubosidad, presencia de ceniza volcánica, sombras, entre otros, dificultan el procesamiento de datos satelitales, ya que alteran y dificultan la transferencia de datos al sensor.

En diferentes ciudades se ha llevado el estudio y análisis del fenómeno ICU, resaltando los siguientes hallazgos; en Santiago de Chile, en el 2014, se identificó una intensidad de ICU de 5,9 grados Celsius (Sarricolea y otros 2014), en Medellín Colombia se encontró una intensidad ICU de 4,81 grados Celsius (Estrada 2017), en Cuenca – Ecuador tuvo una intensidad ICU de 2 grados Celsius (Mena y otros 2017), en la ciudad de Nueva York – Estados Unidos se halló una intensidad ICU de 3 grados Celsius (Gedzelman 2003). En este sentido, no se puede establecer una magnitud usual del fenómeno pues la altitud a la que se encuentran las diferentes ciudades, así como su emplazamiento geográfico, hacen que varíen las magnitudes de ICU entre ciudad y ciudad. En adición, la incidencia de radiación solar varía en el tiempo, lo que también marca una diferencia en las temperaturas registradas por las diferentes metodologías.

Justificación

Según la información revisada y estudiada, algunas ciudades de Latinoamérica no han sido objeto de estudio de los fenómenos ICU o IFU. Es por ello que es pertinente y necesario realizar una investigación sobre el fenómeno ICU en Riobamba, con el objetivo de aportar a la literatura con un análisis en el contexto andino latinoamericano. Analizar y estudiar este fenómeno permitirá esbozar un panorama de la situación térmica de la ciudad de Riobamba, a fin de que se puedan encaminar esfuerzos para prevenir este tipo de fenómenos que afectan a la población de las ciudades y contribuyen al calentamiento global.

Delimitación del área de estudio

Riobamba se sitúa en el callejón interandino en la Sierra central del Ecuador, se ubica a 175 km al sur de la capital Quito, se localiza en el cantón que lleva su mismo nombre, dentro de la provincia de Chimborazo. (Figura Nro.1) Se ubica a una altitud de 2.754 m.s.n.m., el área urbana se extiende con 30.949 metros cuadrados, exceptuando las áreas urbanas parroquiales, la temperatura promedio anual es de 13.4 grados Celsius (GADMR 2021). La presente investigación se centrará en la zona urbana y los entornos rurales inmediatos a la ciudad de Riobamba.

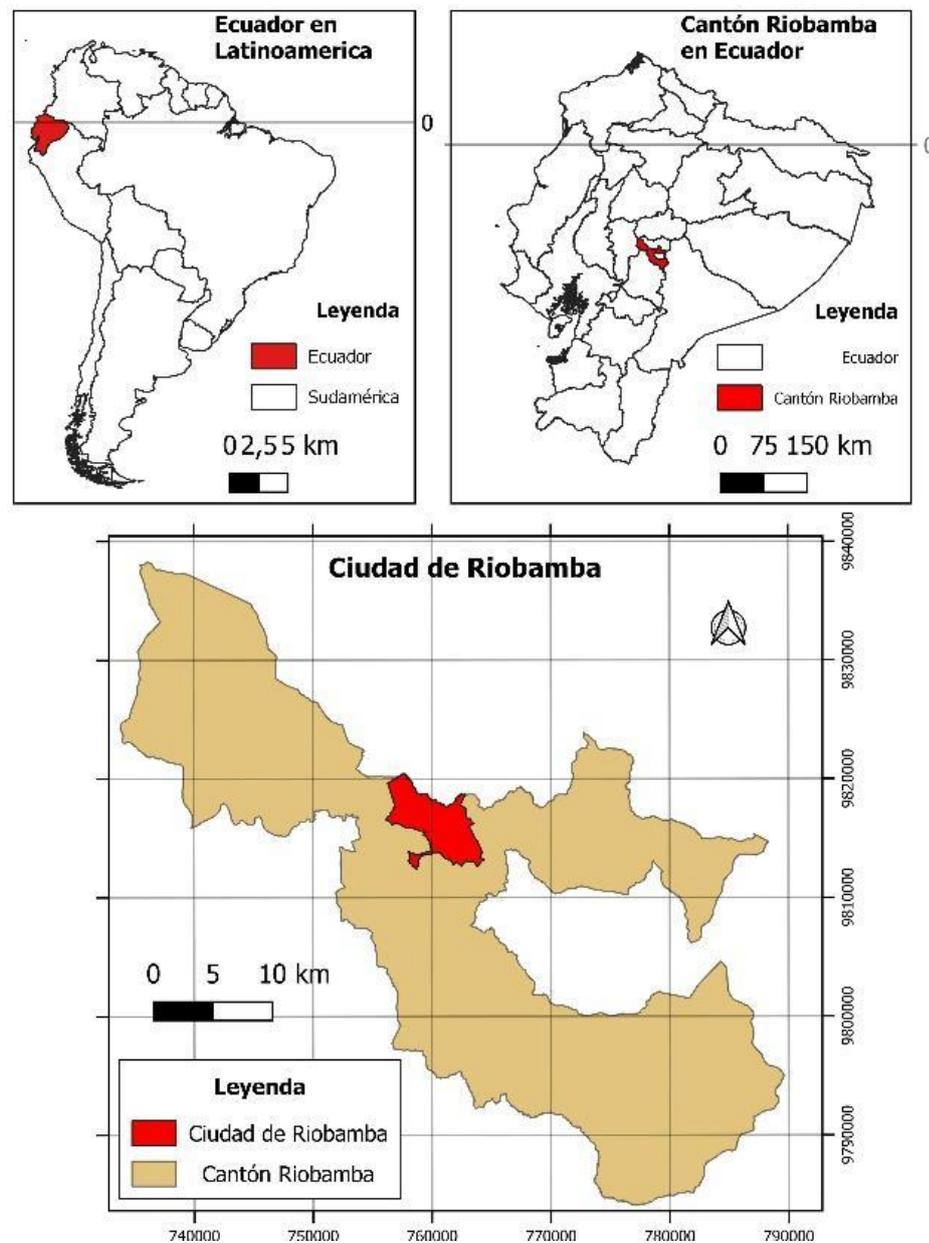


Figura 2. Mapa de ubicación

Es ahí donde surge la pregunta de: ¿cómo y dónde se presentan los fenómenos Isla de Calor Urbana o Isla de Frío Urbana en la ciudad de Riobamba? Y mediante un análisis estadístico y el uso de imágenes satelitales, se llevará a cabo una evaluación para identificar y cuantificar la diferencia de temperaturas entre las zonas urbanas y los territorios rurales adyacentes a la ciudad de Riobamba.

Objetivos

Objetivo General

Identificar la magnitud y distribución espacial del fenómeno ICU o IFU en la ciudad de Riobamba.

Objetivos Específicos

-Precisar la temperatura ambiente promedio máxima y mínima de los años 2015, 2016 y 2017 en la ciudad de Riobamba, a través del análisis estadístico de datos meteorológicos.

- Establecer la magnitud y distribución espacial del fenómeno ICU mediante teledetección en los años 2015 y 2017 en la ciudad de Riobamba, a partir de la estimación de la temperatura de brillo.

-Determinar la magnitud y distribución espacial del fenómeno ICU por medio de muestreo con termómetro manual en la ciudad de Riobamba para contrastar los resultados obtenidos a partir del análisis de datos satelitales.

Tabla 1.
Vinculación objetivos específicos con metodología aplicada.

Objetivos	Método
Precisar temperatura ambiente promedio máxima y mínima de los años 2015, 2016 y 2017 en la ciudad de Riobamba.	A través de un análisis estadístico de promedios, mínimas y máximas de los datos meteorológicos de temperaturas de los años 2015, 2016 y 2017 de la estación meteorológica ESPOCH, elaboración de gráficos para interpretación de tendencias.
Establecer magnitud y distribución espacial del fenómeno ICU mediante teledetección en los años 2015 y 2017 en la ciudad de Riobamba.	Mediante el cálculo de temperatura de brillo con imágenes satelitales landsat 8 de la banda termina 10 se determina la temperatura de brillo de la ciudad y su distribución espacial.
Determinar la magnitud y distribución espacial del fenómeno ICU mediante muestreo con termómetro manual en la ciudad de Riobamba.	Recopilación de temperaturas ambiente con un termohigrómetro manual en 14 puntos distribuidos homogéneamente en la ciudad y sus alrededores, elaboración de un mapa de calor con los datos de temperatura recolectados, contraste de promedios de temperaturas urbanas y rurales y finalmente la estimación de la intensidad del fenómeno ICU.

Marco de referencia

Social

En promedio la densidad poblacional de países en vías de desarrollo supera cuatro veces el promedio de densidad poblacional de países desarrollados, este crecimiento demográfico en países de bajos ingresos provoca que los edificios e infraestructuras no suplan la necesidad de albergar a la población, incrementando de esta manera el hacinamiento, la congestión vehicular y a su vez elevando los niveles de contaminación atmosférica y temperatura ambiente de las ciudades (OECD/European Commission 2020). El crecimiento demográfico de la ciudad de Riobamba en 20 años fue del 1.77% anual y superó la media anual del Ecuador, por lo que en los datos se estima que desde 1990 al 2010 creció demográficamente un 35.41% (Censos 1990; 2001 2010). Este crecimiento demográfico se debió a diversos factores, principalmente porque la ciudad de Riobamba presentó las condiciones básicas para satisfacer las necesidades de sus habitantes, la apertura de vías que conectan las áreas rurales con las zonas urbanas, así también como la construcción de edificaciones de interés social como fue en 1908 la construcción de la estación de ferrocarril que trajo consigo nuevas infraestructuras comerciales y residenciales a los alrededores de la estación ferroviaria (Klaufus 2009). Así también, en el 2005 se construye el campus “Edison Riera” de la Universidad Nacional de Chimborazo (UNACH) en el barrio San Antonio del Aeropuerto en las afueras del límite urbano de Riobamba; estos factores impulsaron la construcción de conjuntos residenciales y un aumento en la dinamización económica de las áreas suburbanas de Riobamba, cambiando la cobertura y uso de suelo de actividades agrícolas, ganaderas y forestales por residencias y comercios, producto de la afluencia de estudiantes de las afueras (Chimborazo 2015). Este crecimiento demográfico acelerado trae consigo un incremento en el nivel de vulnerabilidad de los asentamientos humanos, producto de la débil planificación y ordenamiento territorial que existe en estos nuevos emplazamientos urbanos (Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos 2011).

Conforme al Plan de Desarrollo Urbano de la Ciudad de Riobamba (PDUR) de 1992, se establece el límite del área urbana de la ciudad según la extensión cubierta por servicios municipales como suministro de agua potable, electricidad, limpieza de calles y servicios similares. En este contexto y basándose en los datos proporcionados por el municipio, se delimita un área urbana que abarcaba 2,882 hectáreas en el año 1990. (C+C ConsulCentro 1992). Mas sin embargo, según una investigación realizada con sensores remotos en la tesis elaborada por Paola Coello en el 2019, se determina que en

el año 1998, la ciudad de Riobamba poseía una extensión de mancha urbana de 2.025 hectáreas, con la predominancia de coberturas de suelo de tipo vegetación arbustiva, herbácea y páramos; para el año 2008 esta extensión fue de 2.753 hectáreas, incrementando el área urbana en un 35.97% respecto al 1998 y disminuyendo considerablemente la cobertura de suelo de tipo vegetación arbustiva, herbácea y páramos, que fueron sustituidos por suelos desnudos y áreas construidas. Finalmente, en el año 2017 la superficie urbana de la ciudad de Riobamba fue de 3.243 hectáreas, reduciendo las coberturas vegetales y primando los suelos desnudos y áreas construidas, estas zonas se expandieron más allá del límite urbano aprobado (Brito 2019).

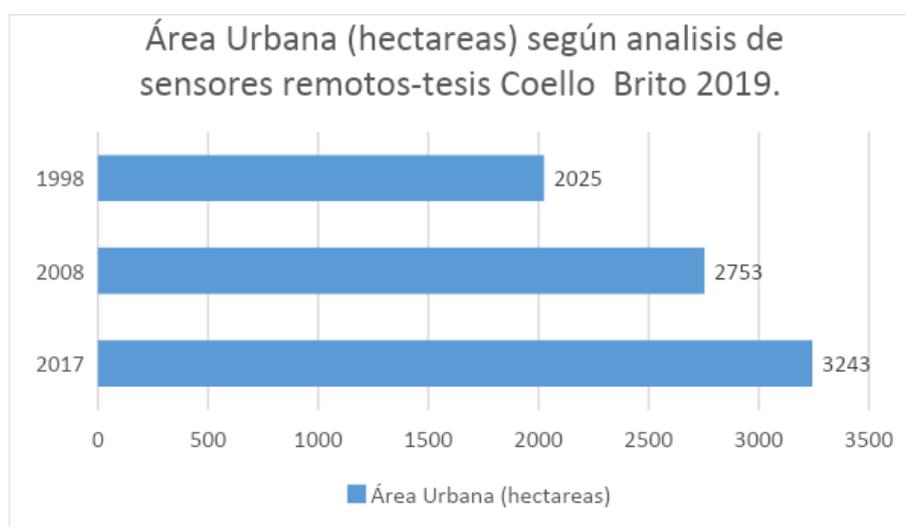


Figura 3. Crecimiento urbano de Riobamba

Fuente: Brito, 2019.

Legal

En la Constitución del Ecuador del año 2008 en su artículo 264 y en el artículo 55 del Código Orgánico de Organización Territorial COOTAD; determinan que los Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales se encargarán de formular los planes de ordenamiento territorial con el fin de regular el uso y ocupación del suelo urbano y rural de las jurisdicciones cantonales correspondientes (EC 2008) (EC 2019). En ese sentido la ciudad de Riobamba, a través de la Municipalidad, cuenta con algunos instrumentos legales y normativos que delimitan y tratan el límite urbano de la ciudad.

En el plan de Desarrollo Urbano de Riobamba del año 1992 se establece un límite urbano que contaba con una extensión de 2.882 hectáreas (C+C ConsulCentro 1992).

Según el último texto normativo que determina el límite urbano de la ciudad de Riobamba, (Nuevo Código Urbano) oficializado y publicado en noviembre del 2017, la ciudad de Riobamba tiene un límite urbano de 3.200 hectáreas (GADMR 2017).

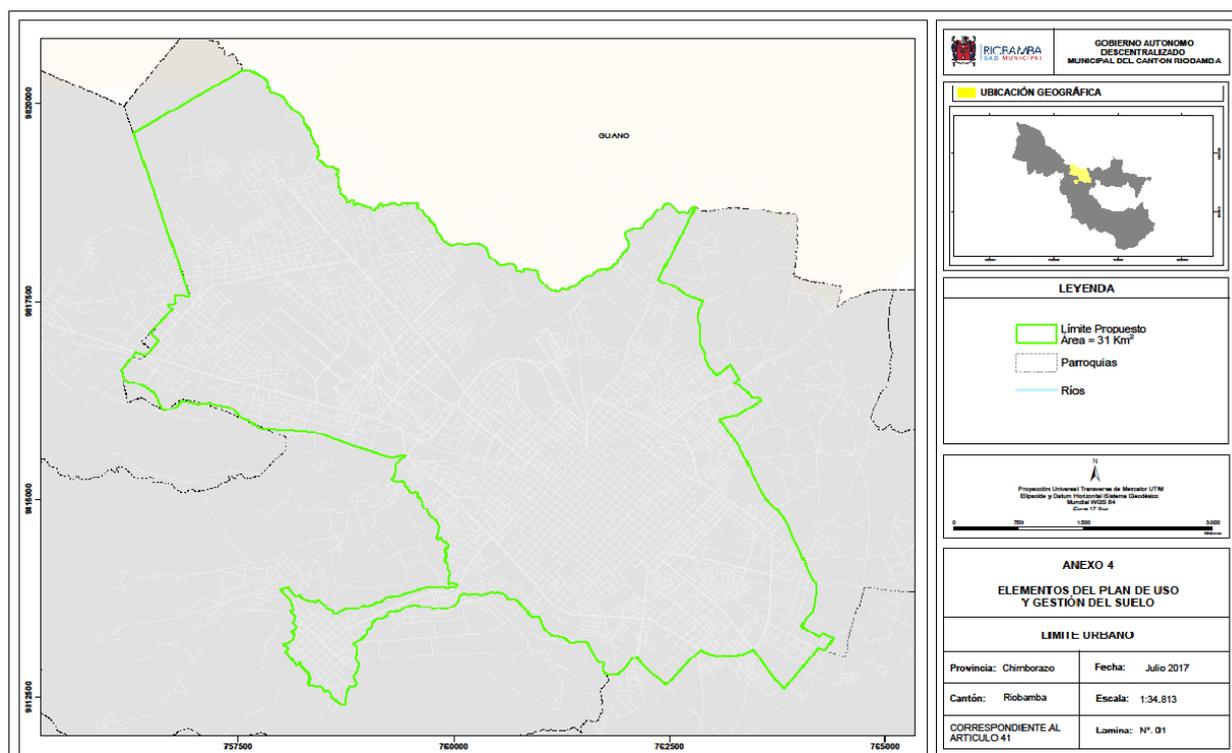


Figura 4. Mapa de Límite Urbano Riobamba 2017

Fuente: Nuevo Código Urbano - Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Riobamba.

Histórico

La original Riobamba fue sepultada en 1797 debido a un terremoto de gran magnitud y posterior colapso de la colina denominada Cullca, dos años después del terremoto la ciudad se reubica en la llanura de Tapi, sitio donde se emplaza con la forma de damero (cuadrícula) alrededor de la plaza central (Coronel 2015). En esta nueva localidad la ciudad de Riobamba se organizó en 268 manzanas, de las cuales 243 las ocupaban blancos y mestizos, las otras 25 manzanas restantes las habitaban indígenas

(Astudillo y Mancheno 2018). Posteriormente, a inicios del siglo XX, entre 1897 y 1908 se construyó la línea férrea que conectaba Quito – Guayaquil, siendo la ciudad de Riobamba el vértice por el que atravesaba el ferrocarril, provocando que a los alrededores de la estación férrea se emprendan nuevas fábricas e iniciando un nuevo progreso económico y social en la ciudad. La Sociedad Bancaria del Chimborazo ubica una sede en Riobamba, lo que provoca el incremento en obras, infraestructuras y equipamientos a fin de darle prestigio y modernidad a la ciudad (Klaufus 2009).

Entre 1909 y 1926 la ciudad se dividía en 3 parroquias: Maldonado, Lizarzaburu y Veloz, en el año 1913 la ciudad contaba con un área de 196 hectáreas; en 1918 el arquitecto municipal Cristóbal Oquendo Salas prolonga algunas avenidas de la ciudad, incrementándose establecimientos comerciales y residenciales a los alrededores de las avenidas Veloz, Guayaquil y 10 de agosto; para 1925 la ciudad ya contaba con un área de 232 hectáreas (Astudillo y Mancheno 2018). Posterior al auge económico y social, adicional a los gastos incontrolados y especulaciones, provocaron el desplome de la Sociedad Bancaria de Chimborazo y de otras entidades financieras, deteniendo momentáneamente la expansión y crecimiento de la ciudad (Klaufus 2009). En los años sesenta el avenimiento de las reformas agrarias implicó algunos cambios sociales y físicos de la ciudad, para 1954 el arzobispo Leónidas Proaño ejecutaba la doctrina de la liberación en su gestión, arrebatando el papel importante que la iglesia católica tenía sobre el desarrollo de la ciudad (Klaufus 2009). Con la gestión de Leónidas Proaño, que se caracterizaba por el alfabetismo y una autoconciencia étnica, provocando una participación más activa de la población indígena en la vida urbana (Klaufus 2009). La ciudad crecía hacia el norte y nororiente, producto de la migración de población indígena de los alrededores, es así que entre 1938 y 1974 la población creció de 25 a 58 mil habitantes, a inicios de los años cuarenta al norte centro de la ciudad se construyó el aeropuerto de carácter militar para la defensa en la guerra contra el vecino país Perú (Klaufus 2009). En los años setenta se construyen los primeros barrios populares en las periferias de la ciudad, con población proveniente de comunidades cercanas como la de Penipe y que se ubicó al lado oriental de la ciudad, en el lado sur personas originales de San Luis y Chambo y en el norte pobladores provenientes de San Andrés (Klaufus 2009). A inicios de los años noventa, menos de la tercera parte del área urbana se encontraba consolidada y más de la mitad se encontraba en construcción (Klaufus 2009).

En la actualidad, la ciudad cuenta con un límite urbano de 3.200 hectáreas, las cuales no se encuentran consolidadas en su totalidad y, en base al análisis de los datos

de evolución del área urbana de la ciudad, se puede observar que Riobamba no ha tenido un crecimiento urbano paulatino y ordenado, sino que al contrario, se ha ido modificando con el tiempo y descontroladamente. Según los datos proporcionados en el Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del 2021, el área urbana de la ciudad se fue extendiendo en el espacio y en el tiempo de acuerdo como se observa en la siguiente tabla.

Tabla 2
Histórico del área urbana de la ciudad de Riobamba

FECHA	ÁREA URBANA EN HECTÁREAS
Siglo XVIII	38
1900-1930	152
1940-1950	552.4
1984	1503
1990	1749
1998	2812
2000-2011	5584
2014-2020	3094

Fuente: PDOT - Gobierno Autónomo Descentralizado del Cantón Riobamba.

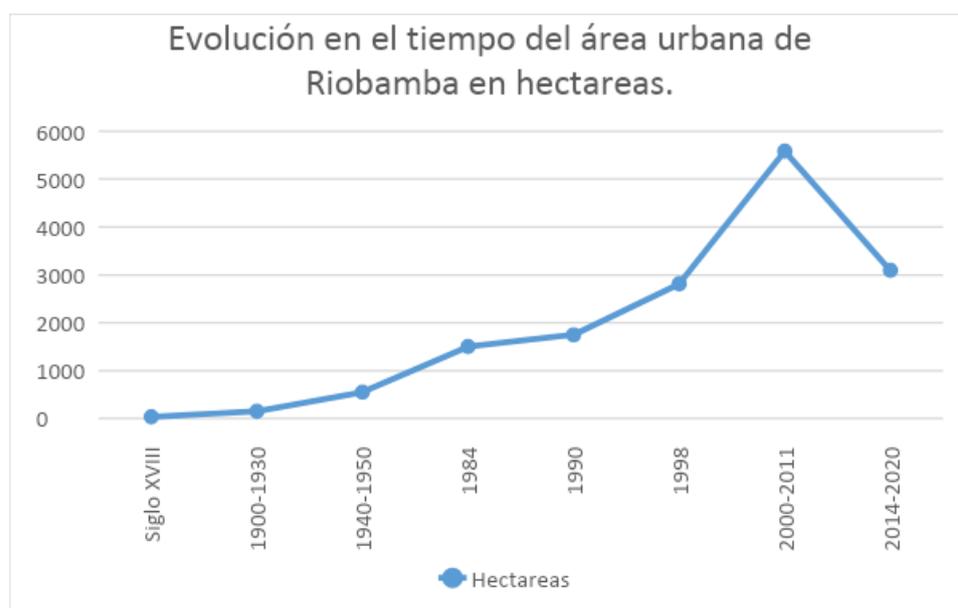


Figura 5. Evolución del área urbana de Riobamba

Fuente: PDOT - Gobierno Autónomo Descentralizado del Cantón Riobamba.

Tipo de Investigación

La base teórica que guía esta investigación se centra en un enfoque cuantitativo; el cual se inicia con el análisis estadístico de los datos de temperatura, recopilados por la estación meteorológica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH) en Riobamba. Esto se realiza con el propósito de obtener una comprensión de las temperaturas registradas en la estación meteorológica. Luego, se procede al procesamiento computarizado de datos raster provenientes de imágenes satelitales de la misión estadounidense Landsat 8. Este procesamiento tiene como objetivo identificar la magnitud y la distribución espacial del fenómeno conocido como Isla de Calor Urbano (ICU) o Isla de Frío Urbano (IFU) en Riobamba, utilizando la temperatura de brillo, también denominada temperatura de la superficie radiante.

La meteorología y la teledetección son disciplinas que enmarcan al objetivo de la presente investigación, ambas se caracterizan por la aplicación de métodos cuantitativos.

Capítulo primero

Isla de Calor Urbana, Teledetección, Misión Landsat

1. Isla de Calor Urbano

Se la denomina “isla” porque en los patrones de las isotermas se puede apreciar una forma similar a la de una isla en el mar (Oke 1995). La Isla de Calor Urbana se define como la disparidad térmica que se produce entre las zonas urbanas y las regiones no urbanizadas que rodean una ciudad, esta diferencia de temperaturas se debe principalmente a que las superficies cubiertas por cemento, concreto, asfalto, ladrillo, etc., absorben una mayor cantidad de radiación solar.

Después, estas superficies absorben calor y emiten esta energía térmica al ambiente, lo que resulta en un aumento de las temperaturas en las áreas urbanas. (Oke 1978). Incluye también en calor urbano a las fuentes de calor provocadas por actividades antropogénicas como; sistemas de aire acondicionado, transporte de personas y mercancías, quema de combustibles fósiles, entre otros, de tal forma que las emisiones de carbono en las ciudades corresponden al 97% del CO₂ generado por los humanos, de lo cual se divide el 40% proveniente de la industria y el 60% restante del transporte y construcción (Svirejeva-Hopkins et al 2004). El fenómeno ICU es una evidencia del cambio climático en una escala local, en la que los cambios son perceptibles si se presta particular atención a las condiciones ambientales o climáticas de la zona.

El calor concentrado en las ciudades, principalmente debido a las actividades antropogénicas, está directamente relacionado con la densidad poblacional; a mayor número de personas que habitan una ciudad, mayor será el calor generado por las actividades. Es así que un análisis de doce mega ciudades en Asia arrojó que existe una correlación entre el número de habitantes de una ciudad y el incremento en la presencia del fenómeno ICU (Hung et al. 2006).

Los factores principales relacionados con el fenómeno ICU incluyen la considerable liberación de calor debido a las actividades humanas, la obstrucción de los flujos de aire a causa de la densidad de las infraestructuras, una alta absorción de

radiación solar y una limitada evapotranspiración debido a la escasa cobertura vegetal (Oke 1978).

El primer registro de una diferencia de temperaturas entre las zonas urbanas y sus alrededores, lo realizó Luke Howard en 1833 en la ciudad de Londres, en ese entonces se utilizaron termómetros como herramienta para las mediciones de temperatura, con lo que consiguieron identificar la diferencia de temperaturas entre la ciudad y las áreas rurales próximas (Howard 1833). A medida que la tecnología siguió avanzando se aplicaron diferentes métodos para la estimación y monitoreo de la Isla de Calor Urbana; en un inicio se utilizaron transectos móviles para la observación de temperaturas urbanas; después de ello, con el avenimiento de sensores remotos para la exploración y observación de la superficie terrestre y el lanzamiento del programa satelital Landsat en 1972, se da inicio al estudio de la ICU con información satelital. El programa Landsat cuenta con una banda térmica para el monitoreo de las temperaturas de la superficie terrestre, esta tecnología permitió aumentar un método más a las herramientas utilizadas para el estudio y análisis de la ICU.

A partir de la literatura revisada, se definen dos tipos de ICUs; la primera de ellas es la ICU Superficial (ICUs) o también llamada ICU censada remotamente, este nombre en particular se da porque usualmente se usa información satelital obtenida del sensor infrarrojo térmico para su determinación. Esta ICU se caracteriza por una variación en temporadas, siendo la más intensa durante el verano, asimismo se caracteriza por estar presente durante la noche y el día, es en este último cuando es particularmente más intensa (Oke 1982). La diferencia entre las temperaturas urbana y rural varía de 5 y 10 grados Celsius durante el día, mientras que en la noche esta variación es de 10 a 15 grados Celsius (Voogt y Oke 2003). Este fenómeno mantiene una temperatura de la superficie superior a la temperatura del aire (Oke 1982). La presente investigación determinará la presencia de ICU en la ciudad de Riobamba a partir de la Temperatura de brillo del sensor.

El segundo tipo es la ICU Atmosférica (ICUa) que, a diferencia de la ICUs, es determinada a partir de métodos tradicionales como termómetros en transectos móviles o con termómetros de estaciones meteorológicas fijas, este tipo de ICU mantiene unas diferencias de temperaturas entre el área rural y urbana durante el día de 1 a 3 grados Celsius y en la noche, que es cuando se registra su mayor intensidad, de 7 a 12 grados Celsius; son representadas mediante Figuras de isotermas (U.S. Environmental Protection Agency 2008). La ICUa se divide en dos tipos; la ICU a capa de dosel, la

cual comprende desde la superficie hasta por debajo de las copas de los árboles y techos, es aquí donde las personas vivimos; el segundo tipo de ICUa es la ICU de la capa límite, misma que se extiende desde la copa de los árboles y techos de las construcciones hasta el punto donde el paisaje urbano ya no influye en la atmósfera, aproximadamente 1,5 kilómetros desde la superficie (U.S. Environmental Protection Agency 2008).

Es importante diferenciar entre los fenómenos Ola de Calor e Isla de Calor Urbana, el primer fenómeno está categorizado como un evento meteorológico extremo (WMO 2023). La Ola de Calor se comprende como la llegada de aire muy caliente sobre un área extensa que dura entre unos cuantos días a varias semanas (WMO 2023). Así también el IPCC (2021) menciona que la Ola de Calor es un periodo de tiempo cálido, provocado por el exceso en el umbral de temperatura relativa y la principal característica reside en la temporalidad de 2 o más días con temperaturas superiores a las normales y abarca escalas regionales a globales (WMO 2023).

Contrariamente a la Ola de Calor, la Isla de Calor Urbana se caracteriza por la situación en la que las temperaturas dentro de la ciudad son más altas que las temperaturas en las zonas rurales que la rodean, principalmente se da por las actividades humanas, el tipo de superficies y el consumo de energía, esto provoca que la ciudad retenga más calor, incrementando la temperatura ambiente de la ciudad y generando una isla de calor (Aflaki et al. 2016). Este fenómeno a diferencia de la Ola de Calor tiene una escala local.

Diversos factores generan la ICU, partiendo principalmente por el tipo de cobertura superficial. En las ciudades, la escasa cobertura vegetal reduce significativamente la evapotranspiración y por consiguiente la humedad relativa ambiente, disminuyendo la capacidad del ambiente para refrigerarse; de igual forma, al estar cubiertas las superficies con materiales impermeables, el agua de precipitación se escurre en menor tiempo. El material del que están constituidas las construcciones es otro factor para la generación de ICU porque determina como la energía solar es reflejada, emitida y absorbida; la forma de la ciudad y densidad constructiva determina el flujo de viento, la capacidad de emitir radiación de regreso al espacio y también la absorción de energía. La densidad constructiva ha provocado los denominados “cañones urbanos” que se ilustra como una calle estrecha rodeada de edificios muy altos, provocando que, por el día la presencia de sombra enfríe el ambiente, mientras que por la noche, este cañón urbano impide que la radiación del día pueda ser emitida al espacio y, al contrario, es absorbida por las paredes de los edificios lo que incrementa la

temperatura del ambiente (U.S. Environmental Protection Agency 2008). Y finalmente el factor no menos importante: las actividades humanas como la industria, el transporte y el uso de energía para refrigerar o calentar espacios habitados, generan un aporte importante al incremento de temperatura en la ciudad (U.S. Environmental Protection Agency 2008).

2. Teledetección

Se trata de un método que posibilita la obtención de datos sobre un objeto en estudio desde una ubicación remota. El propósito principal de esta técnica radica en adquirir, procesar y analizar imágenes digitales de la superficie terrestre, las cuales son capturadas por satélites artificiales (Guitierrez y Nieto 2006). Estos satélites orbitan alrededor de la tierra a distancias de aproximadamente 600 y 900 kilómetros de altura, unos tienen órbitas helio sincrónicas, es decir, a una inclinación de 90 grados respecto al plano ecuatorial; y otros tienen una órbita perpendicular a la rotación de la Tierra (Vega et al. 2010). Estos satélites llevan sensores multiespectrales e hiperespectrales, los cuales posibilitan la observación de elementos en la superficie terrestre a través de distintas franjas del espectro electromagnético o longitudes de onda, microondas, infrarrojos, térmicos y del espectro visible (Vega et al. 2010).

La teledetección parte de la fuente de energía primaria: el sol, que refleja su energía en la superficie terrestre, donde los objetos que reciben la luz solar también reflejan esta energía, pero de diferente manera dependiendo de su composición; este reflejo de energía es captada por los sensores en los satélites y posterior se puede codificar en valores radiométricos o niveles digitales para cada pixel de la imagen, para que finalmente el usuario final pueda hacer uso de estos valores con tratamientos digitales y visuales que permiten extraer información de interés (Vega et al. 2010). Según Chuvieco (1996). Los elementos de la teledetección son: fuente de energía (origen de la radiación electromagnética), cubierta terrestre (superficies naturales o artificiales), sistema sensor (sistema electrónico que capta la información electromagnética), sistema de recepción comercialización (guarda la información del sensor y la transmite), intérprete (transforma la información del sensor en información útil para el fin que se persigue) y finalmente el usuario final (beneficiario del documento con información extraída).

La forma cómo reflejan los diferentes tipos de superficie varía según las condiciones físicas (textura, humedad y temperatura), químicas (contenido de materia orgánica, composición, etc.) y ambientales (estación del año, pendiente, hora de la toma, orientación, entre otros), es por ello que el reflejo de los objetos captado por los sensores no es único y homogéneo (Guitieres y Nieto 2006). Al tipo de reflejo particular para cada elemento se lo denomina firma espectral, es la reflectancia de acuerdo a la longitud de onda, así que se puede usar para clasificar distintos materiales (U.S. Geological Survey 2019).

Las imágenes satelitales varían según sus resoluciones entre: resolución espacial, que define la menor unidad representada en un píxel, cuanto menor sea el tamaño del píxel, mayor será el nivel de detalle en la imagen; por otro lado, la resolución espectral se refiere a la capacidad de un sensor para captar un rango específico de longitudes de onda y el número de bandas espectrales que puede detectar; a su vez, la resolución radiométrica, se refiere a la cantidad de valores almacenados en un píxel, en otras palabras, la cantidad de niveles de grises que puede contener un píxel; y finalmente, la resolución temporal, es el tiempo que toma al satélite regresar al mismo sitio observado de la tierra (U.S. Geological Survey 2019).

3. Misión Landsat

En 1972 se lanza al espacio la primera misión de satélite para monitorear los recursos naturales de la tierra, en ese entonces la misión se llamaba Earth Resources Technology Satellites por sus siglas en inglés ERTS (INEGI s.f.). La responsabilidad de mantener y operar el sistema recae en la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA), mientras que la comercialización de las imágenes estaba en manos del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Posterior a esta misión se la denominó con el nombre Landsat, que quiere decir Land: Tierra y Sat: Satélite (INEGI s.f.).

Hasta el momento se han enviado 9 misiones Landsat; la octava misión, Landsat, orbita alrededor del planeta en forma casi circular con una orientación polar, siempre en la dirección de la porción de la Tierra que recibe luz solar, demora 98.9 minutos dar una vuelta completa alrededor del planeta y pasa por el mismo sitio cada 16 días, se encuentra a 705 kilómetros de altura (U.S. Geological Survey 2019).

Esta misión cuenta con dos sensores: el primero es Operational Land Imager (OLI) que captura información en las regiones de longitud de onda visible, infrarrojo cercano, infrarrojo de onda corta y cuenta con una banda pancromática, en total este sensor tiene 9 bandas. Esta misión está equipada con dos dispositivos de captura de datos. El primero de ellos es el OLI, el cual recopila información en diversas franjas del espectro electromagnético, incluyendo las regiones de longitud de onda visible, infrarrojo cercano, e infrarrojo de onda corta. Además, dispone de una banda pancromática, sumando en total 9 bandas de captura. (U.S. Geological Survey 2019). El segundo sensor de esta misión es el Thermal Infrared Sensors (TIRS) que opera con dos espectros termales infrarrojos en las bandas 10 y 11, los cuales a través de tratamiento de datos nos proporcionan la temperatura superficial de la tierra (U.S. Geological Survey 2019).

El sensor TIRS opera a través de fotodetectores de pozo cuántico, los cuales registran la radiación infrarroja térmica de longitud de onda larga emitida por la superficie terrestre. La intensidad de esta radiación está directamente relacionada con la temperatura de la superficie (U.S. Geological Survey 2019).

La misión Landsat y su catálogo de imágenes se organiza en una cuadrícula con columnas (path) y filas (row) con 190 kilómetros en el eje X y 180 kilómetros en el eje Y, esta ordenación tiene el fin de facilitar la identificación para la descarga según la posición geográfica que sea de interés para el estudio; para el caso de esta investigación se utilizará la celda con path: 10 y el row: 61, misma que comprende el territorio ecuatoriano de la sierra central (U.S. Geological Survey 2019).

Capítulo segundo

Metodología

La presente investigación aplicará tres métodos diferentes para el análisis del fenómeno ICU en la ciudad de Riobamba. Se aplicarán tres métodos diferentes por cuanto

ada uno de los tiene características que los marginan en pequeñas imprecisiones; empezando por la incompletitud de los datos en el análisis estadístico de datos meteorológicos de la estación meteorológica ESPOCH; adicional, al disponer de datos de una sola estación meteorológica no se puede interpolar los datos para contrastar los mismos. En la obtención de temperatura de brillo a partir de análisis de imágenes satelitales se ve interferida por la presencia de nubes, partículas suspendidas, sombra de nubes, ceniza volcánica en la atmósfera y vapor de agua, lo que dificulta el adecuado cálculo de variables y obtención de datos objetivos (Cook et al. 2014). De igual manera la topografía o rugosidad de la superficie juega un papel preponderante al momento de la extracción de datos a partir de teledetección, por ello en un estudio llevado a cabo se determina la influencia de la pendiente y la incidencia de la radiación solar en la obtención de datos de temperatura con sensores remotos (Kuenzer y Zhang 2007). Finalmente, se realizó un muestreo de temperaturas manual con termohigrómetro, a fin de determinar, otra fuente confiable, las temperaturas observables en el área de estudio; este método tiene la particular imprecisión de que la presencia de vientos refrescan la temperatura del ambiente,, la incidencia de radiación solar también altera las temperaturas ambiente, así como también en la que se realicen las .

1. Análisis de datos meteorológicos de la estación ESPOCH

Los datos meteorológicos disponibles de la estación meteorológica ESPOCH se encuentran clasificados diariamente con datos de temperaturas máximas, medias y mínimas. Para facilitar el análisis de los datos de temperatura ambiental de todos los años en estudio, se procedió a extraer los promedios de temperaturas mínimas, medias y máximas de cada mes en los años 2015, 2016 y 2017. A partir de estos datos se generan gráficos de líneas para una mejor interpretación y análisis; también se genera la línea de tendencia para cada set de datos.

Tabla 3.

Datos temperaturas mínimas, medias y máximas del 2015, 2016 y 2017 en Riobamba de la estación meteorológica ESPOCH.

Temperaturas	2015			2016			2017		
	MÍNIMA (DÍA)	MEDIA	MÁXIMA (DÍA)	MÍNIMA (DÍA)	MEDIA	MÁXIMA (DÍA)	MÍNIMA (DÍA)	MEDIA	MÁXIMA (DÍA)
Enero	7.2 (3)	13.3	24.6 (16)	3.8 (28)	15.6	26.7 (27)	6.2 (16)	13.4	25.0 (19)
Febrero	5.2 (21)	14.4	26.8 (21)	8.0 (2)	14.6	25.6 (27)	4.3 (19)	13.4	25.2 (10)
Marzo	7.8 (3)	13.8	23.8 (2)	9.0 (26)	14.4	24.0 (6)	5.4 (1)	13.1	22.4(16)
Abril	7.0 (18)	13.3	21.6 (19)	9.3 (3)	14.5	24.8 (25)	6.0 (2)	13.6	22.7 (22)
Mayo	5.4 (2)	13.2	23.6 (3)	5.4 (31)	13.8	24.0 (30)	3.8 (29)	13.5	22.3 (18)
Junio	5.4 (2)	12.6	24.4 (14)	5.7 (9)	12.4	22.1(1)	5.2 (6)	13.1	24.7 (8)
Julio	3.2 (14)	12.7	22.8 (14)	5.0 (15)	12.3	22.7(16)	3.6 (12)	11.8	23.0 (15)
Agosto	3.2 (14)	12.7	22.8 (14)	2.5 (25)	12.9	23.8 (29)	4.0 (1)	12.5	23.2 (19)
Septiembre	2.2 (15)	13.2	24.5 (29)	6.2 (13)	13.0	25.6 (13)	2.8 (5)	13.4	24.7 (21)
Octubre	3.4 (8)	14.0	25.4 (30)	3.2 (27)	14.1	25.4 (31)	5.7 (9)	13.7	25.7 (25)
Noviembre	4.8 (3)	14.0	25.0 (3)	0.2 (21)	14.7	26.2 (17)	4.2 (4)	14.3	25.5 (10)
Diciembre	2.6 (3)	14.0	24.6 (31)	5.4 (22)	13.9	24.5(11)	3.7 (13)	14.0	25.6 (10)

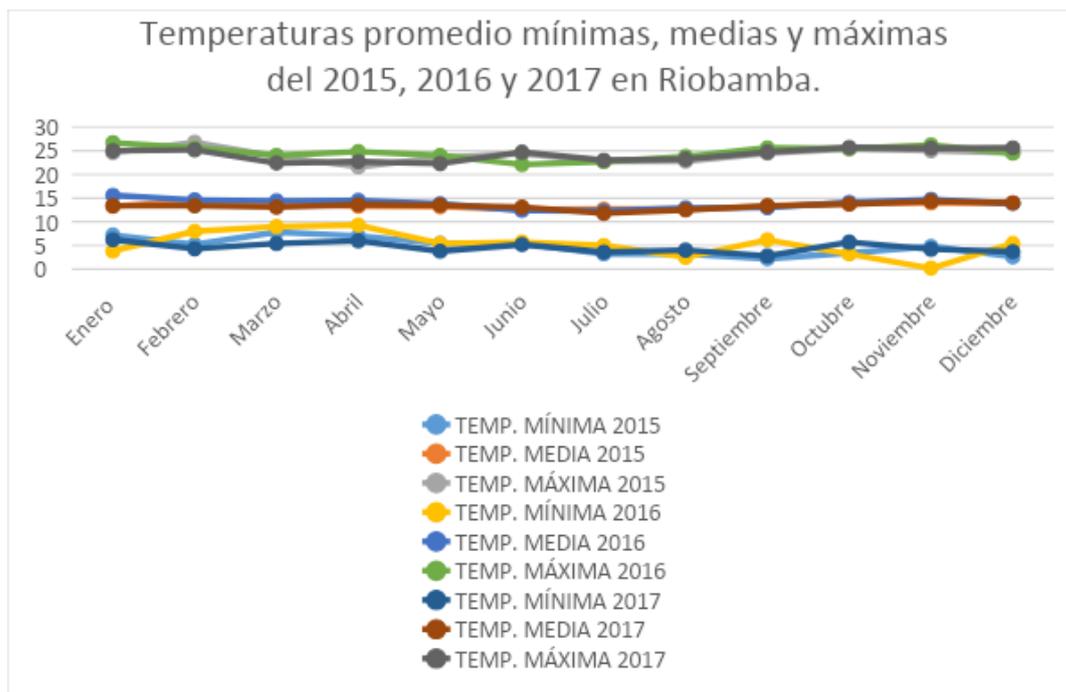


Figura 6. Gráfico de temperaturas mínimas, medias y máximas del 2015, 2016 y 2017 en Riobamba de la estación meteorológica ESPOCH

A partir del análisis de los datos de la estación meteorológica se podrá tener una perspectiva de los rangos de temperatura que se observan en la ciudad de Riobamba, de tal manera que se pueda contrastar con las temperaturas que resulte del procesamiento de imágenes satelitales y del muestreo con termohigrómetro manual.

Es importante destacar que, con el fin de garantizar la disponibilidad de imágenes satelitales sin obstrucciones debidas a nubes en la región de interés, se adquirirán imágenes correspondientes a las fechas en las que la zona de estudio presente la menor cobertura nubosa a fin de que los datos de radiación puedan ser analizados con la menor interferencia atmosférica posible.

2. Selección de imágenes satelitales

A partir de la página web Earthexplorer.usgs.gov del Servicio Geológico de Estados Unidos se procede a la búsqueda y descarga de imágenes en las coordenadas de referencia con latitud: $01^{\circ} 39' 54''$ Sur y en longitud $078^{\circ} 39' 32''$ Oeste, coordenada que corresponde a la zona urbana de Riobamba, se realiza la búsqueda de imágenes en un rango de fechas desde el primero de enero del 2015 al 31 de diciembre del 2015. Se realiza otra búsqueda desde el primero de enero del 2016 al 31 de diciembre del 2016 y

una última búsqueda desde el primero de enero del 2017 al 31 de diciembre del 2017; se buscan imágenes con un rango de 0% a 100% de cobertura nubosa y a partir de las imágenes disponibles se discriminan aquellas que muestren mucha nubosidad en el área de interés de la presente investigación.

Se descargan datos de imágenes del sensor Landsat de la colección 2, ya que estas imágenes tienen una mejor calidad, a diferencia de las imágenes de la colección 1, los datos descargados de la colección 2 se encuentran en un nivel #1 de procesamiento, lo que corresponde a datos de imágenes corregidas radiométricamente y geométricamente (U.S. Geological Survey 2019). Estos datos se encuentran con la actualización del Global Reference Image por sus siglas en inglés (GRI) un sistema de geoposicionamiento del satélite Sentinel 2 que se utiliza para correcciones geométricas y a su vez recibe actualizaciones del modelo digital de elevaciones (Survey 2021). Por esta razón, no se aplicarán correcciones geométricas o radiométricas a las imágenes que se utilizarán.

Tabla 4.
Fechas de búsqueda y selección de imágenes Landsat 8 para la descarga

Periodo de Búsqueda	Imagen Seleccionada	Fecha de la imagen seleccionada	Hora de la imagen seleccionada
del 01 Ene 2015 al 31 Dic 2015	LC08_L2SP_010061_20151102_20210219_02_T1	02 noviembre 2015	15:26:49
del 01 Ene 2016 al 31 Dic 2016	LC08_L1TP_010061_20161120_20200905_02_T1	20 noviembre 2016	15:27:02
del 01 Ene 2017 al 31 Dic 2017	LC08_L2SP_010061_20170920_20200903_02_T1	03 septiembre 2017	15:26:51

A continuación, se detallan las temperaturas observadas en la estación meteorológica ESPOCH en las fechas de las imágenes satelitales descargadas para el análisis en esta investigación.

Tabla 5.
**Temperaturas registradas por la estación meteorológica ESPOCH en las fechas de
descarga Imágenes satelitales**

Imagen seleccionada	Fecha de la imagen seleccionada	Hora de captura de imagen	Temperatura máxima registrada en la estación meteorológica ESPOCH
LC08_L2SP_010061_20151102_20210219_02_T1	02 noviembre 2015	15:26:49	23,4
LC08_L1TP_010061_20161120_20200905_02_T1	20 noviembre 2016	15:27:02	25,2
LC08_L2SP_010061_20170920_20200903_02_T1	03 septiembre 2017	15:26:51	23,8

3. Medición de la ICU

El método a aplicarse en la presente investigación utiliza específicamente la banda 10 del Sensor Infrarrojo Térmico, que tiene una recepción en la longitud de onda de 10.60 - 11.19 micrómetros, esta banda se encuentra disponible para la descarga en la misión Landsat 8 (U.S. Geological Survey 2019).

Según la sugerencia del servicio geológico de Estados Unidos USGS, no es recomendable utilizar la banda 11 del sensor TIRS porque tiene un alto nivel de incertidumbre en su calibración (U.S. Geological Survey 2019).

Se genera un polígono (Figura 2) que abarca la zona urbana de la ciudad Riobamba y los alrededores próximos que se constituyen de territorios rurales, con este polígono se realizará un recorte a la banda 10, 4 y 5 de las diferentes imágenes descargadas, a fin de obtener solo el área de interés para el análisis. A las imágenes no se les aplica una corrección radiométrica y geométrica por cuanto las mismas ya cuentan con correcciones desde su descarga (U.S. Geological Survey 2019).

Se generan dos sitios de muestreo para realizar la comparación de temperaturas de imágenes satelitales y así determinar la intensidad del fenómeno ICU, el primer sitio de muestreo se ubica en el centro histórico de la ciudad de Riobamba, en la intersección de las calles Argentinos y Tarqui con coordenadas $1^{\circ} 40' 19,34''$ S y $78^{\circ} 38' 46,61''$ E. El segundo punto de muestreo se localiza en la zona rural, específicamente en el sector del barrio San Martín de Veranillo, en las coordenadas $1^{\circ} 38' 43,40''$ S y $78^{\circ} 37' 46,57''$. Ambos sitios se encuentran a la misma altitud de 2759 msnm, la única diferencia radica en que el segundo punto de muestreo se ubica en un área rural donde predominan actividades agrícolas y una menor presencia de construcciones y actividades antrópicas; se los ha elegido en esas zonas específicas ya que

Figura 7. Mapa delimitación del área de estudio

El enfoque metodológico de la "temperatura de brillo" ha sido ampliamente empleado en diversas investigaciones con el fin de estudiar y analizar diferentes fenómenos y sistemas. Este método se basa en la medición y análisis de la radiación electromagnética emitida por un objeto o sistema, lo que permite obtener información crucial sobre sus propiedades físicas y térmicas (Casaban 2017).

En el ámbito de la astronomía, la temperatura de brillo ha sido utilizada para caracterizar objetos celestes, como estrellas, planetas y galaxias. Los astrónomos utilizan espectroscopía para analizar la luz emitida por estos cuerpos y a partir de las líneas espectrales presentes en sus espectros, determinar la temperatura superficial y composición química de los mismos. Este enfoque ha sido fundamental en la clasificación estelar y su estudio evolutivo.

Asimismo, en la investigación de materiales, la metodología de temperatura de brillo ha sido empleada para analizar propiedades termo-ópticas. A través del estudio de la radiación infrarroja emitida por materiales bajo diferentes condiciones térmicas, es posible obtener información sobre su conductividad térmica, capacidad calorífica y transiciones de fase (Casaban 2017).

Los datos del satélite pueden verse interferidos por gases presentes en la atmósfera, partículas suspendidas y sombras de las nubes. En la ciudad de Riobamba la presencia de partículas de ceniza suspendidas, producto de la actividad volcánica del volcán Tungurahua y Sangay, dificultan que las lecturas del procesamiento de imágenes

satelitales puedan aproximarse a una lectura cierta de temperatura, por ello los datos se encuentran cerca de las temperaturas registradas por los termómetros de la estación meteorológica ESPOCH. Por consiguiente, los datos, producto del análisis y procesamiento de imágenes satelitales, tendrán únicamente fines de referencia más no como un dato real.

Para el cálculo de temperatura de brillo primero se transforman los valores digitales de la imagen en radiación espectral en el tope de la atmósfera (TOA), ya que a través de este proceso se reducen los factores de la misma, tales como gases y vapor de agua, que difuminan la radiación que ingresa en el planeta Tierra y también la reflejada por la superficie terrestre y que es receptada por el satélite. Para esto se utiliza la fórmula:

1. Tope de la atmósfera por sus siglas en inglés (TOA) mediante la información de la banda infrarroja térmica (10) y metadatos de la imagen (USGS s.f.):

$$L\lambda = ML * Q_{cal} + AL \quad (1)$$

Donde:

$L\lambda$: Radiancia espectral en el Tope de la Atmósfera ($W / (m^2 * sr * \mu m)$)

ML : factor de reescalado multiplicativo específico de la banda.

($RADIANCE_MULT_BAND_n$) en los metadatos.

Q_{cal} : banda térmica nro. 10 de Landsat.

AL : factor de reescalamiento aditivo específico de la banda (valor disponible en el archivo de metadatos MTL, en la línea $RADIANCE_ADD_BAND_x$, donde x es el número de banda).

Posterior a obtener el TOA, se calcula la temperatura de brillo, que es una forma de describir la radiación en relación con la temperatura de un cuerpo negro imaginario que emite una cantidad igual de radiación en la misma longitud de onda. Esta temperatura de brillo se obtiene con la inversa de la función de Planck a la radiación observada, su temperatura puede ser independiente o puede depender de la longitud de onda de la radiación (Babaeian y Tuller 2022).

2. Conversión de radiancia espectral a temperatura de brillo.

Con los datos TIRS de radiancia espectral (TOA) obtenidos previamente a partir de los valores digitales de la banda, se transforman a temperatura de brillo con ayuda de

la información de los metadatos de cada imagen, aplicando la siguiente fórmula (USGS, s.f.):

$$T = [K_2 / [\ln (K_1 / L_\lambda + 1)]] - 273.15 \quad (2)$$

Donde:

T : Temperatura de brillo (en grados Kelvin)

L_λ : Radiancia espectral (TOA)

K_1 : Constante de conversión térmica específica de cada banda

($K1_CONSTANT_BAND_X$, donde x es el número de banda térmica) en los metadatos.

K_2 : Constante de conversión térmica específica de cada banda

($K1_CONSTANT_BAND_X$, donde x es el número de banda térmica) en los metadatos.

Para transformar de grados Kelvin a grados Celsius se resta $- 273.15$ del resultado de la temperatura de brillo que se encuentra en Kelvin.

Obteniendo de esta manera la temperatura de brillo ambiente.

3. Para determinar la intensidad de la ICU se aplica la siguiente fórmula a las temperaturas obtenidas en los puntos de muestreo:

$$\text{Intensidad ICU: Temp. rural} - \text{Temp. Urbana}$$

4. Registro de temperaturas a partir de termohigrómetro manual.

Para realizar el muestreo de temperatura ambiente se utilizó el termohigrómetro manual UNI-T modelo UT333 que, según su manual, funciona con un sensor tipo módulo digital de temperatura y humedad de alta precisión, tiene un rango de medición de $-10\text{ }^\circ\text{C}$ a $60\text{ }^\circ\text{C}$, una resolución de $\pm 1.0\text{ }^\circ\text{C}$ y una tasa de muestreo cada 1/s.

Se determina los sitios de muestreo mediante el software de código abierto Q-GIS; se analiza visualmente los archivos shapefile del área de estudio, el límite del área urbana y la imagen aérea de Google satélite en color natural. A partir de esta información se ubicaron aleatoriamente 14 puntos de muestreo que se distribuyen homogéneamente dentro del área de estudio de tal manera que cubra áreas urbanas y rurales, se ubican los puntos en vías, parques o sitios de acceso público. Como se puede apreciar en la siguiente figura.

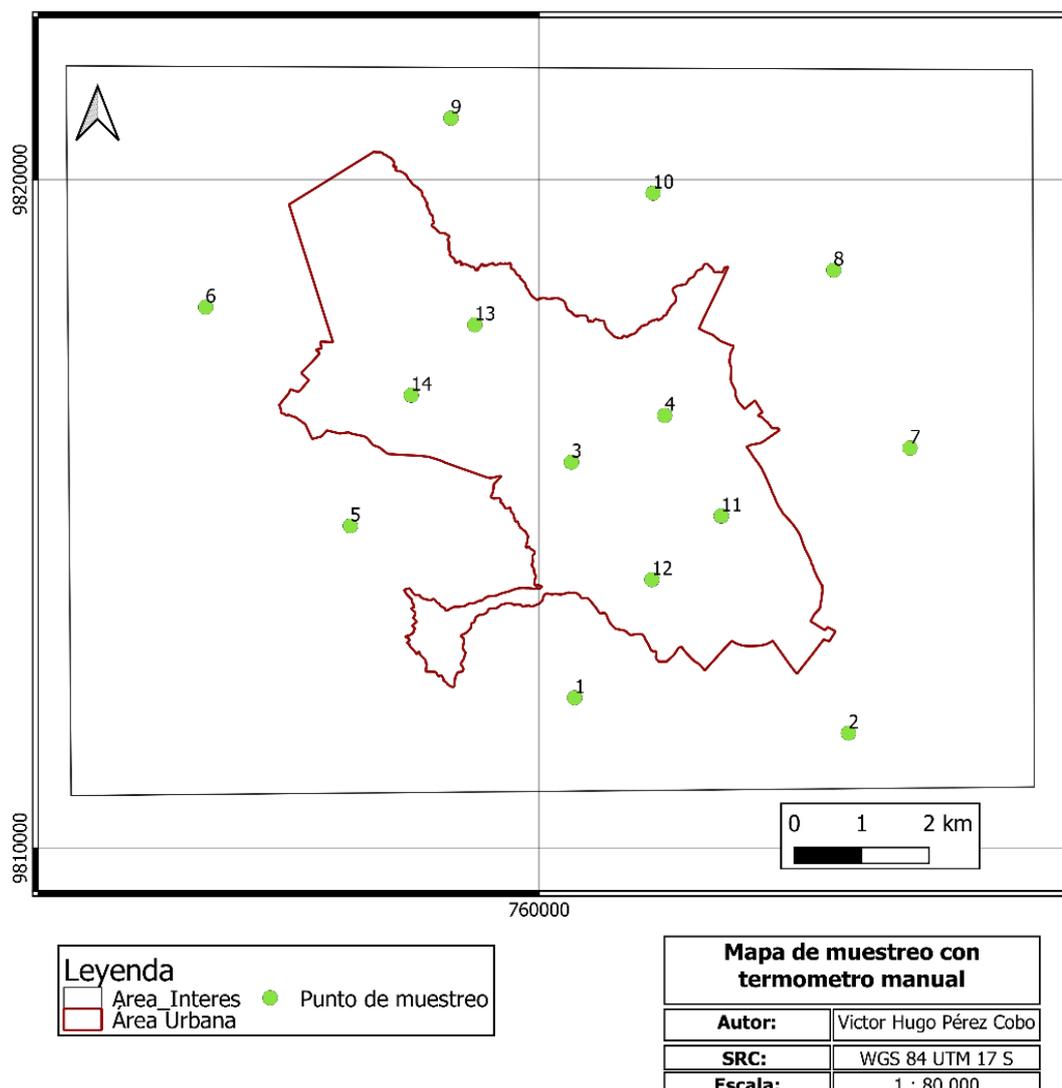


Figura 8. Mapa puntos de muestreo con termómetro manual

En una matriz en la que se identifica el número de punto, las coordenadas, la hora, fecha, temperatura registrada y una breve descripción de las características del lugar; se recopilarán los datos para el posterior análisis y obtención de salidas gráficas para la interpretación y análisis de los resultados obtenidos.

Se ejecuta la recolección de datos en los puntos de muestreo un día domingo a partir de las 9:00 de la mañana, con un vehículo tipo camioneta nos movilizamos a los puntos de muestreo, buscando recorrer una ruta óptima que permita visitar todos los puntos en el menor tiempo posible. En el traslado entre puntos de muestreo, al termohigrómetro se lo movilizó en el balde de la camioneta para evitar que el sensor

tome lecturas de temperatura dentro de la cabina del vehículo y dentro de un cartón para evitar que el viento golpee en el sensor y altere el registro de temperaturas. En cada punto de muestreo se esperó que transcurra 3 minutos a partir del encendido del termohigrómetro para registrar la temperatura y que, de esta manera, la medida tomada se encuentre estabilizada a la temperatura ambiente.

Para estandarizar el registro de temperaturas se utilizó un bastón extensible de aluminio a una altura de 1,50 metros sobre la superficie (anexo 1). Las medidas se registran en los bordillos ya que es el intermedio entre el asfalto o camino y las veredas, de esta manera se reduce la influencia de cierto tipo de materiales en el registro de temperatura. En una matriz en la que se identifica el número de punto, las coordenadas, la hora, fecha, temperatura registrada y una breve descripción de las características del lugar, se recopilaron los datos para el posterior análisis y obtención de salidas gráficas para la interpretación y análisis de los resultados obtenidos.

Mediante un análisis estadístico de las temperaturas registradas se determinan valores máximos, mínimos y medios de las temperaturas registradas manualmente. Los datos recopilados se suben a un entorno SIG para generar un mapa de calor y observar el patrón de las temperaturas registradas con el termohigrómetro manual.

Capítulo tercero

Análisis y presentación de resultados

1. Análisis Datos meteorológicos

En el año 2015 la temperatura promedio anual fue de 13,4 grados Celsius, ese mismo año la temperatura máxima promedio anual fue de 24,1 grados Celsius. La temperatura mínima promedio anual del 2015 fue de 4,8 grados Celsius, con una tendencia a la baja en las temperaturas a medida que se acercaba al mes de diciembre.

Para el año 2016 la temperatura promedio fue 13,8 grados Celsius, la temperatura mínima promedio anual fue de 5,3 grados Celsius con una tendencia a disminuir en el transcurso del año hasta llegar a diciembre, mientras que la temperatura máxima promedio anual fue de 24,6 grados Celsius, manteniendo una tendencia a la estabilidad durante todo el año en las temperaturas máximas.

En el 2017 la temperatura promedio anual registrada por los termómetros de la estación meteorológica ESPOCH fue de 13,3 grados Celsius, la temperatura mínima promedio anual fue de 4,6 grados Celsius con una ligera tendencia a la baja, mientras que la temperatura máxima promedio anual fue de 24,2 grados Celsius con una ligera tendencia al ascenso en el transcurso del año hasta llegar a diciembre.

En base al análisis del conjunto de datos mensuales máximos, medios y mínimos de los años 2015, 2016 y 2017; se evidencia que a partir del mes de julio a diciembre, existe una tendencia a un incremento de la temperatura ambiente, pero también se presentan las temperaturas más bajas durante estos meses. Desde el mes de enero hasta julio se mantiene una ligera estabilidad en las temperaturas, pero denota una tendencia a la baja en las mismas. En el siguiente gráfico se puede apreciar la tendencia de las temperaturas de los años 2015, 2016 y 2017 en Riobamba.

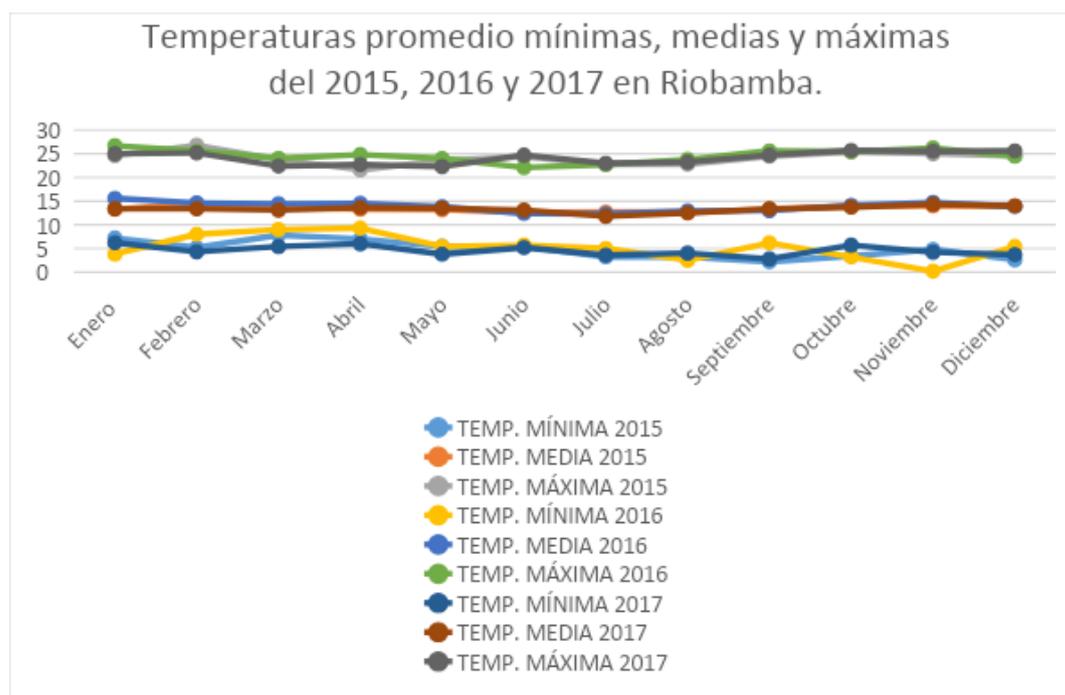


Figura 9. Análisis de temperaturas mínimas, medias y máximas del 2015, 2016 y 2017 en Riobamba de la estación meteorológica ESPOCH

Fuente: estación meteorológica ESPOCH.

2. Análisis imágenes satelitales del 2015

Una vez realizado cálculo de temperatura de brillo de la imagen satelital del 02 de noviembre del 2015, se obtiene que la temperatura de la zona de muestreo urbano fue de -28.4 grados Celsius y la temperatura de la zona de muestreo rural fue de -29.0 grados Celsius. través de la observación del de temperaturas de brillo se puede una concentración de I en la zona noroeste y de la ciudad. Es importante mencionar que, debido a la calibración del sensor, puede presentarse variaciones considerables en los datos obtenidos, como en este caso arroja valores negativos, por lo que no se toma como un valor real de medición, pero sí como referencia para la comparación e identificación de la intensidad del fenómeno ICU.

Según los datos meteorológicos observados en la estación meteorológica ESPOCH, el 02 de noviembre del 2015 la máxima temperatura observada fue de 23.4 grados Celsius, contrastando con las temperaturas obtenidas a través del análisis de imágenes satelitales en la zona de la estación meteorológica, se registra -25.1 grados Celsius, de esta manera, omitiendo el valor negativo del resultado de imágenes

satelitales se observa que los datos térmicos de las imágenes se encuentran con 1.7 grados Celsius por encima de las temperaturas observadas por los termómetros de la estación meteorológica ESPOCH.

Con datos se puede determinar el cálculo que la intensidad del fenómeno ICU el 02 de noviembre del 2015 fue de 1.7 grados Celsius; es decir que el área urbana de la ciudad de Riobamba para esta fecha en particular fue 1,7 grados superior a la temperatura rural observada, S

Es pertinente mencionar que, al observar la Figura de temperaturas de brillo se aprecia concentraciones de calor fuera de los límites urbanos, en el norte de la ciudad, a través de la observación de imágenes aéreas disponibles en la plataforma Google Earth, que en el sector norte de la ciudad predominan suelos descubiertos, que corresponden a una litología de un conglomerado volcánico de cantos angulares, redondean de andesita en matriz de grano fino, con bancos interestratificados de ceniza, es decir facies o depósitos sedimentarios de lahares volcánicos, con un <3.0 % de materia orgánica y de un alto porcentaje de acidez >6.5 - 7.5 de pH (Instituto Espacial Ecuatoriano 2019). Lo provoca la concentración de altas temperaturas en e sector,.

Contrastando la información del catastro minero en el sector se puede apreciar una correlación con la presencia de actividades mineras y el incremento en las temperaturas ambientes.

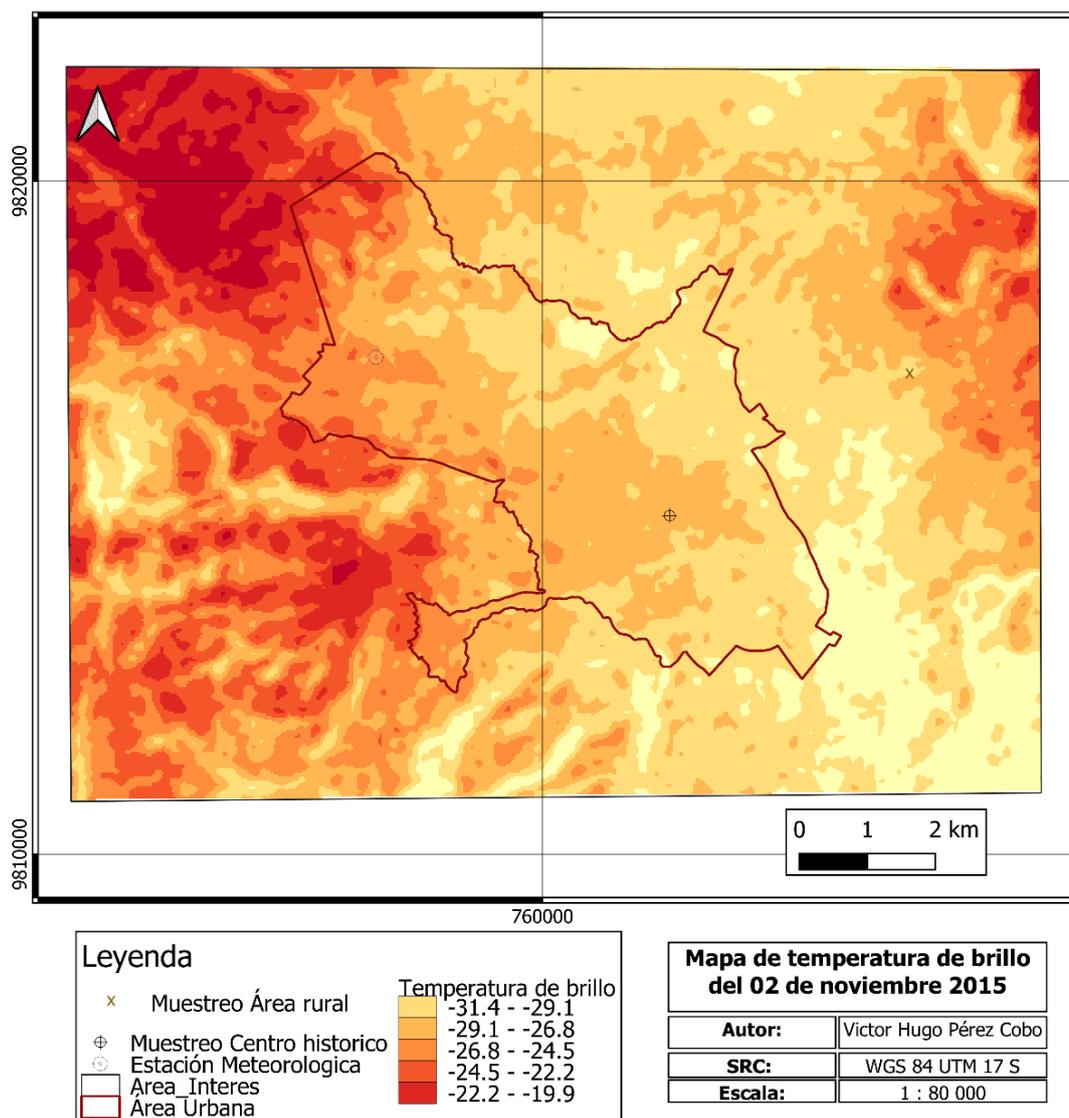


Figura 10. Mapa de temperatura de brillo del 2015

Según la información geográfica del shapefile del catastro minero de la Agencia de Regulación y Control Minero (ARCOM), en el área de estudio se ubican 17 concesiones mineras, 11 de extracción de arena, 4 de áridos y pétreos, 1 de feldespato y 1 de puzolana, siendo 161 hectáreas en concesión minera, del área de estudio, es decir 1,03 % del área de estudio se encuentra concesionado a la actividad minera que en su mayoría extrae material de áridos y pétreos (ARCOM 2021).

También existen 23 zonas de minería artesanal, en las cuales 22 son de arena y 1 de áridos y pétreos. Sumando todas estas áreas de minería artesanal, se contabilizan 69 hectáreas (ARCOM 2021).

Existen 18 hectáreas distribuidas en 6 zonas con minería de áridos y pétreos, clasificadas como de libre aprovechamiento.

Es decir, el 1,60% del área de estudio está destinada a actividades mineras como se puede apreciar en siguiente a.

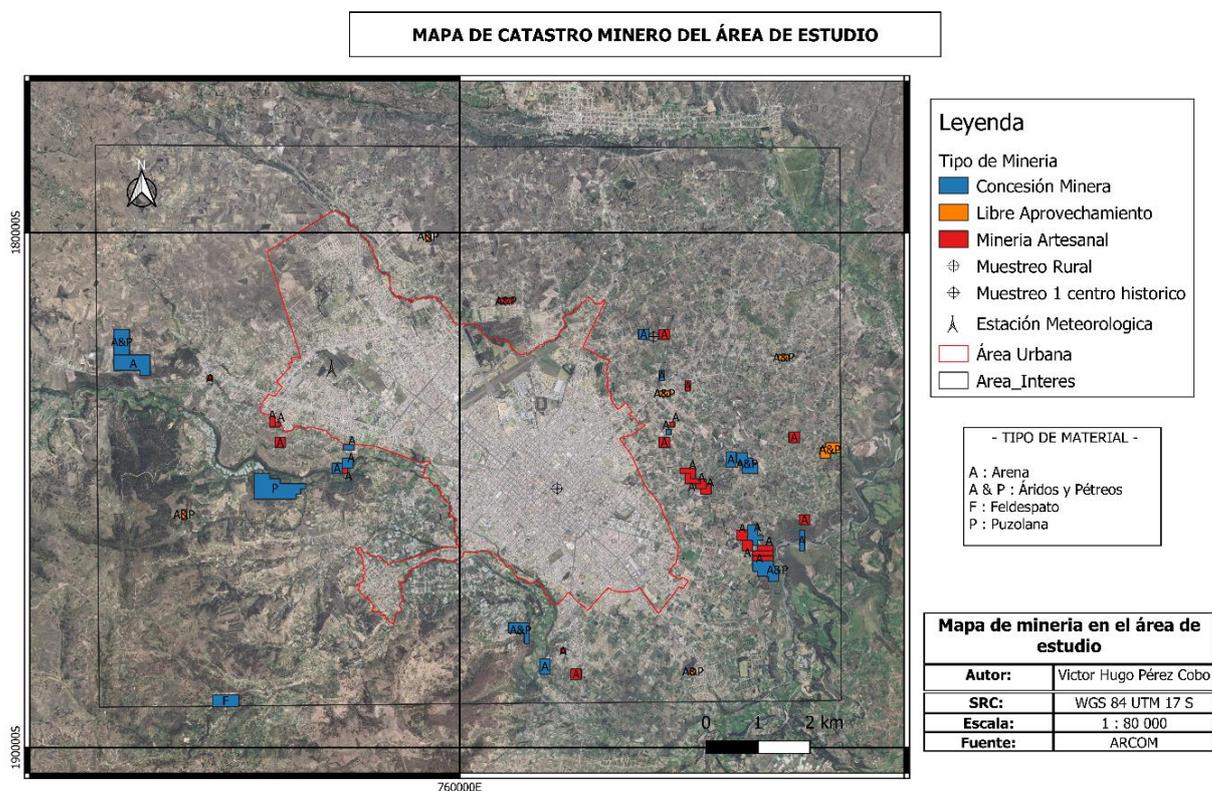


Figura 11. Mapa catastro minero en el área de estudio

A partir del análisis del Índice de Vegetación Normalizado (NDVI), se aprecia una correlación directa entre la presencia de vegetación vigorosa y temperaturas bajas observadas en el de temperatura de brillo; de la misma forma, en ausencia de vegetación, la presencia de altas temperaturas, lo que confirma que la vegetación la temperatura ambiente. En la zona de estudio no existe presencia de vegetación, la mayoría de las superficies se encuentran descubiertas y con suelos áridos.

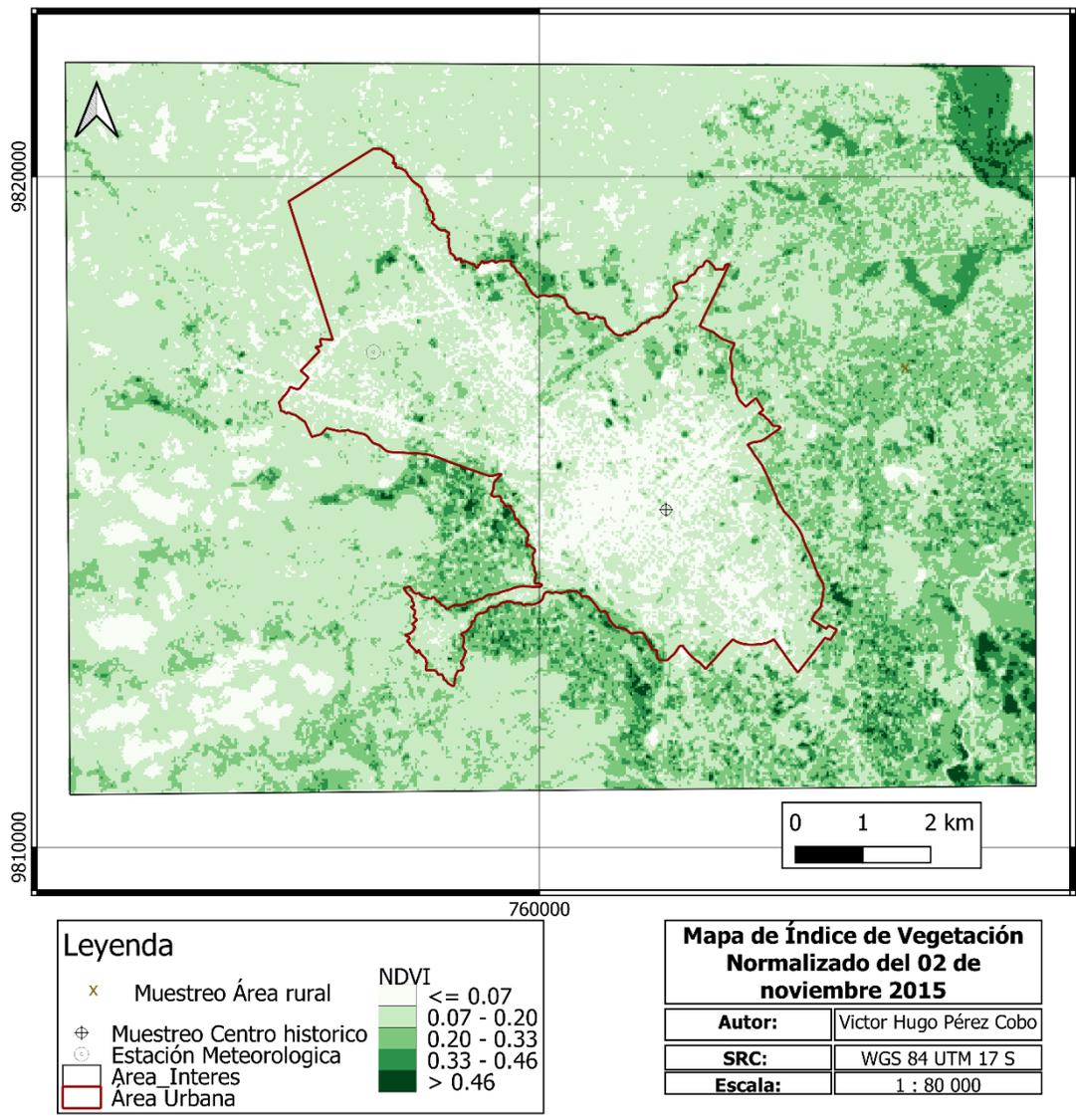


Figura 12. Mapa Índice de Vegetación Normalizado NDVI del 2015

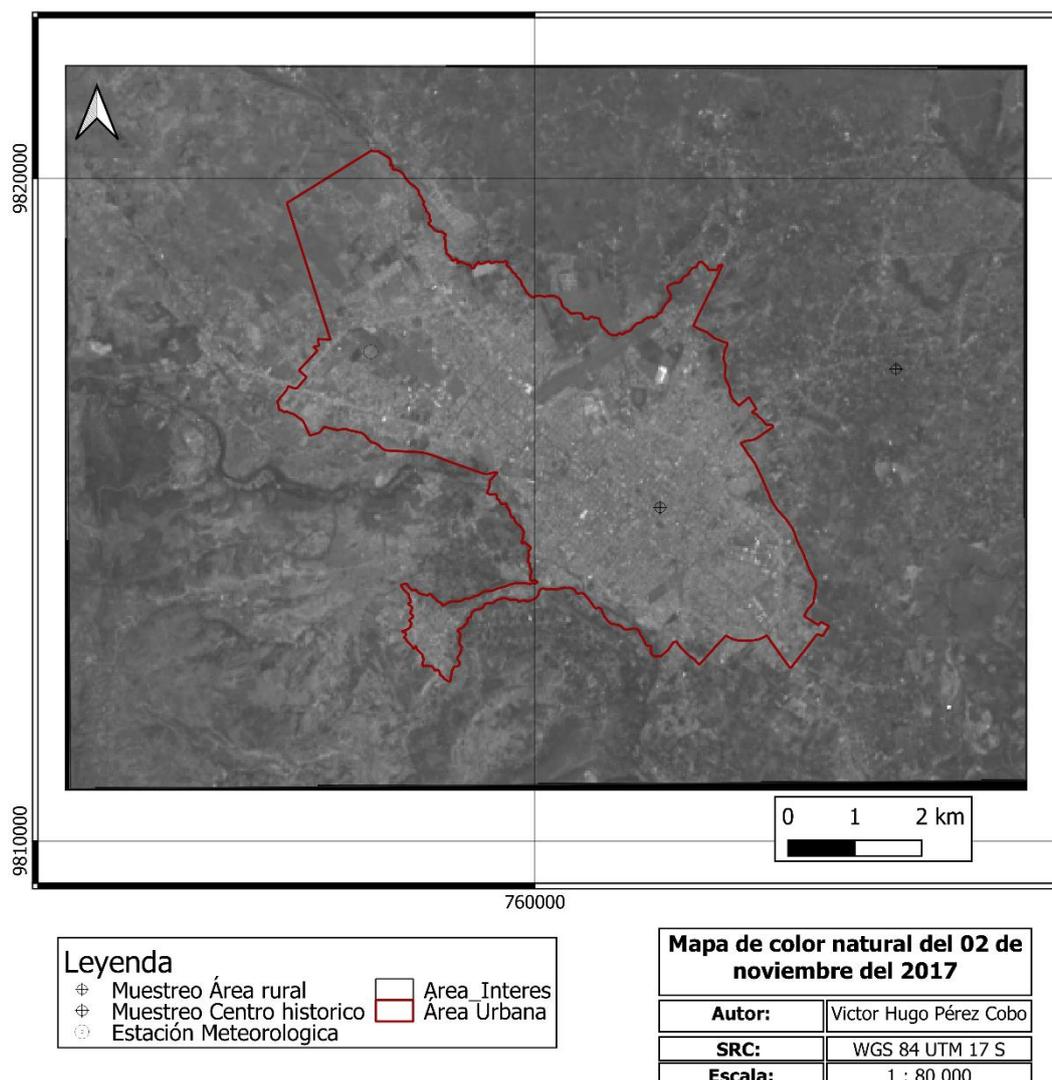


Figura 13. Mapa en color natural del 2015

3. Análisis de imágenes satelitales del 2016

Analizando los resultados obtenidos del procesamiento y cálculo de temperatura de brillo de la imagen satelital del 20 de noviembre del 2016, se observa que en la zona de muestreo rural se obtuvo una temperatura de $-1.9\text{ }^{\circ}\text{C}$, mientras que para la zona de muestreo urbana la temperatura que arroja el cálculo de temperatura de brillo fue de $-0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$, de tal manera que existe una diferencia entre temperaturas urbanas y rurales de $1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$, siendo la zona urbana más caliente que la zona rural. Y encontrándonos con una intensidad de $1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ del fenómeno ICU.

En el mapa de temperatura de brillo se identifica la presencia de islas en las zonas rurales de las estribaciones norte, y una pequeña isla en la estribación occidental esta isla en el sector occidental con la ubicación de concesiones mineras grandes. Contrastando con la imagen aérea en color natural, disponible en la plataforma Google Earth, de noviembre del 2016, se observa que en las zonas rurales donde predominan altas temperaturas ausencia de vegetación y se identifican suelos desnudos, también se observan procesos de urbanización reconocibles por el trazado de caminos en forma de cuadrículas.

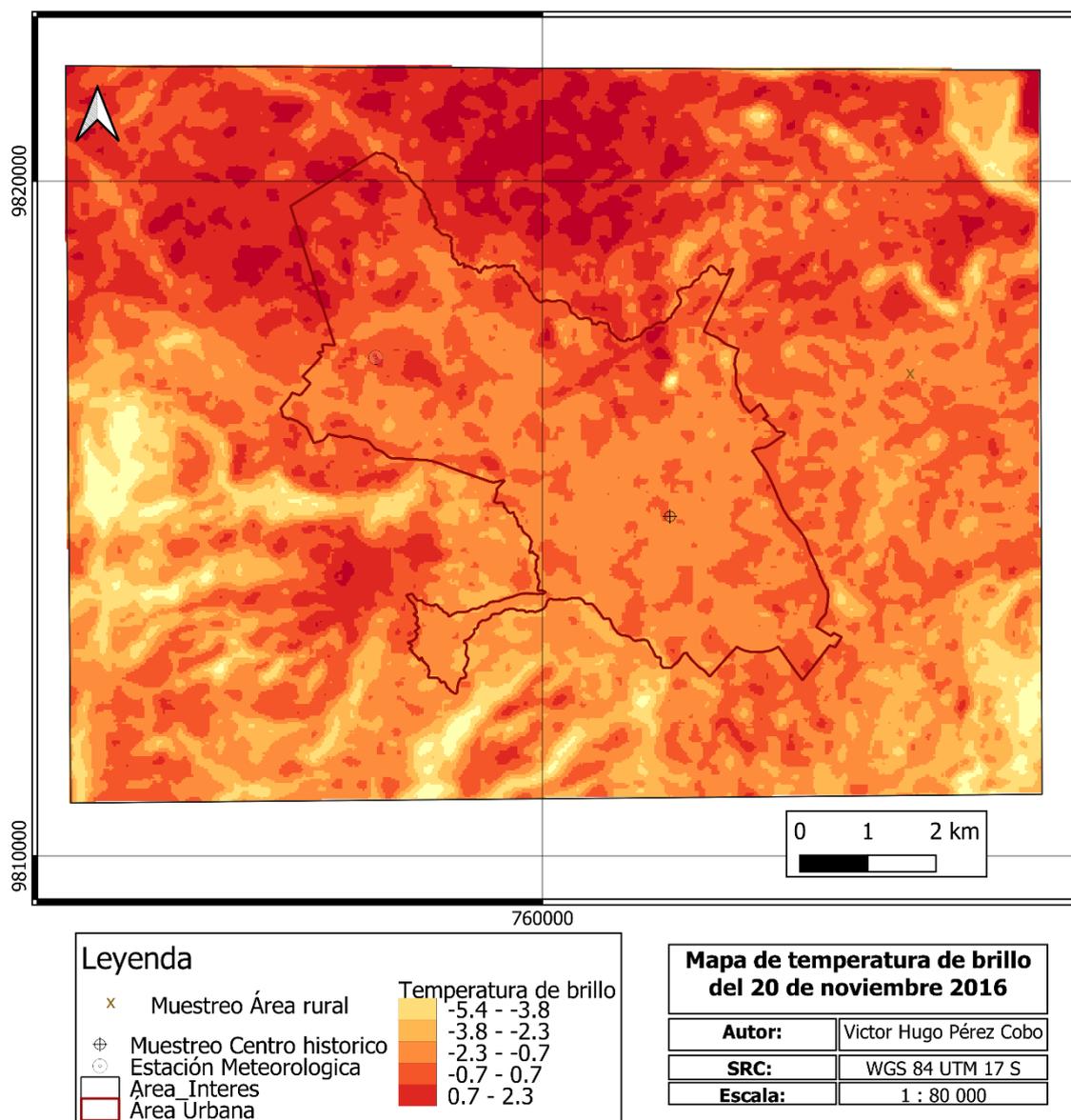


Figura 14. Mapa de temperatura de brillo del 2016

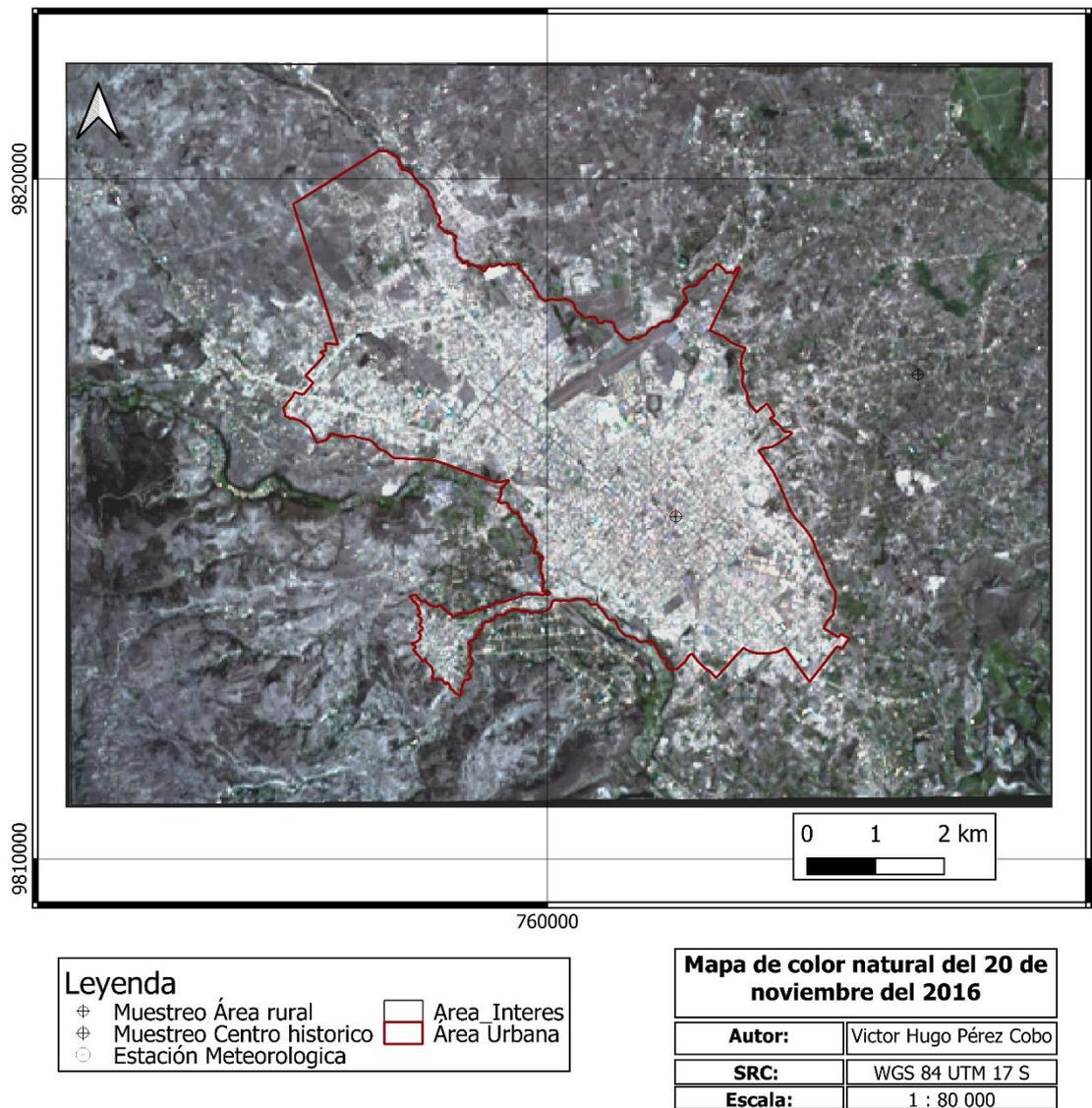


Figura 15. Mapa en color natural del 2016

Mediante un análisis del Índice de Vegetación Normalizado (NDVI) se puede apreciar una correlación entre la presencia de altas temperaturas de brillo con la ausencia de vegetación vigorosa y en los lugares donde existe mayor presencia de vegetación las temperaturas de brillo son menores.

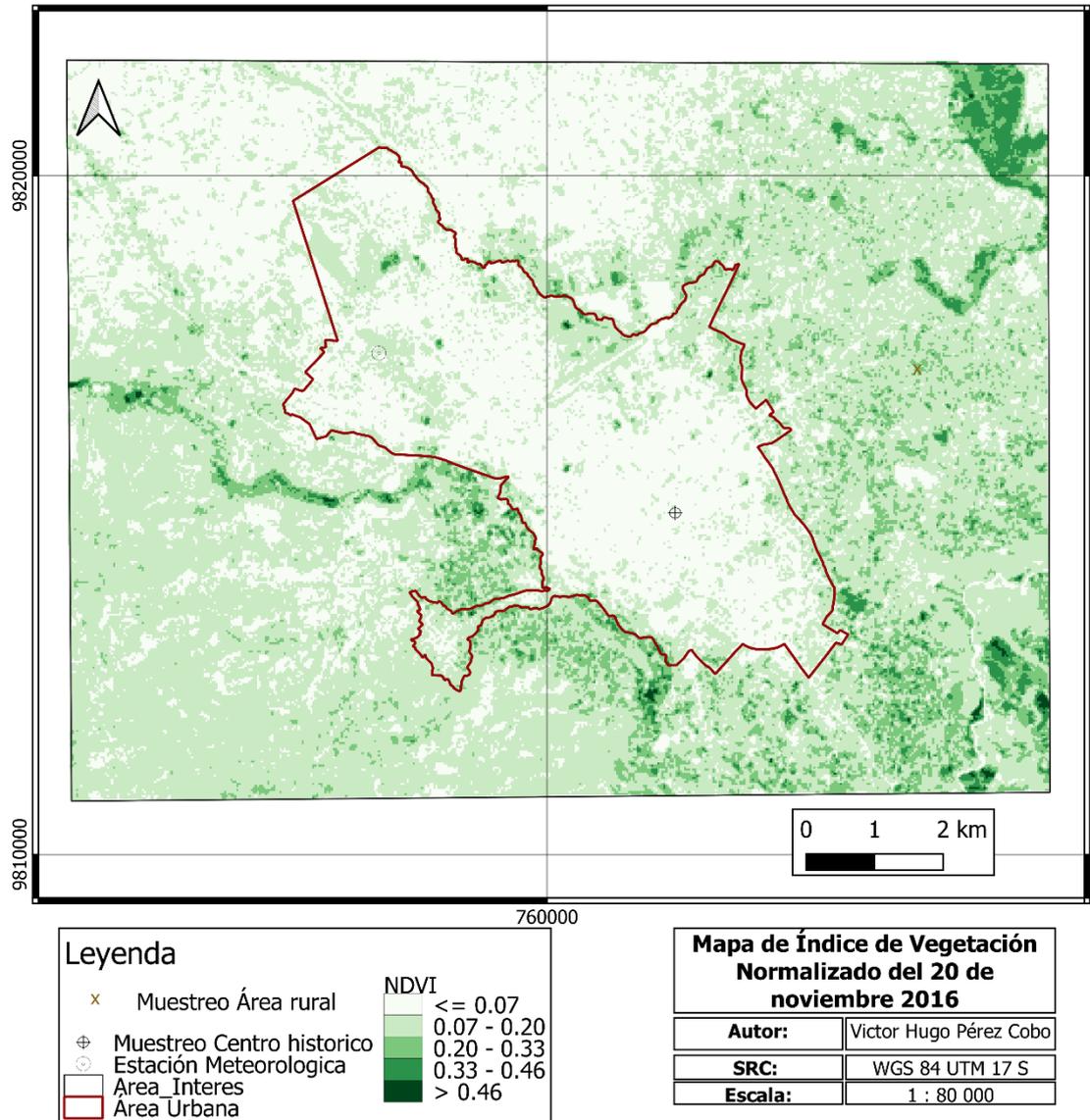


Figura 16. Mapa del Índice de Vegetación Normalizado NDVI del 2016

4. Análisis imágenes satelitales del 2017

Según el procesamiento y cálculo de temperatura de brillo de la imagen satelital del 20 de septiembre de 2017, se observa que la temperatura en la zona de muestreo urbana fue de -2,7 grados Celsius, mientras que en la zona de muestreo rural, la temperatura de brillo observada fue de -3,1 grados Celsius, teniendo una diferencia de 0,4 grados Celsius entre sí.

Se puede apreciar la concentración de altas temperaturas en la zona norte de la ciudad, sitio donde predominan los suelos descubiertos y procesos de urbanización, factores determinantes en la concentración de altas temperaturas.

La estación meteorológica ESPOCH para el 20 de septiembre del 2017 obtuvo una observación de 23,5 grados Celsius de temperatura máxima registrada.

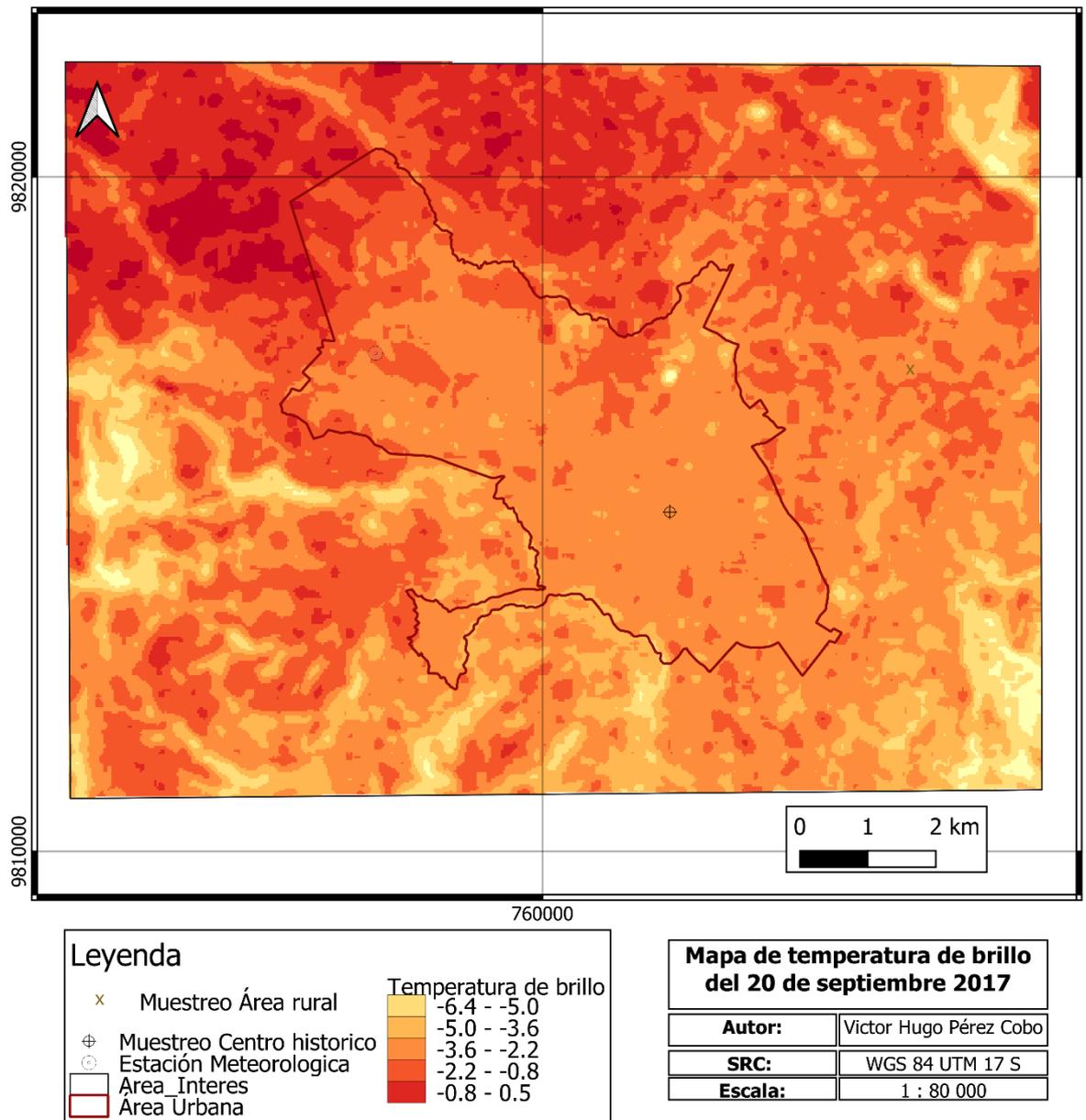


Figura 17. Mapa de temperatura de brillo del 2017

Del análisis NDVI, se aprecia correlación los análisis de los años 2015 y 2016, donde predominan temperaturas bajas en áreas con vegetación más abundante y vigorosa.

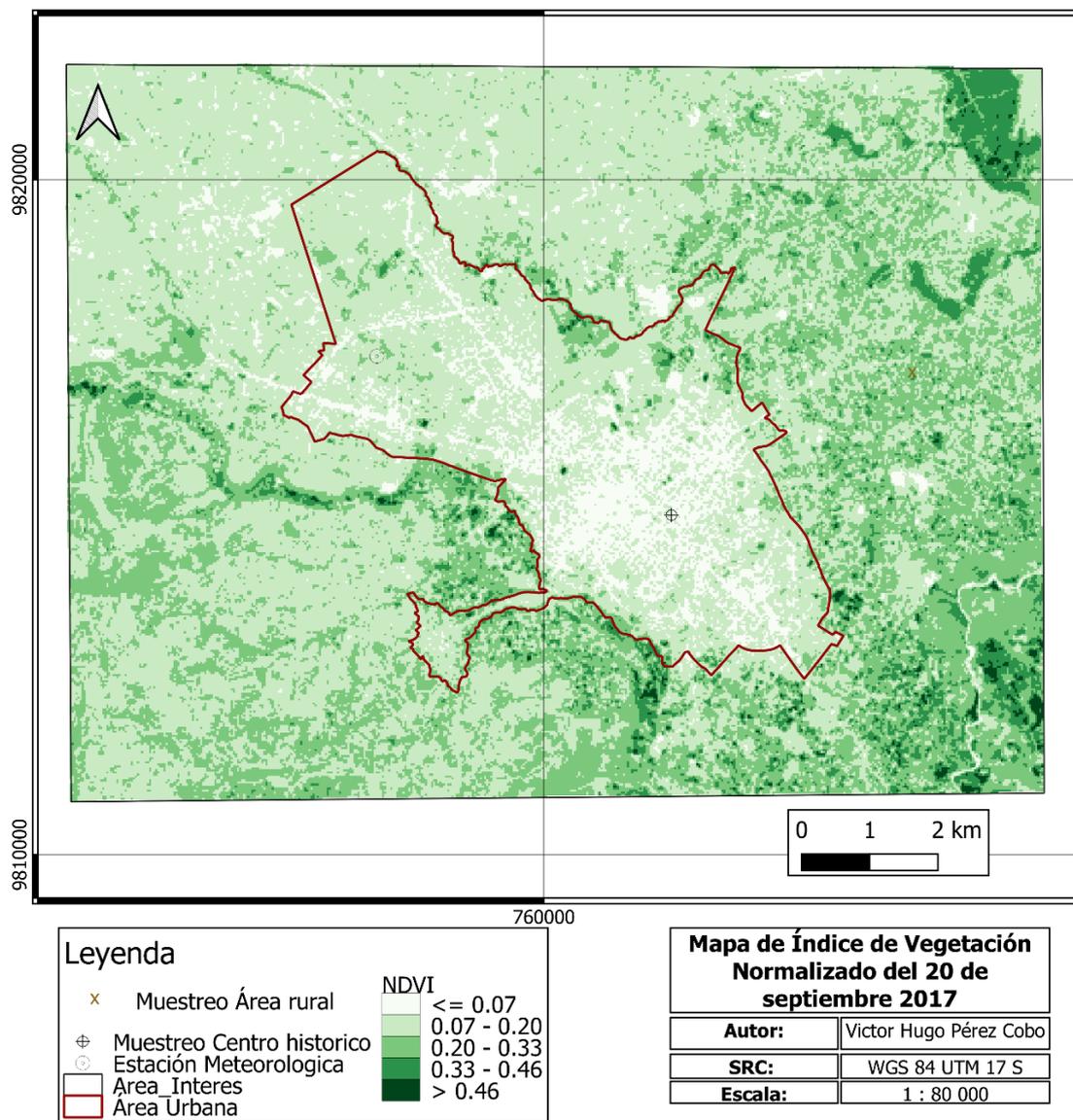


Figura 18. Mapa Índice de Vegetación Normalizado NDVI del 2017

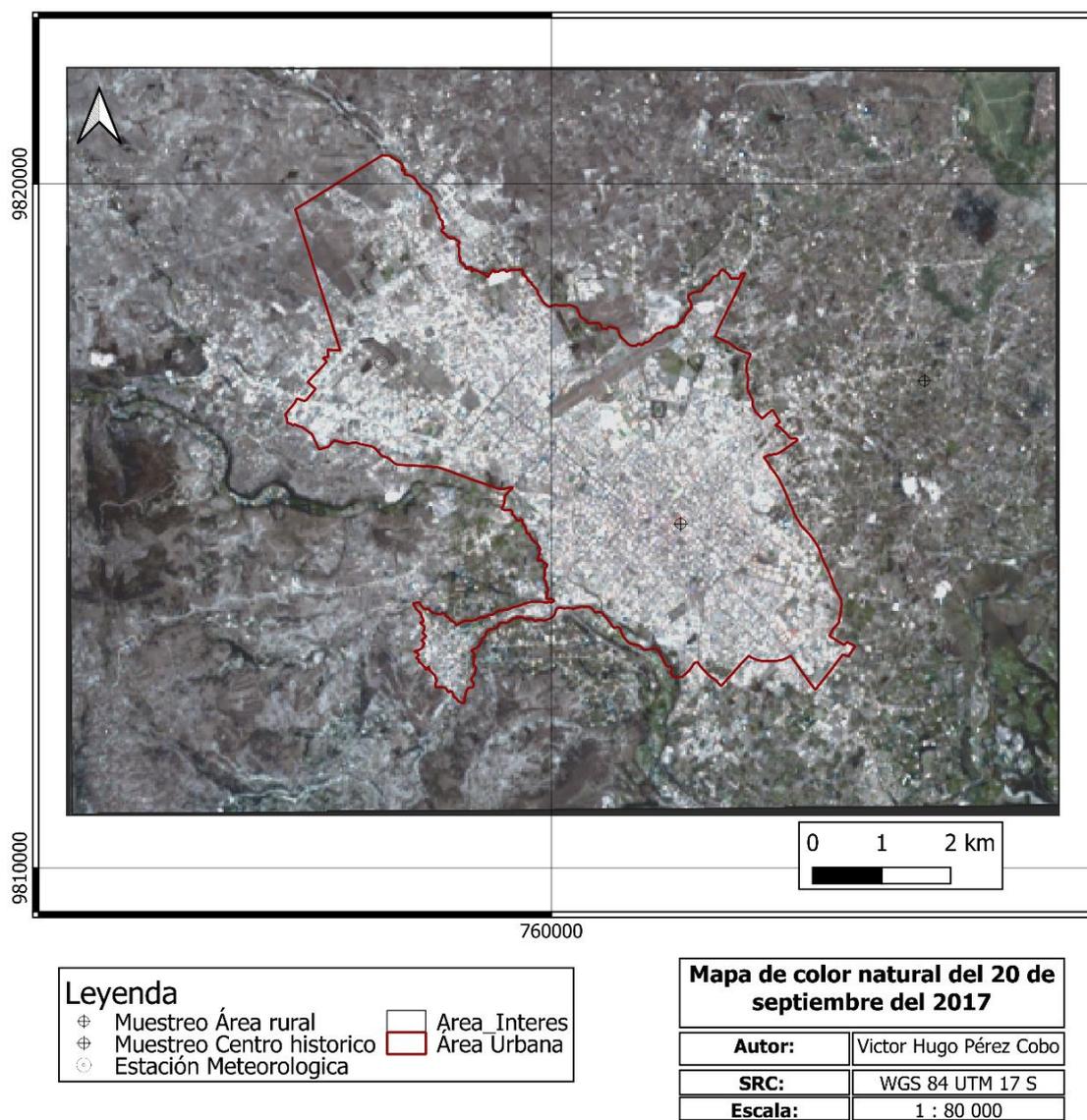


Figura 19. Mapa en color natural del 2017

5. Análisis de muestreo manual con termohigrómetro

Se registraron 8 puntos de muestreo de temperatura ambiente en las afueras de los límites urbanos de la ciudad, y 6 puntos de muestreo de temperatura ambiente dentro de los límites urbanos.

El tiempo de recorrido por los 14 puntos de muestreo tomó aproximadamente 4:30 horas, no existió un orden de visita a los puntos, al contrario, se visitaron aleatoriamente según la ruta óptima para reducir el tiempo de todo el muestreo.

En los sitios de muestreo donde existía incidencia de luz solar se procuró dar sombra al sensor, a fin de que no interfiera la radiación solar en el registro de

temperatura ambiente. Los resultados obtenidos se pueden observar en la siguiente tabla.

Tabla 6.
Temperaturas de registro manual con termohigrómetro

REGISTRO DE TEMPERATURAS CON TERMOHIGOMETRO MANUAL				
FECHA: 20 Julio 2023				
PUNTO	HORA	TEMPERATURA °C	% HUMEDAD RELATIVA	PAISAJE
1	11:49	20,3	49,8	Agrícola, presencia de invernaderos
2	12:23	21,9	47,9	Residencial rural no consolidado
3	11:01	25,9	38,3	Comercial, actividades recreativas
4	8:59	17		Residencial urbano consolidado
5	11:25	22,6	43,8	Agrícola, presencia de invernaderos
6	10:06	14,4	65,1	Residencial rural no consolidado
7	12:52	17	62,5	Agrícola
8	13:12	19,4	53,3	Residencial rural, minería
9	9:42	16,9	57,1	Residencial rural, escasa actividad agrícola
10	9:18	15,2	64,8	Agrícola
11	12:39	20,3	49,6	Residencial urbano consolidado
12	12:09	18,5	54,4	Residencial urbano consolidado
13	10:40	21,1	47,6	Residencial urbano consolidado
14	10:29	18	54,4	Residencial urbano consolidado

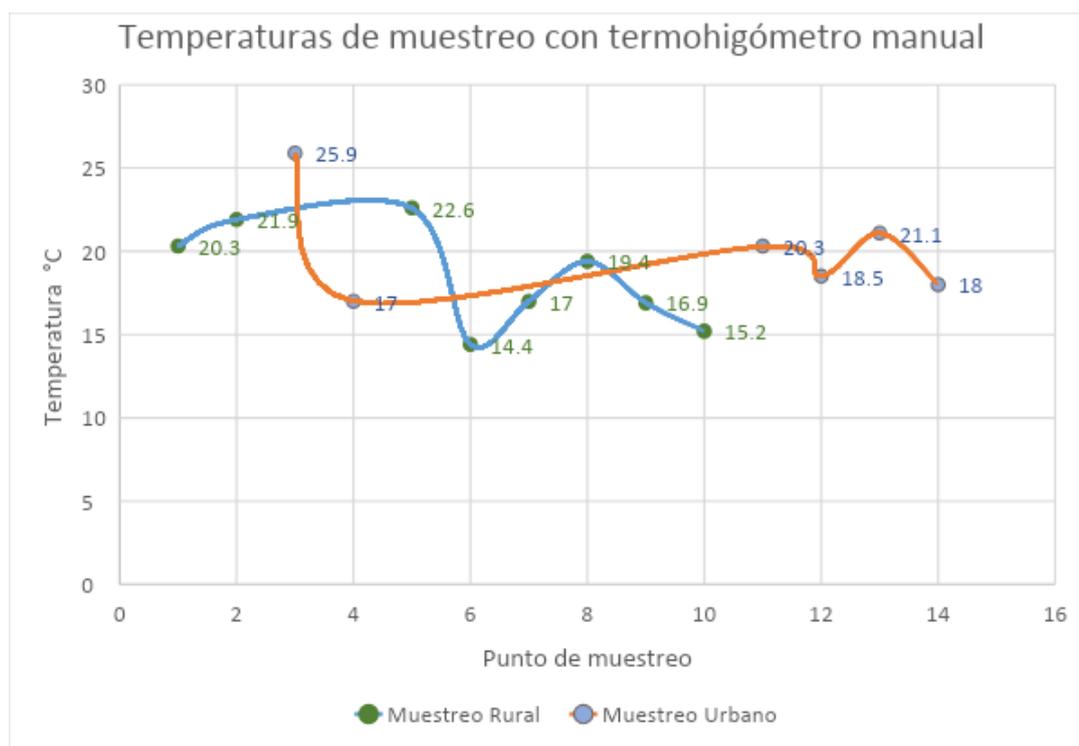


Figura 20. Temperaturas rurales y urbanas registradas manualmente

El promedio de las temperaturas rurales registradas fue de 18.5 °C, mientras que la temperatura promedio de las temperaturas registradas en el área urbana fue de 19.4 °C, existiendo una diferencia entre temperaturas urbanas y rurales de 1.1 °C. Determinando de esta manera la existencia de una intensidad de 1.1 °C de fenómeno Isla de Calor Urbana.

Tabla 7.
Mínima, media y máxima temperatura urbana y rural registrada

	Temperaturas Rurales	Temperaturas Urbanas
Mínima	14.4	17
Media	18.5	19.4
Máxima	22.6	25.9

En cuanto a los registros de humedad relativa ambiental se observa una correlación entre las zonas rurales con más presencia vegetal en su entorno y un porcentaje de humedad relativa más alto. Existen casos particulares en los sitios de muestreo rurales donde la presencia de actividades agrícolas e invernaderos arrojan un registro de porcentaje de humedad relativa del ambiente menor a los registros rurales

sin invernaderos, sin embargo, en sitios de muestreo rural con actividades agrícolas el porcentaje de humedad relativa es superior a sitios con pocas residencias rurales, invernaderos y etc. De igual manera, sitios de muestreo rural donde predominan más residencias también se reduce el porcentaje de humedad relativa ambiente registrado. L

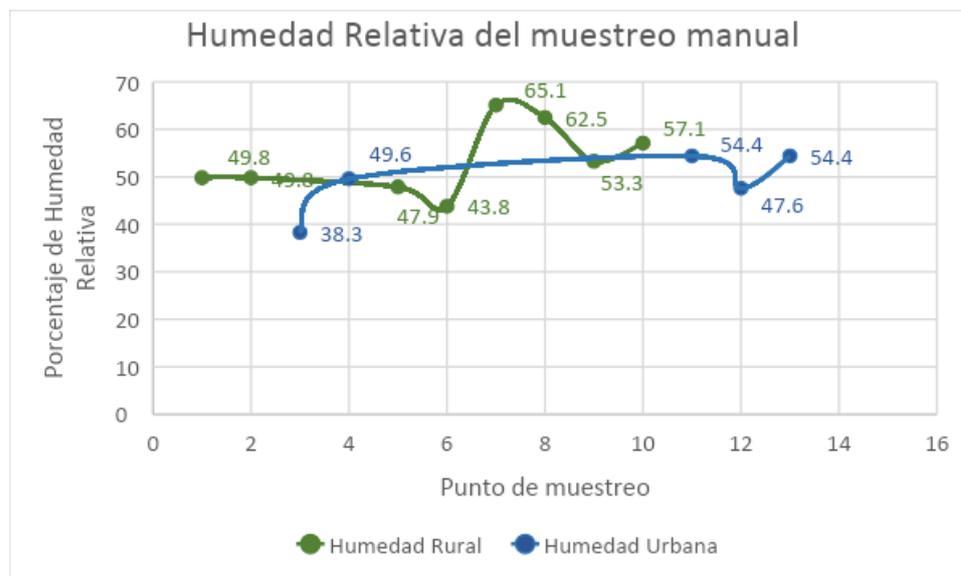


Figura 21. Registros de porcentaje de humedad relativa del muestreo manual

Tabla 8.

Mínima, media y máxima de porcentaje de humedad relativa ambiente urbana y rural registrada

	Humedad Relativa Rural	Humedad Relativa Urbana
Mínima	43,8	38,3
Media	55,5	48,9
Máxima	65,1	54,4

En el de calor de las temperaturas ambiente registradas con termohigrómetro manual el 20 de julio de 2023, se observa la concentración del fenómeno ICU en la zona centro de Riobamba, que abarca un diámetro de 1.8 km, esta se emplaza entre la calle Uruguay al norte y la calle Morona al Sur y entre la calle Luis Cordobés al este y la calle Colombia al Oeste. Así también se observa una concentración de calor en la parte norte de la ciudad, en intersección de las calles Canónigo Ramos y Av. 11 de noviembre; a pesar de ser una concentración de menor intensidad, resalta la presencia de la misma

dentro del área urbana. Ambas islas de concentración de temperatura se relacionan a los sitios donde se desarrollan actividades comerciales, y existe una gran afluencia de tráfico vehicular y peatonal. Como se puede apreciar en el siguiente :

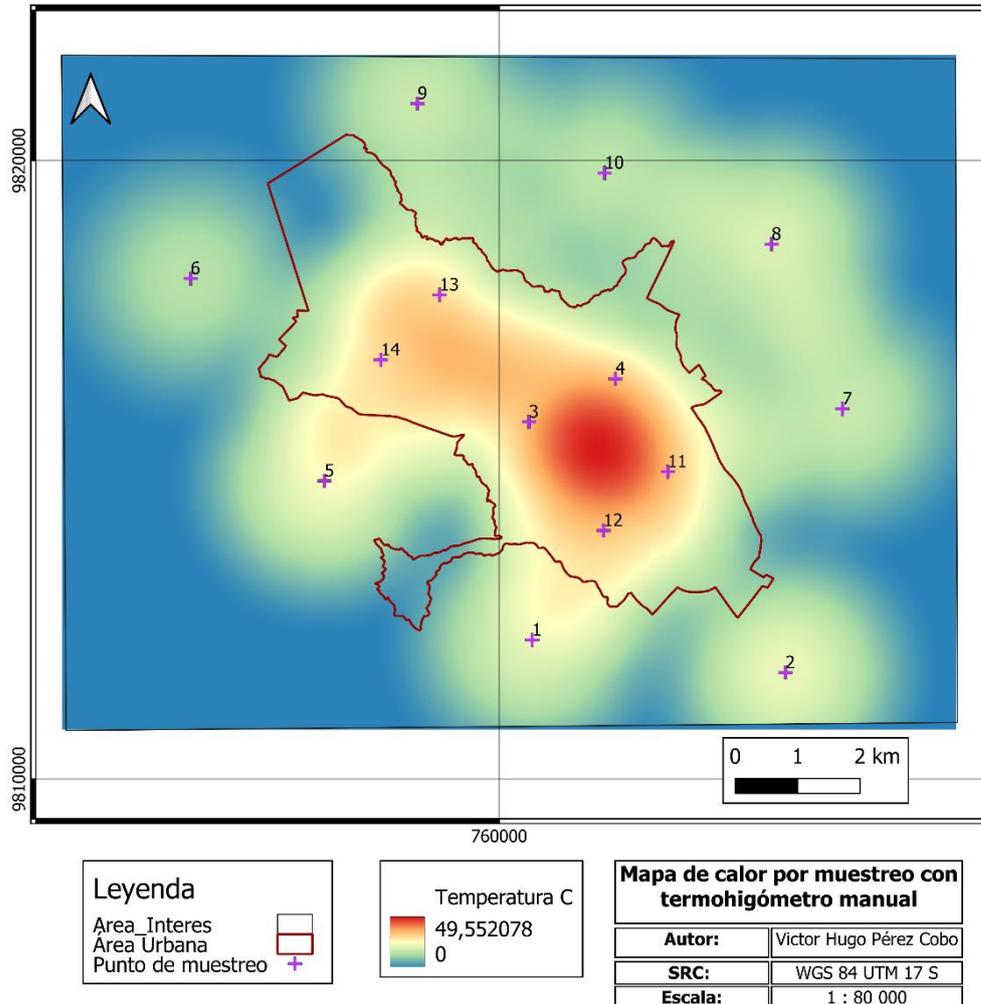


Figura 22. Mapa de calor de las temperaturas registradas con termohigrómetro manual

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

En Ecuador, el desarrollo de investigaciones en el campo de la meteorología enfrenta dificultades, debido a que el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), encargado de gestionar y administrar datos meteorológicos en el país, obtiene ingresos económicos al cobrar por proporcionar información meteorológica para fines de investigación.

Los datos obtenidos de la estación meteorológica ESPOCH fueron tomados en cuenta como un antecedente, permitiendo elaborar un esquema de las temperaturas que se registran y presentan en la ciudad de Riobamba.

De estos datos, se interpreta que desde el mes de julio a diciembre existe una tendencia al incremento de temperatura ambiente, pero también se presentan las temperaturas más bajas durante estos meses. Desde el mes de enero hasta julio se mantiene una ligera estabilidad en las temperaturas, pero denota una tendencia a la baja de temperaturas.

Se puede apreciar que, la tendencia a presentar temperaturas extremas, tanto frías como calientes, en la misma temporada, se debe al balance en la atmósfera, producto de la cantidad de nubosidad presente en la temporada; cuando el cielo está despejado de nubes, la radiación incidente en la superficie terrestre es reflejada y liberada al espacio con mayor facilidad en comparación a si existiera presencia de nubes que generen un efecto invernadero, enfriando de esta manera, la temperatura ambiente en la superficie terrestre (Álvarez et al. 2013).

Tomando en cuenta que, e de temperatura a partir de imágenes satelitales, puede verse alterado en intensidad y distribución, esto sucede por diversos factores atmosféricos: presencia de nubes, topografía, inclinación solar, vapor de agua, gases propios de la atmósfera y material particulado suspendido; todos estos materiales provocan refracción, tanto de la radiación que ingresa a la superficie terrestre, como también de la radiación que es reflejada desde la superficie hacia el sensor; así también, la inclinación de la radiación solar que ingresa en el objetivo dificulta la captura real de datos electromagnéticos en el sensor (Gutierrez y Muñoz 2006). En el 2007, Kuenzer y

Zhang identificaron mediante mediciones in-situ las variaciones de temperatura que tiene una duna de arena en sus 4 puntos cardinales, demostrándose que la incidencia del sol determina una variación en la temperatura que registra el sensor (Kuenzer y Zhang 2007).

Se reconoce que la ciudad de Riobamba, al estar situada en el callejón interandino y en la misma latitud que el volcán Tungurahua y Sangay, sumando a la presencia de vientos alisos que se trasladan de este a oeste, tiene ceniza suspendida en la atmósfera, producto de la actividad volcánica del Tungurahua. Como consecuencia, los resultados de los cálculos de radiancia y temperatura de brillo de la ciudad de Riobamba se ven alterados, arrojando cifras diferentes a las temperaturas registradas en la estación meteorológica ESPOCH (IG-EPN 2015). Adicionalmente en la literatura revisada se ha identificado errores en el cálculo de temperaturas con imágenes landsat, esto debido a la presencia de nubes y sombras que provocan las nubes y obstruyen la transferencia de información entre el sensor y la superficie (Cook et al. 2014).

Otro factor importante al momento de trabajar con imágenes satelitales, es el de la calibración que ha recibido el sensor, puesto que en ocasiones, existe una descompensación que pueden provocar oscilaciones aleatorias de altitud, orientación en los ejes del enfoque del sensor y la velocidad a la que se traslada el satélite, así también la descalibración de uno de sus detectores y por consecuencia, los efectos producidos por la rotación terrestre, alteran de forma negativa en la recepción de datos en el satélite (U.S. Geological Survey 2019).

El análisis obtenido a partir de imágenes satelitales sobre la temperatura de superficie radiante, también conocido como temperatura de brillo, nos permitió aproximarnos a una interpretación de la presencia del fenómeno ICU y de las temperaturas en la ciudad de Riobamba y sus alrededores. Se evidenció la presencia de una Isla de Calor Urbana en la ciudad; sin embargo, la composición del suelo en las áreas rurales norte, demuestra la existencia de una isla de calor rural.

Cabe mencionar que, el tipo de suelo conglomerado de lahares volcánicos con muy poca presencia de materia orgánica dificulta el crecimiento vegetativo, reduciendo de esta forma, el porcentaje de humedad relativa ambiente que refresca el entorno, este suelo genera absorción de radiación solar, provocando con estos dos factores, la concentración de altas temperaturas en las zonas de la ciudad de Riobamba, que es en donde se evidencia la presencia de una Isla de Calor.

A través del muestreo de temperatura ambiente con un termohigrómetro manual, se evidencia la presencia de una Isla de Calor Urbana en la ciudad de Riobamba; esta se extiende en el centro norte de la ciudad, donde siguen predominando las actividades económicas, financieras y comerciales, además sumando la gran afluencia de tráfico vehicular. Tanto en el método de análisis de imágenes satelitales y el de muestreo con termohigrómetro manual en campo, se evidencia la presencia del fenómeno isla de calor urbana en la ciudad de Riobamba.

Según los análisis realizados a los resultados de imágenes satelitales y muestreo con termohigrómetro manual en campo se concluye que la intensidad del fenómeno isla de calor urbana en la ciudad de Riobamba es de aproximadamente 1.1 °C.

Por un lado, la intensidad del fenómeno ICU en Riobamba es relativamente baja, en comparación a las intensidades de ICU en otras ciudades que la literatura revisada evidencia, las razones para que la intensidad no sea tan fuerte es por la presencia de vientos que provocan se refrigere el ambiente, de igual manera, la abundante presencia de nubosidad evita el ingreso de radiación solar. La altitud a la que se emplaza la ciudad, 2754 msnm hace que las temperaturas ambientes se encuentren por debajo de los 15 °C, facilitando de esta manera el pronto descenso de temperatura.

Recomendaciones

Para mitigar que el fenómeno ICU se incremente en el transcurso del tiempo, se sugiere una reforestación de las áreas urbanas, de esta manera la humedad relativa del ambiente se incrementará, por consiguiente, la concentración de altas temperaturas en estas zonas urbanas reducirá. Otro beneficio de la presencia de vegetación, será la facilitación de la precipitación de partículas suspendidas, como las de ceniza volcánica, o aquellas por actividades mineras e industriales, que son características de la ciudad de Riobamba.

Otra recomendación va dirigida hacia las autoridades, quienes deberían tener un mayor control y monitoreo de las actividades mineras, reducirlas prevendría que el debilitamiento de las pendientes, de esta manera se evitaría el deslizamiento en masa, además, con el control de estas actividades se evita el aporte de material particulado suspendido a la atmósfera.

Se debe incentivar políticas públicas que permitan limitar los permisos de construcción y subdivisión de tierras en las zonas fuera de la zona urbana para limitar la expansión urbana descontrolada y desorganizada.

Las instituciones, institutos, ONGs y demás organismos que manejen y administren información del medio ambiente del territorio ecuatoriano deberían facilitar la información que ellos disponen de manera gratuita a fin de que la investigación científica pueda desarrollarse en el Ecuador.

Lista de referencias

- Aflaki, Ardalan; , Mahsan Mirnezhad, Amirhosein Ghaffarianhoseini, Ali Ghaffarianhoseini, Hossein Omrany, Wang, y Akbari, Zhi-Hua Hashem. 2016. "Urban Heat Island mitigation strategies: A state of the art review on Kuala Lumpur, Singapore and Hong Kong". *Cities* 62: 131-145. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cities.2016.09.003>
- Alvarez, Orlando, Montaña, Thuesman, Quentin, Emmanuelle, Maldonado Jorge y Solano, Juan. "La radiación solar global en la región sur del Ecuador. Reanálisis de la nubosidad diurna". Ponencia presentada en el primer congreso internacional y expo científica Investigación Sostenible, Energía Renovables y Eficiencia Energética, Quito, 29 noviembre. https://www.researchgate.net/publication/271195750_La_radiacion_solar_global_en_la_region_sur_del_Ecuador_Reanalisis_de_la_nubosidad_diurna
- Agencia de Regulación y Control Minero. 2021. "Catastro Minero". ARCOM, 29 de abril. https://hub.arcgis.com/datasets/1cea6ad34d8d46818e23cca1335d4fe1_2/explore?location=-1.682891%2C-78.665372%2C12.43
- Astudillo, Franklin Cepeda, y Ignacio Ramos Mancheno. *Riobamba: imagen y testimonio*. Riobamba: Gobierno Autonomo Descentralizado de Riobamba, 2018.
- Babaeian, Ebrahim, y Markus Tuller. 2022 "Proximal sensing of land surface temperature". *Earth Systems and Environmental Sciences*. 6(2): 600-609. doi: 10.1016/B978-0-12-822974-3.00129-4
- Quiroz Benitez, D. E. 2013 "Las ciudades y el cambio climático: el caso de la política climática de la ciudad de Mexico". *Estudios demograficos y urbanos*. 28(2): 343. <https://doi.org/10.24201/edu.v28i2.1432>
- Coello, Paola Andrea . 2019. "Estudio del Ordenamiento Territorial para una adecuada expansión urbana, ciudad de Riobamba, Ecuador". Tesis de Maestría. UNIGIS América Latina. https://americalatina.unigis.net/files/tesis/TESIS_COELLO1.pdf

- C+C ConsulCentro. *Plan de Desarrollo Urbano de Riobamba*. Informe definitivo Plan de Ordenamiento Territorial, Reconocimiento General del contexto. Cuenca: C+C ConsulCentro, 1992.
- Campos, Saúl y Imelda Alcalá-Sánchez. 2012. “La migración campo-ciudad, un grave problema social y educativo”. Primer congreso internacional de educación *Construyendo Inéditos viables*, Chihuahua. http://cie.uach.mx/cd/docs/area_07/a7p11.pdf
- Casaban, Amparo. 2017. “Comparación de las temperaturas de brillo en banda L proporcionadas por SMOS y Aquarius sobre distintas zonas de la tierra”. Tesis doctoral, Universidad de Valencia. <https://roderic.uv.es/bitstream/handle/10550/61078/TesisABCdef2.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. 2023. “Censo nacional, población y vivienda. 1990; 2001; 2010”. *Redatam*. 2023. <http://redatam.inec.gob.ec/cgi-bin/RpWebEngine.exe/PortalAction>
- Gobierno Autónomo Descentralizado de la Provincia de Chimborazo. 2015. “*Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la Provincia de Chimborazo*”. GADPCH, 16 de junio. <https://chimborazo.gob.ec/principal/wp-content/uploads/2022/06/PDOT.pdf>
- Cook, Monica, John R. Schott, John Mandel, y Nina Raqueno. 2014. “Development of an Operational Calibration Methodology for the Landsat Thermal Data Archive and Initial Testing of the Atmospheric Compensation Component of a Land Surface Temperature (LST) Product from the Archive”. *Remote Sensing*. 6 : 11244-11266. doi:10.3390/rs6111244
- Coronel, Rosario. 2015. *Poder local entre la Colonia y la República: Riobamba 1750-1812*. Quito: Universidad Andina Simón Bolívar / Corporación Editora Nacional.
- EC. 2008. *Constitución del Ecuador*. Registro Oficial 449, 20 de octubre.
- . 2019. *Código Orgánico de Organización Territorial, Autonomía y Descentralización*. Registro Oficial Suplemento 303, 19 de octubre.
- Engelberth Soto Estrada. 2017. “Estimación de la Isla de Calor Urbana en Medellín Colombia”. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 35 (2) 421-434. DOI: 10.20937/RICA.2019.35.02.13
- Gedzelman S. D., S. Austin, R. Cermak, N. Stefano, S. Patrigfe y S. Quesenberry. 2003. “Meso-scale aspects of the urban heat island around NYC”. *Theoretical and Applied Climatology*. 75: 29-42. DOI 10.1007/s00704-002-0724-2

- Gobierno Autonomo Descentralizado Municipal del cantón Riobamba. 2017. "Nuevo Código Urbano". GADMR, 20 de julio. <https://www.gadmriobamba.gob.ec/index.php/ordenamiento-territorial/nuevo-codigo-urbano>
- Gobierno Autonomo Descentralizado Municipal del cantón Riobamba. 2021. "Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial". GADMR, 19 de julio. <https://www.gadmriobamba.gob.ec/index.php/ordenamiento-territorial/plan-pdyot-2020-2030>
- García, Felipe. 1995. Manual de Climatología Aplicada; Clima Medio Ambiente y Planificación. Madrid: Síntesis.
- Green, Jared. 2011. "Urban Heat Islands Are Increasingly Dangerous, But Planners and Designers Have Solutions". Acceso el 05 de noviembre de 2021. https://dirt.asla.org/2021/05/11/urban-heat-islands-are-increasingly-dangerous-but-planners-and-designers-have-solutions/?utm_medium=website&utm_source=archdaily.cl
- Guitierrez, Carlos y Angel Muñoz. 2006. *Teledetección Nociones y Aplicaciones*. Salamanca: Universidad de Salamanca.
- Guillen Mena Vanesa y Diana Orellana Valdez. 2017. "Un acercamiento a caracterizar la Isla de Calor Urbana en Cuenca Ecuador". *Revista CIVITIC Flacso Ecuador*. 1 (1):71-84. <http://hdl.handle.net/10469/15805>
- Heaviside, Clare; Helen Macintyre, y Sotiris Vardoulakis. 2017. "The urban heat island: Implications for health in a changing environment". *Built Environment and Health*. 4: 269-305. DOI 10.1007/s40572-017-0150-3
- Howard, Luke. 1833. "The Climate of London". Londres: International Association for urban climate. https://urban-climate.org/documents/LukeHoward_Climate-of-London-V1.pdf
- Hung, Tran, Daisuke Uchihama, Shiro Ochi, y Yoshifumi Yasuoka. 2006. "Assessment with satellite data of the urban heat island effects in Asian mega cities". *International journal of applied earth observation and geoinformation* 8: 34-48. doi:10.1016/j.jag.2005.05.003
- Instituto Geofísico-Escuela Politécnica Nacional. 2018. "Informe Anual de la Emisión de SO₂ del Volcán Tungurahua", 23 de julio.

- <https://www.igepn.edu.ec/tungurahua-gases/tung-ga/21917-informe-anual-emision-de-so2-tungurahua-2018/file>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2023. Geografía y Medio Ambiente. Accedido 20 de febrero. <https://www.inegi.org.mx/temas/imagenes/imglandsat/>
- Instituto Espacial Ecuatoriano. 2019. “*Geopedología 1 : 25 000 - Información geoespacial de geopedología nivel nacional 1 : 25 000*”, 26 de julio. <https://www.gob.ec/iee/tramites/legalizacion-entrega-fisica-geoinformacion-sector-academia>
- IPCC. 2014. “Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático”. Accedido el 3 de marzo <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>
- Johnson, Daniel y Jeffrey S. Wilson. 2009. “The socio-spatial dynamics of extreme urban heat events: The case of heat-related deaths in Philadelphia”. *Applied Geography* 29: 419-434. doi:10.1016/j.apgeog.2008.11.004
- Klaufus, Christien. 2009. *Construir la ciudad andina: planificación y autoconstrucción en Riobamba y Cuenca*. Quito: Abya-Yala.
- Kuenzer, Claudia, y Jianzhong Zhang. 2007. “Thermal surface characteristics of coal fires 1: results of in-situ”. *Journal of Applied Geophysics*. 63 (3-4): 117–134. DOI: https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2007JAG....63..117Z/doi:10.1016/j.jappgeo.2007.08.002
- Lowe, Scott. 2016. “An energy and mortality impact assessment of the urban heat island in the US”. *Environmental Impact Assessment Review* 56: 139-144.
- Maldonado, Juan. 2009. “Ciudades y Contaminación Ambiental”. *Revista de Ingeniería* 30: 66-71.
- Margulis, Sergio. 2016. *Vulnerabilidad y adaptación de las ciudades de América Latina al Cambio Climático*. Santiago: CEPAL.
- OECD/European Commission. 2020. “*Cities in the World: A New Perspective on Urbanisation*”. OECD Urban Studies: 15-72. <https://doi.org/10.1787/d0efcbda-en>
- Oke, Timothy. 1978. *Boundary Layer Climates*. Londres: Routledge.

- Oke, Timothy . 1982. “The energetic basis of the urban heat island”. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 108 (455): 1 - 24.
<https://doi.org/10.1002/qj.49710845502>
- Oke, Timothy. 1995. “The heat island of the urban boundary layer: characteristics, causes and effects”. *Department of Geography University of British Columbia* 6 (2): 81-107. DOI:10.1007/978-94-017-3686-2_5
- ONU-HABITAT. 2020. “Estado Global de las Metrópolis 2020 – Folleto de Datos Poblacionales”. Nairobi: GPO
- Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos. 2011. *Cities and Climate Change: Global Report on Human Settlements 2011*. Londres:Earthscan.
- Reto, Robert. 2003. *Earth Observatory NASA*. Accedido 30 de febrero
<https://earthobservatory.nasa.gov/images/3714/european-heat-wave>
- Rodríguez, Elisabeth. 2010. “Reflexiones medioambientales de la expansión urbana”. *Cuadernos Geográficos* 46 (1): 293-313.
<https://revistaseug.ugr.es/index.php/cuadgeo/article/view/641/728>
- Department of the interior U-S-Geological Survey. 2021. Geological. ”*Landsat 8, Collection 2 (C2) Level 2 Science Product (L2SP) Guide*”. USGS, 25 de abril.
<https://www.usgs.gov/media/files/landsat-8-9-collection-2-level-2-science-product-guide>
- Sarricolea Espinoza Pablo, Javier Martin-Vide. 2014. “El estudio de la ICUs del área metropolitana de Santiago de Chile con imágenes Terra-Modis y análisis de componentes principales”. *Revista de Geografía Norte Grande*. 57 : 123-141.
<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022014000100009>.
- Svirejeva-Hopkins, Anastasia; Hans Schellnhuber, y Valeri Pomaz. 2004. “Urbanised territories as a specific component of the Global Carbon Cycle”. *Ecological Modelling*. 173: 295-312. doi:10.1016/j.ecolmodel.2003.09.022.
- Tertre, Alain Le; Agnés Lefranc, Daniel Declercq, Sylvia Medina, ; Myriam Blanchard, Benoit Chardon, Pascal Fabre, Laurent Filleul, Jean Francois Jusot, Laurence Pascal, Héléne Prouvost, Sylvie Cassadou, y Matine Ledrans. 2006. “Impact of the 2003 heatwave on all-cause mortality in 9 French cities”. *Epidemiology* 17(1). 75-79. DOI: 10.1097/01.ede.0000187650.36636.1f
- U.S. Environmental Protection Agency. 2008. ”*Reducing Urban Heat Islands:*

- Compendium of Strategies - Urban Heat Island Basics*". Accedido el 30 de marzo. <https://www.epa.gov/heat-islands/heat-island-compendium>
- U.S. Geological Survey. 2019. *Landsat 8 Data Users Handbook*. Sioux Falls, South Dakota: U.S. Geological Survey.
- USGS. 2023."Using USGS Landsat level 1 data product". USGS 17 de abril. <https://www.usgs.gov/landsat-missions/using-usgs-landsat-level-1-data-product>
- Vega, Javier; Pilar, Martín; Díaz, José; López, José; y Francisco Javier Muñoz Recio. 2010. *Guía didáctica de teledetección y medio ambiente*. Madrid: Red Nacional de Teledetección Ambiental.
- Verón, Eleonora. 2010. "Estimación de la Isla de Calor en Santa Teresita, partido de la costa, provincia de Buenos Aires, Argentina". *Revista Geográfica de América Central* 45 (2): 129-148. <https://www.redalyc.org/pdf/4517/451744669007.pdf>
- Voogt, James y Oke, Timothy. 2003. "Thermal remote sensing of urban climates". *Remote Sensing of Environment* 86: 370-384. doi:10.1016/S0034-4257(03)00079-8
- USAID. 2021. "PACE Project". Interactives. 18 de agosto. <https://www.prb.org/wp-content/uploads/2021/08/letter-booklet-2021-world-population.pdf>
- WMO. 2023. *Guidelines on the Definition and Characterization of Extreme Weather and Climate Events*. Geneva: World Meteorological Organization, 2023.

Anexos

Anexo 1: altura de 1,50 m desde la superficie al sensor.



Anexo 2: Muestreo del punto de muestreo número 4.

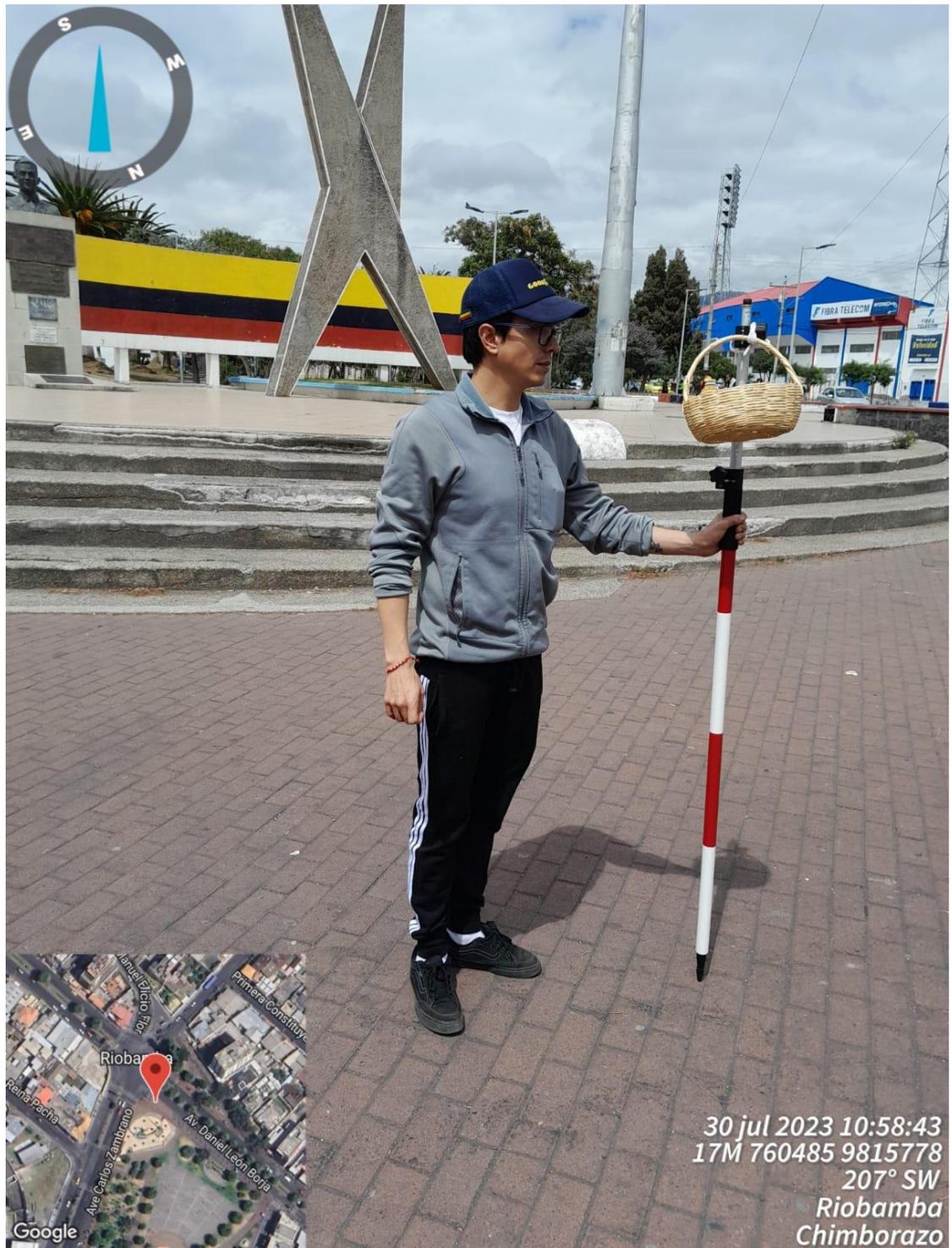


Anexo 3: Muestreo del punto de muestreo número 10.



Anexo 4: Muestreo del punto de muestreo número 14.

Anexo 5: Muestreo del punto de muestreo número 3.



Anexo 6: Muestreo del punto de muestreo número 12.

Anexo 7: Muestreo del punto de muestreo número 8.



Anexo 8: Muestreo del punto de muestreo número 7.

Anexo 9: Caja de transporte de termohigrómetro.

