

HUELLA URBANA DE LA CIUDAD DE ROSARIO, SANTA FE, ARGENTINA. AÑOS 2013 Y 2015

Balparda, L.R.; López, D.A.G.; Tazzioli, F.; Torralba, M.C.; Ciattaglia, B.; Peña, H.C.; Solís, T; Aquili, V.; Delorenzi, D.J.; Vicioso, B.M.

Área de Sensores Remotos. Escuela de Agrimensura. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario.

e-mail: csr@fceia.unr.edu.ar

RESUMEN

Una de las necesidades que se plantea a nivel mundial, es el estudio de la distribución espacial y la evolución de los asentamientos humanos, donde resultan clave las herramientas de la teledetección. A tales fines, se define huella urbana, al área urbanizada dominada por construcciones edilicias. El estudio de la evolución espacial y temporal de la huella urbana proporciona elementos que facilitan la planificación y el ordenamiento territorial, en pos de alcanzar ciudades y comunidades más inclusivas y sostenibles (ODS 11, UN, 2015). El objetivo del presente trabajo es identificar la huella urbana en la ciudad de Rosario (Santa Fe, Argentina), usando imágenes radar de los satélites COSMO-SkyMed y Radarsat-2, años 2013 y 2015. En el procesamiento se sigue el modelo raster binario con valor 1 (uno) en presencia de huella urbana y 0 (cero) en caso contrario. En la determinación se emplea una metodología basada en la coherencia interferométrica InSAR. En la verificación de uno de los resultados, se utiliza el producto del proyecto Global Urban Footprint (GUF), de la Agencia Espacial Alemana. El resultado derivado de imágenes COSMO-SkyMed (HU) presentó en algunos subsectores, una superficie de la huella urbana mayor respecto al producto GUF, y en otros el resultado opuesto. En base a la propuesta metodológica se determinó la huella urbana de la ciudad de Rosario para los años 2013 y 2015. La comparación con sitios testigos y con un producto de características similares, arrojaron los primeros indicios de la necesidad de continuar ampliando y profundizando el análisis.

Palabras clave: huella urbana, InSAR, GUF, COSMO-SkyMed, Radarsat-2

Key words: urban footprint, InSAR, GUF, COSMO-SkyMed, Radarsat-2

RESUMO

Uma das necessidades que surge a nível mundial é o estudo da distribuição espacial e da evolução dos assentamentos humanos, onde as ferramentas de sensoriamento remoto são fundamentais. Para este efeito, a pegada urbana é definida como a área urbanizada dominada por construções de edifícios. O estudo da evolução espacial e temporal da pegada urbana fornece elementos que facilitam o planejamento e ordenamento territorial, a fim de alcançar cidades e comunidades mais inclusivas e sustentáveis (ODS 11, ONU, 2015). O objetivo do presente trabalho é identificar a pegada urbana na cidade de Rosario (Santa Fe, Argentina), utilizando imagens de radar dos satélites COSMO-SkyMed e Radarsat-2, anos 2013 e 2015. No processamento, é seguido o modelo raster binário com valor 1 (um) na presença de pegada urbana e 0 (zero) no caso contrário. Na determinação, é utilizada uma metodologia baseada na coerência interferométrica InSAR. Na verificação de um dos resultados, é utilizado o produto do projeto Global Urban Footprint (GUF) da Agência Espacial Alemã. O resultado derivado das imagens do COSMO-SkyMed (HU) apresentou, em alguns subsetores, uma superfície de pegada urbana maior em relação ao produto GUF, e em outros o resultado oposto. Com base na proposta metodológica, a pegada urbana da cidade de Rosário foi determinada para os anos 2013 e 2015. A comparação com sítios de controle e com um produto com características semelhantes, deu os primeiros indícios da necessidade de continuar ampliando e aprofundando a análise.

Palavras chave: pegada urbana, InSAR, GUF, COSMO-SkyMed, Radarsat-2

HUELLA URBANA DE LA CIUDAD DE ROSARIO, SANTA FE, ARGENTINA. AÑOS 2013 Y 2015

Balparda, L.R.; López, D.A.G.; Tazzioli, F.; Torralba, M.C.; Ciattaglia, B.; Peña, H.C.; Solís, T; Aquili, V.; Delorenzi, D.J.; Vicioso, B.M.

Área de Sensores Remotos. Escuela de Agrimensura. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario.

e-mail: csr@fceia.unr.edu.ar

INTRODUCCIÓN

El fenómeno global de transición del ambiente rural al urbano, pone de manifiesto que la mayoría de los habitantes de la Tierra, viven en algún tipo de entorno urbanizado; este hecho se acentúa drásticamente con el paso del tiempo, estimándose que aproximadamente un 70% de las personas, vivirán en centros urbanos para el año 2050 (Esch *et al.*, 2017).

Ante esta realidad, los organismos de gobierno se enfrentan al desafío apremiante de planificar, gestionar y controlar la urbanización, planteando estrategias de reorganización en ámbitos como la infraestructura, el transporte y el ordenamiento territorial en general.

El conocimiento de la distribución espacial de las urbanizaciones, su evolución y su relación con el área de los asentamientos rurales son el punto de partida para abordar la implementación de acciones que tiendan a minimizar las consecuencias negativas de esta realidad en la vida de los habitantes de estos centros (ODS NU, 2015).

El mapeo de las áreas urbanas permite detectar la transformación de zonas rurales a urbanas, relevar el estado de los asentamientos irregulares, analizar la detección, usos y distribución de mejoras, entre otras acciones que puedan contribuir a la resolución de probables conflictos (Voltersen *et al.*, 2017).

En el mapeo, resultan de gran utilidad los datos captados por los sensores remotos a bordo de satélites y las herramientas de la teledetección, que permiten estudiar las dimensiones espaciales de los asentamientos humanos y su crecimiento.

En este contexto, se define como huella urbana a la extensión espacial del área urbanizada, conformada por estructuras antrópicas como por ejemplo edificaciones, calles y superficies impermeables en general, sin considerar las superficies naturales que se encuentran dentro de las ciudades (Voltersen *et al.*, 2017). No obstante, en algunos estudios se considera solo al área edificada como huella urbana (Esch *et al.*, 2017).

El estudio de la evolución espacial y temporal de la huella urbana, permite cuantificar la expansión urbana de una población. Estos resultados son una herramienta útil para la planificación y gestión del ordenamiento territorial, así como también para la detección de cambios en el uso del suelo y facilitan, en cierto modo, al desarrollo de urbanizaciones más inclusivas y sostenibles, tal como se plantea a nivel mundial, en el objetivo número 11 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas (ODS NU, 2015).

Independientemente de la metodología que se utilice para obtener la huella urbana, la misma se representa mediante una máscara de asentamiento urbano siguiendo un modelo ráster binario de presencia/ausencia (Esch *et al.*, 2017).

Actualmente, uno de los estudios más importante realizado para la identificación de la huella urbana a nivel mundial es el proyecto Global Urban Footprint (GUF, DLR 2016), creado a partir principalmente de datos satelitales TerraSAR-X y TanDEM-X, años 2011-2013, llevado a cabo por el Centro Aeroespacial Alemán (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. - DLR). Este trabajo se desarrolló, con el objetivo de mapear los asentamientos urbanos, permitiendo analizar

los patrones y las estructuras urbanas, la distribución regional de la población y la organización de las áreas urbanas y rurales (Agencia Espacial Alemana, 2018).

La obtención de GUF se basó en el cálculo de una medida de textura y en una clasificación que se centra en el análisis combinado de las características locales de retrodispersión (amplitud) y heterogeneidad local (textura) (Esch *et al.*, 2014). Estas características de las construcciones se relacionan con las estructuras de edificios verticales, de modo tal que según Esch *et al.* (2017) la máscara de GUF refleja la distribución detallada de construcciones en altura y no la totalidad de la superficie impermeable, que usualmente incluye carreteras y superficies pavimentadas. Esta particularidad diferencia los resultados obtenidos con esta metodología de los mapas de asentamiento derivados de imágenes satelitales multiespectrales (Esch *et al.*, 2017).

El producto GUF consiste en una máscara donde los píxeles poseen valores 0/255 correspondientes a ausencia/presencia de la huella urbana, visibles en tonos de negro/blanco en la Figura 1, con una resolución espacial de 12 metros (Esch *et al.*, 2011; 2017; 2018).

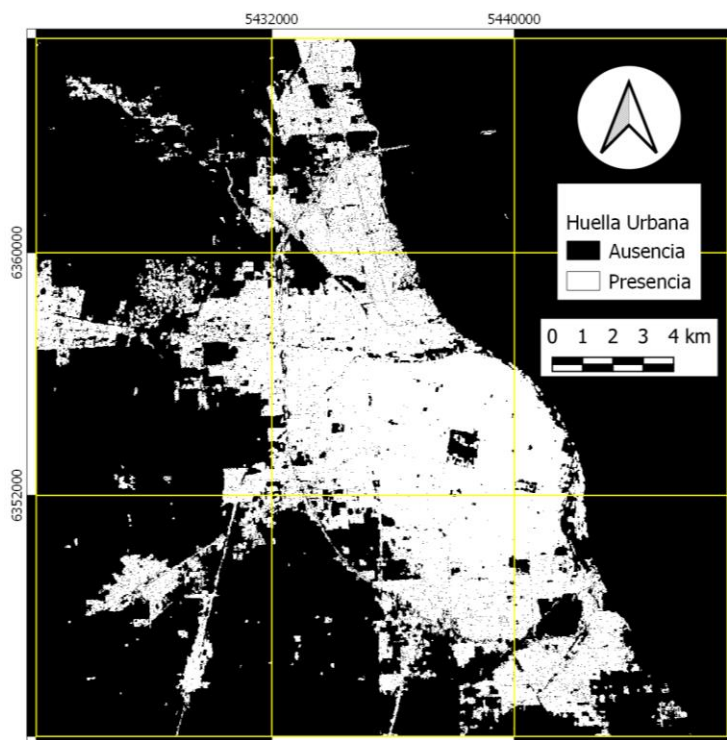


Figura 1. Máscara GUF en la ciudad de Rosario. Fuente: Esch *et al.* (2011; 2017; 2018)

GUF provee datos uniformes aplicables en todo el mundo sobre la localización, el tamaño y la forma de los asentamientos urbanos, resultando una ventaja crucial especialmente en regiones remotas y subdesarrolladas de la Tierra, donde los datos geográficos disponibles son frecuentemente escasos. Existen dos conjuntos de datos GUF, uno de uso abierto y sin cargo para aplicaciones sin fines de lucro cuya resolución general es de 84 metros y otro con fines científicos, donde los píxeles son de 12 metros, a los cuales se puede acceder a través de una solicitud al Centro Aeroespacial Alemán (Esch *et al.*, 2017).

Existen también, otros dos proyectos muy relevantes a nivel mundial, a saber: Global Human Settlement Layer (GHSL)¹ y el Global Human Built-up And Settlement Extent (HBASE)², ambos de

¹ Global Human Settlement Layer (GHSL) pertenece a Joint Research Centre (JRC) y Directorate-General for Regional and Urban Policy (DG REGIO), European Commission, junto con la asociación internacional GEO Human Planet Initiative. (s.f.) GHSL – Global Human Settlement Layer. Disponible en: <https://ghsl.jrc.ec.europa.eu/>. Fecha de consulta: 25/09/21.

² Global Human Built-up And Settlement Extent (HBASE) pertenece a NASA Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC).(s.f.) Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC). Disponible en: <https://sedac.ciesin.columbia.edu/data/set/ulandsat-hbase-v1>. Fecha de consulta: 25/09/21.

acceso libre y gratuito. Por un lado, en GHSL, se procesaron grandes volúmenes de datos heterogéneos a partir de imágenes satelitales Landsat y Sentinel, continentales y globales, imágenes satelitales a escala pequeña, datos censales e información geográfica proveniente de diferentes fuentes; produciendo así desde 1975 a 2018, información espacial global sobre población y dimensiones de los asentamientos humanos en el planeta. Estos resultados han sido testeados con datos de distintos sensores, misiones radar y ópticas, públicas y privadas (European Commission, 2018).

Por otro lado, HBASE es un mapa global de extensión de asentamientos, derivado de los datos Global Land Survey (GLS) de Landsat del año 2010. Este producto es luego utilizado como entrada para mejorar cartografías de superficies en Global Man-made Impervious Surface (GIMS); el cual emplea en su algoritmo, imágenes satelitales de alta resolución para calcular el porcentaje de superficie impermeable antrópica dentro de las zonas urbanas (NASA, s.f.).

Los proyectos internacionales, antes mencionados, ponen en evidencia una y otra vez, la relevancia y el alcance de un sistema de teledetección espacial; donde se incluye: una fuente de energía detectada por los sensores (propia o externa), la cobertura terrestre, el sistema sensor, el sistema de recepción-comercialización, el intérprete y el usuario final (Chuvienco, 2010).

De todo el rango de variación del espectro electromagnético, en el que los sensores remotos satelitales pueden sensor energía, resulta de interés la región de las microondas, más específicamente, en aquellas bandas donde opera el Radar de Apertura Sintética (SAR). Esta elección se justifica, por el potencial que tienen en captar datos de noche y de día, en presencia de nubes y precipitaciones leves, entre otras. Cabe mencionar, que la resolución espectral, el moteado (ruido) y otras características de las imágenes de radar, requieren de un grado de habilidad importante en el análisis e interpretación de las mismas. No obstante, la posibilidad de hacer uso de técnicas interferométricas abre un abanico de oportunidades que merecen ser exploradas, para la obtención de cartografía temática.

La ciudad de Rosario (Provincia de Santa Fe, Argentina) presenta un constante crecimiento en su desarrollo urbanístico, ejerciendo su influencia sobre las localidades satélites que conforman su área metropolitana. En este trabajo se plantea el estudio de la detección de la huella urbana a través de imágenes satelitales radar, haciendo uso de técnicas interferométricas, considerando como área de interés a la ciudad de Rosario, para los años 2013 y 2015.

OBJETIVO GENERAL

Identificar la huella urbana en la ciudad de Rosario (Santa Fe, Argentina), usando imágenes radar de apertura sintética de los satélites COSMO-SkyMed y Radarsat-2, para los años 2013 y 2015, respectivamente.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar la huella urbana a partir de datos captados por el sensor remoto a bordo de los satélites COSMO-SkyMed y Radarsat-2, aplicando técnicas interferométricas.
- Analizar cuantitativamente la huella urbana obtenida desde imágenes de radar COSMO-SkyMed, en relación al producto obtenido en el marco del proyecto Global Urban Footprint.
- Validar en sitios testigos, la huella urbana creada a partir de imágenes de radar COSMO-SkyMed, considerando para su validación el área que surge de la vectorización en un aerofotomosaico de lo edificado en planta y el proyecto Global Urban Footprint.

ÁREA DE ESTUDIO Y DATOS

Área de estudio

La ciudad de Rosario está ubicada en la zona sur de la provincia de Santa Fe, República Argentina, entre 32° 52' 18" y 33° 02' 22" latitud Sur y entre 60° 36' 44" y 60° 47' 46" longitud

Oeste. Su altitud sobre el nivel del mar oscila entre los 22,5 y 24,6 metros. El distrito posee una superficie total de 178,69 km², de la cual el 67,36% está urbanizada. Limita al este con el Río Paraná, al sur con las localidades de Soldini, Piñeiro y Villa Gobernador Gálvez, al oeste con Funes y Pérez, y al norte con Granadero Baigorria e Ibarlucea³.

Datos

En el presente trabajo se seleccionan las imágenes satelitales radar de las misiones COSMO-SkyMed⁴ y Radarsat-2⁵. Con respecto a las imágenes COSMO-SkyMed sus especificaciones son: banda X (frecuencia de adquisición 9.6 GHz), modo de adquisición Stripmap Himage con un ancho de faja de 40 km y un ángulo de inclinación de 27,71° a 30,47° (cercano y lejano respectivamente), polarización horizontal-horizontal (HH), resolución espacial 3 m, fecha de adquisición 19/06/2013 y 27/06/2013. Las características de las imágenes Radarsat-2 son: banda C (frecuencia de 5,405 Ghz), modo de adquisición Ultra Fine Beam U10 con un barrido de 20 km y un ángulo de incidencia de 37,2° a 38,4° (cercano y lejano respectivamente), polarización horizontal-horizontal (HH), resolución espacial 2.6 m, fecha de adquisición 21/11/2015 y 15/12/2015.

Los subsets de las imágenes COSMO-SkyMed (Figura 2) seleccionadas son:

- CSKS2_SCS_B_HI_04_HH_RA_SF_20130619102933_20130619102940_hh_slc
- CSKS2_SCS_B_HI_04_HH_RA_SF_20130627102929_20130627102938_hh_slc

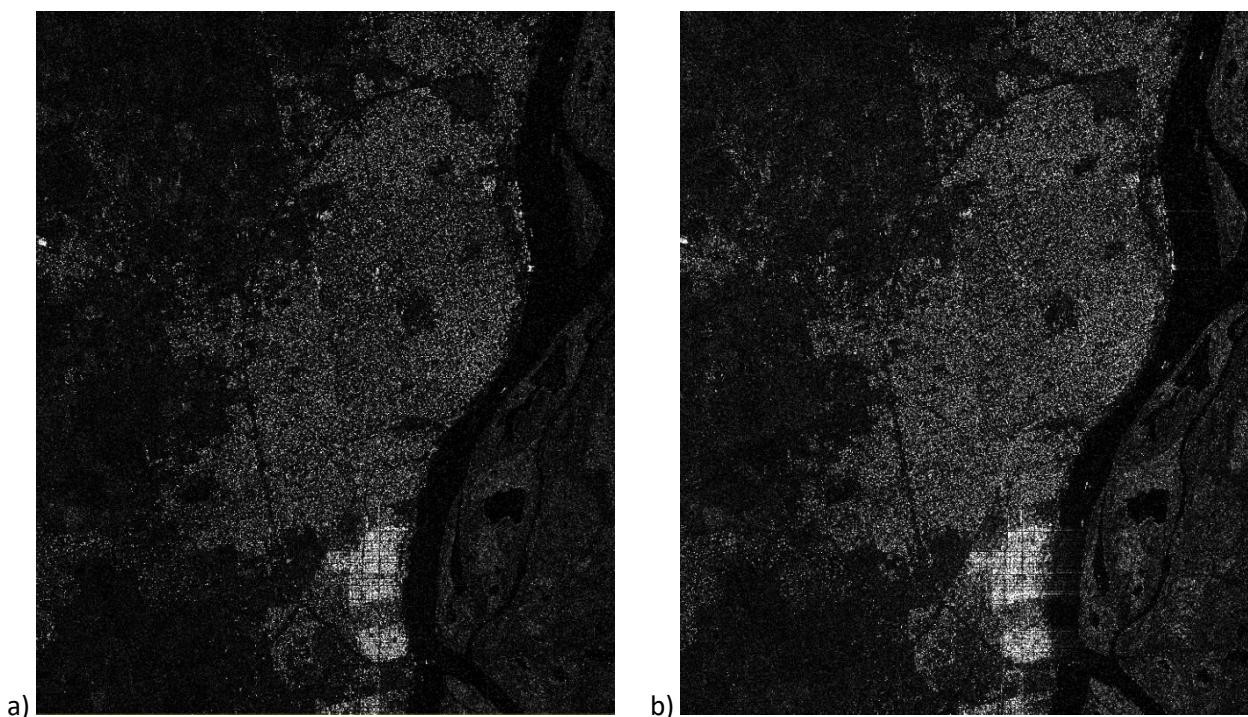


Figura 2. Subsets de imágenes COSMO-SkyMed, correspondientes a las fechas: a) 19 de junio de 2013; b) 27 de junio de 2013

³ Rosario. Características. Cuidad. Municipalidad de Rosario. Disponible en: <http://www.rosario.gov.ar/web/ciudad/caracteristicas/informacion-territorial-y-datos>. Fecha de consulta: 24/05/2018.

⁴ Provistas en el marco del Anuncio de Oportunidad AO-SAOCOM. Organizado por CONAE. PI: Cotlier, C. Proyecto N° 4 "Clasificación del Uso y Cobertura del suelo urbano de las Ciudades de Rosario, Gran Rosario, San Juan y Gran San Juan - Argentina, utilizando polarizaciones y bandas de plataformas SARAT/SAOCOM, Radarsat-2, COSMO SkyMed y PALSAR."

⁵ Provistas en el marco de la iniciativa Science and Operational Applications Research - Education International (SOAR-EI). Organizado por CCRS y MDA. PI: Cotlier, C. Proyecto "Horticulture Crop Yield and Urban Sprawl and Urban Fringe Shift with Radarsat-2 Images".

Los subsets de las imágenes Radarsat-2 (Figura 3) seleccionadas son:

- RS2_OK70799_PK650897_DK581136_U10_20151121_224941_HH_SLC
- RS2_OK70799_PK650898_DK581137_U10_20151215_224939_HH_SLC

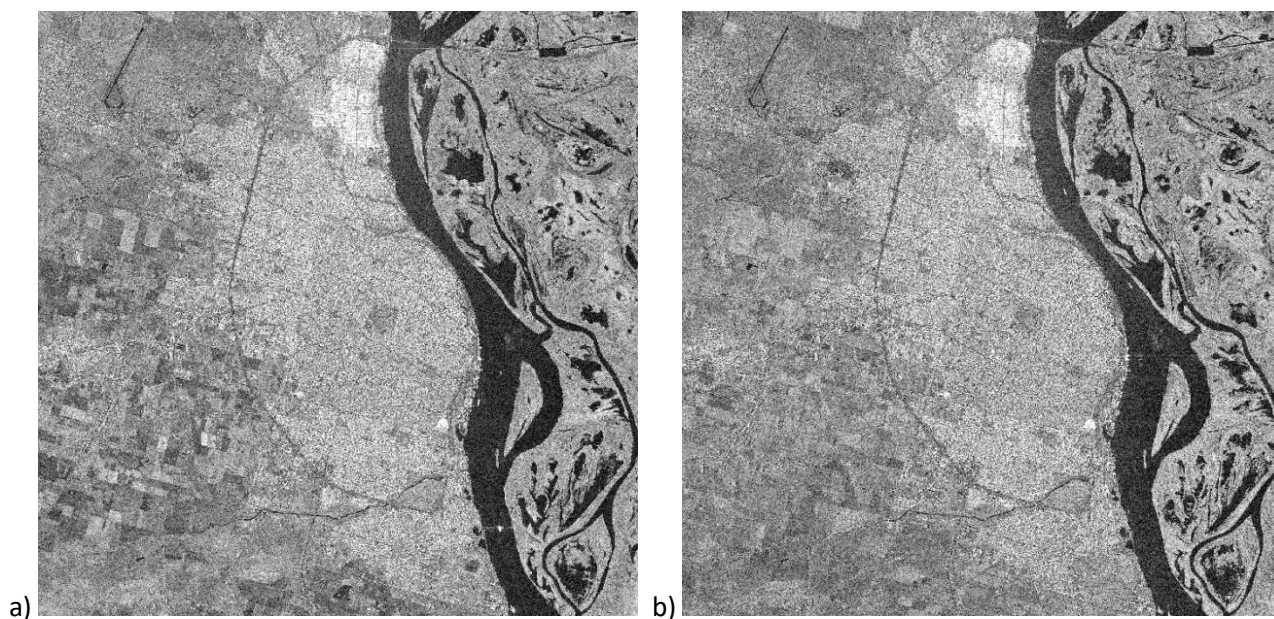


Figura 3. Subsets de las imágenes Radarsat-2, correspondientes a las fechas: a) 21 de noviembre de 2015 y b) 15 de diciembre de 2015

Con el objetivo de obtener los indicadores para el análisis de la huella urbana se utilizan tres bases cartográficas⁶ en formato Geographic Markup Language (.gml), sistema de referencia global WGS84, a saber:

- Manzanas. La componen polígonos que delimitan las manzanas catastrales. Observación: existen sectores en la periferia de la ciudad de Rosario, en los cuales no está definida la manzana en el Catastro municipal.
- Parcelas#. Compuesta por polígonos que delimitan las parcelas de las 21 secciones catastrales. Nota: en cada manzana quedan incluidas un número variable de parcelas; pero en el área periférica al casco céntrico existen sectores, en los cuales las parcelas no cuentan con una definición oficial catastral del número de manzana.
- Distritos descentralizados. Contiene los polígonos correspondientes a los límites de los distritos descentralizados de la ciudad de Rosario.

Para la comparación de los resultados obtenidos se utiliza:

- Global Urban Footprint (GUF)⁷. Imagen en formato raster con resolución de 12 metros, con valores 0/255 correspondientes a ausencia/presencia de la huella urbana (visibles en tonos de negro/blanco en la Figura 1), sistema de referencia global WGS84, obtenido a través del procesamiento de imágenes satelitales radar, años 2011-2013 (Esch *et al.*, 2011; 2017; 2018).
- Aerofotomosaico de la ciudad de Rosario, año 2013. Disponible a través del geoservicio WMS de la IDERosario⁸ (Figura 4).

⁶ Datos Abiertos de la Municipalidad de Rosario. Disponible en: <https://datos.rosario.gob.ar/>. Fecha de consulta: 23/05/18.

⁷ Dato facilitado por Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt e.V. (DLR, Centro Aeroespacial Alemán).

⁸ IDERosario. Infraestructura de Datos Espaciales de Rosario. Servicio WMS. Disponible en: <https://www.rosario.gob.ar/wms/planobase>. Fecha de consulta: 26/06/2019.



Figura 4. Aerofotomosaico de la ciudad de Rosario, año 2013. Fuente: Infomapa IDERosario

METODOLOGÍA

En la obtención de la huella urbana se sigue la metodología educativa sobre asentamientos urbanos propuesta por el EO-College⁹, modificada para poder utilizar las imágenes COSMO-SkyMed y Radarsat-2.

La metodología modificada se inicia con la creación de los subsets del área de estudio de las imágenes COSMO-SkyMed y Radarsat-2. Luego, el proceso se divide en dos partes:

1. se corregistran los subsets y se estima la coherencia, denominada Coh;
2. se calibran los subsets, filtrado Gamma Map para reducción de speckle y pasaje a decibeles.

Posteriormente, se compilan todos los archivos en uno solo y se crea el promedio de los subsets calibrados, denominado Prom_dB. Se ortorectifica la compilación y se aplica el algoritmo de creación de la máscara de huella urbana, en el que se comparan Prom_dB y Coh con valores umbrales seleccionados p y c, respectivamente. Dichos valores umbrales se modifican respecto a los indicados en la metodología de referencia, para obtener un resultado que se adecue a las características de la ciudad de Rosario. Esta adaptación, se plantea en función de considerar la retrodispersión de los asentamientos europeos (donde fue aplicada inicialmente esta metodología) y las edificaciones presentes en nuestra área de estudio. La selección se realiza teniendo en cuenta el comportamiento que tienen las coberturas, según su respuesta en coherencia y retrodispersión, mencionadas en la Tabla 1.

⁹ Curso Echoes in Space. EO-College. European Space Agency. Disponible en: <https://eo-college.org/courses/echoes-in-space/>. Fecha de consulta: 23/03/2018.

Tabla 1. Caracterización de coberturas según la coherencia y la retrodispersión

Comportamiento	Cobertura
Alta coherencia	Áreas urbanas y suelo desnudo
Baja coherencia	Decorrelación volumétrica de áreas forestadas
Alta retrodispersión por doble rebote o dispersión volumétrica	Áreas urbanas o forestadas
Baja retrodispersión por rebote simple	Vegetación o suelo desnudo

En la Figura 5 se presenta el diagrama de flujo, que sintetiza la metodología para la obtención de la huella urbana.

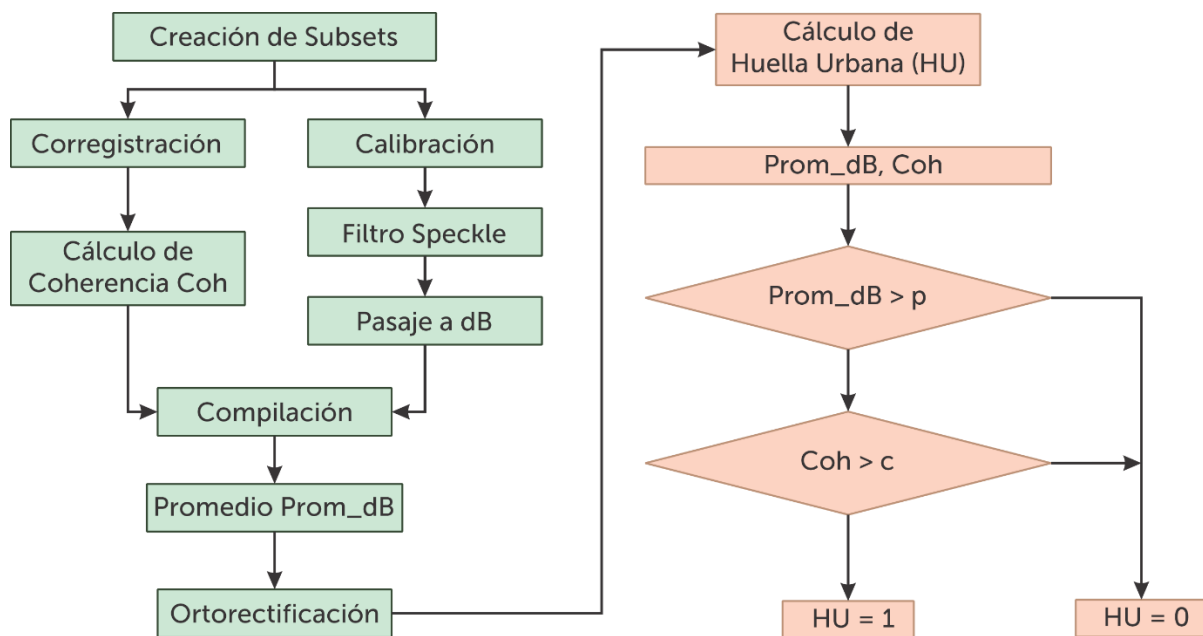


Figura 5. Diagrama de flujo de la metodología

A la huella urbana resultante de aplicar la metodología modificada usando datos COSMO-SkyMed se la denomina HU; dada su temporalidad, se utiliza en la fase de validación.

En la obtención de la máscara de la huella urbana se utiliza el *software* libre Sentinel Application Platform¹⁰ (SNAP).

Validación

El procedimiento de validación se aplica a la huella urbana obtenida a partir de datos COSMO-SkyMed; consta de dos etapas a realizar en un Sistema de Información Geográfica (SIG) (Figura 6) (Tazzioli, 2020; Balparda *et al.*, 2020):

- Análisis de HU en relación al producto GUF. Para ello se establece una unidad de análisis espacial que permite la cuantificación y relación de la superficie detectada por ambas huellas. A continuación, se define un índice que permite estimar la semejanza con GUF.

¹⁰ SNAP - ESA SeNtinel's Application Platform v8.0.8. Disponible en: <https://step.esa.int/main/toolboxes/snap/>

- Análisis exploratorio en sitios testigos. Consiste en relacionar las superficies de la huella urbana COSMO-SkyMed, GUF y lo edificado en planta (obtenido por digitalización del aerofotomosaico 2013, disponible en el Infomapa IDERosario). Los sitios testigos se seleccionan considerando diferentes tipos de construcciones en el área de estudio, tales como: iglesia, supermercado, fábrica, escuela, institución gubernamental, centro comercial, estación ferroviaria, vivienda, edificio y museo, entre otros. Asimismo, también se han seleccionado otros lugares donde la edificación es nula, como por ejemplo plazas y parques.

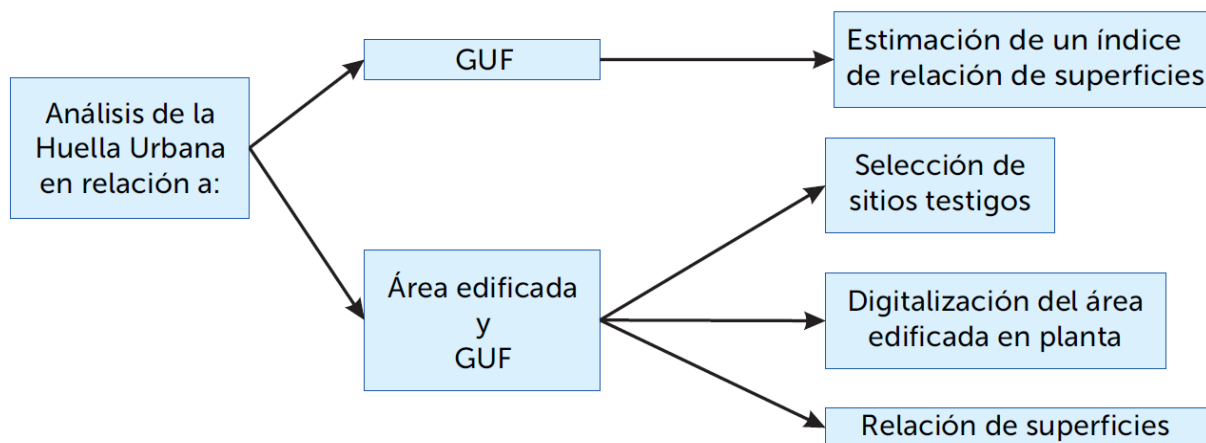


Figura 6. Procesamiento de validación

Procesamiento en un ambiente SIG

La etapa de procesamiento en un ambiente SIG comienza con la creación de un nuevo proyecto; donde se importan las capas vectoriales: manzanas, parcelas# y distritos descentralizados de la ciudad de Rosario, así como también las capas raster: GUF y la huella urbana COSMO-SkyMed (HU). El marco de referencia geodésico nacional a utilizar es POSGAR 94 faja 5 (EPSG 22185).

A fin de completar aquellos sectores de Rosario que no tienen definidas las manzanas oficiales, se combinan las capas manzanas y parcelas#, creando una capa llamada manzanas_modif, de modo tal de obtener una única unidad de análisis vectorial en toda el área de estudio.

Con el objetivo de trabajar con una única resolución espacial, se realiza el resamplado de la máscara GUF, pasando de 12 a 3 metros. Posteriormente, se recortan las huellas urbanas GUF resamplada y HU, utilizando los límites del distrito Rosario (creado a partir de los distritos descentralizados).

En la obtención de indicadores a partir de las máscaras GUF resamplada y HU, se realiza un conteo de los píxeles que tienen valor 255 y HU=1 (presencia de huella urbana), respectivamente; considerando como unidad de análisis los polígonos definidos en manzanas_modif. Luego, se calcula la superficie urbanizada multiplicando este indicador por el área de cada píxel (9 m²).

El procesamiento en un ambiente SIG se realiza con el *software* libre QGIS¹¹.

Relación entre GUF resamplada y huella urbana HU

Con el fin de analizar la relación que existe entre la máscara resamplada GUF (Sup_{GUF}) y la huella urbana HU ($Sup_{HU_Pp_Cc}$), se plantea el cálculo de un índice que combina los valores de superficie urbanizada, siguiendo las especificaciones de la Figura 7. Los valores del índice varían

¹¹ QGIS, Sistema de Información Geográfica (SIG) de código libre para plataformas GNU/Linux, Mac OS, Microsoft Windows y Android. Disponible en: <https://www.qgis.org/es/site>.

entre [-1;1] según el grado de semejanza; donde en 0 se alcanza la mayor similitud y en los extremos del rango de variación, las mayores disimilitudes (Tazzioli, 2020; Balparda *et al.*, 2020).

$$\begin{array}{l}
 \text{Relación} \\
 \text{Sup}_{GUF} \\
 \text{y} \\
 \text{Sup}_{HU_Pp_Cc}
 \end{array}
 \left\{
 \begin{array}{l}
 \frac{Sup_{GUF} - Sup_{HU_Pp_Cc}}{Sup_{GUF}}, Sup_{GUF} > Sup_{HU_Pp_Cc} \text{ y } Sup_{GUF} \neq 0 \\
 \frac{Sup_{GUF} - Sup_{HU_Pp_Cc}}{Sup_{HU_Pp_Cc}}, Sup_{GUF} < Sup_{HU_Pp_Cc} \text{ y } Sup_{HU_Pp_Cc} \neq 0 \\
 0, Sup_{GUF} = 0 \text{ y } Sup_{HU_Pp_Cc} = 0 \\
 0, Sup_{GUF} > 0 \text{ y } Sup_{HU_Pp_Cc} > 0 \text{ y } Sup_{GUF} = Sup_{HU_Pp_Cc}
 \end{array}
 \right.$$

Figura 7. Índice de la relación entre GUF resampleada y huella urbana HU

Digitalización del área edificada en planta

El procedimiento se inicia con la digitalización de la superficie edificada en planta a partir del aerofotomosaico del distrito Rosario (vuelo fotogramétrico del IGN, año 2013). Una nueva capa vectorial tipo polígono se crea, bajo la denominación Edificado; donde se incluyen los siguientes campos en la tabla de atributos: ID, nombre del lugar y superficie de lo edificado en planta.

La digitalización se realiza teniendo en cuenta el desplazamiento por perspectiva del área edificada en planta y la sombra presente en la imagen (Figura 8), con el propósito de atenuar el desplazamiento propio de la imagen y aleros que alteran las dimensiones de lo construido.

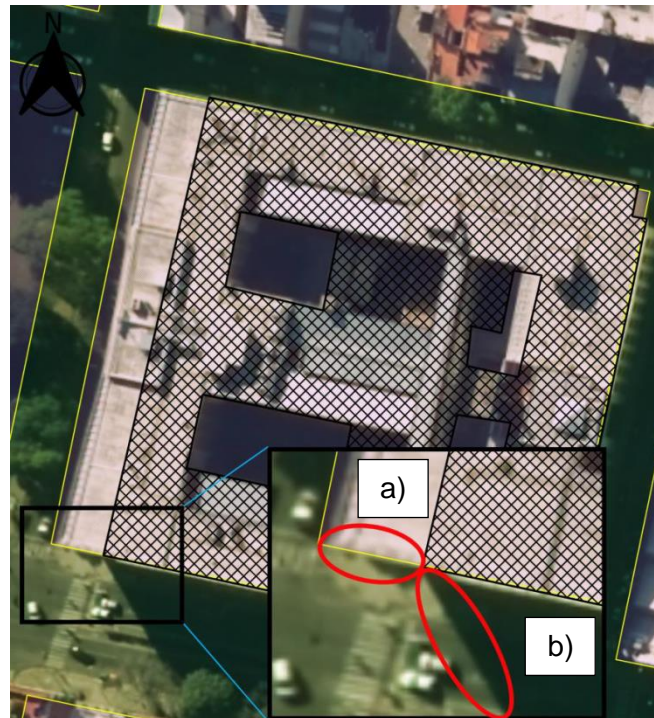


Figura 8. Digitalización de un sitio testigo: a) Visualización del desplazamiento por perspectiva y b) Influencia de la sombra

En la selección de los diferentes sitios testigos se consideran construcciones edilicias que permanecen invariantes en las fechas correspondientes a los distintos productos incluidos en el análisis y el trabajo de digitalización realizado en 2019.

RESULTADOS

Huellas Urbanas

A partir del procesamiento interferométrico de los pares de imágenes COSMO-SkyMed, considerando valores de $p = -15$ y de $c = 0,5$, se obtuvo la huella urbana de la ciudad de Rosario, para el año 2013 (Figura 9.a). Con la misma metodología, pero considerando los pares Radarsat-2, con valores de $p = -10$ y $c = 0,5$, se identificó la huella urbana para el año 2015 (Figura 9.b). Al igual que con el producto GUF, los productos resultantes se visualizan con una representación gráfica de presencia/ausencia de huella urbana en tonos blanco/negro, respectivamente.

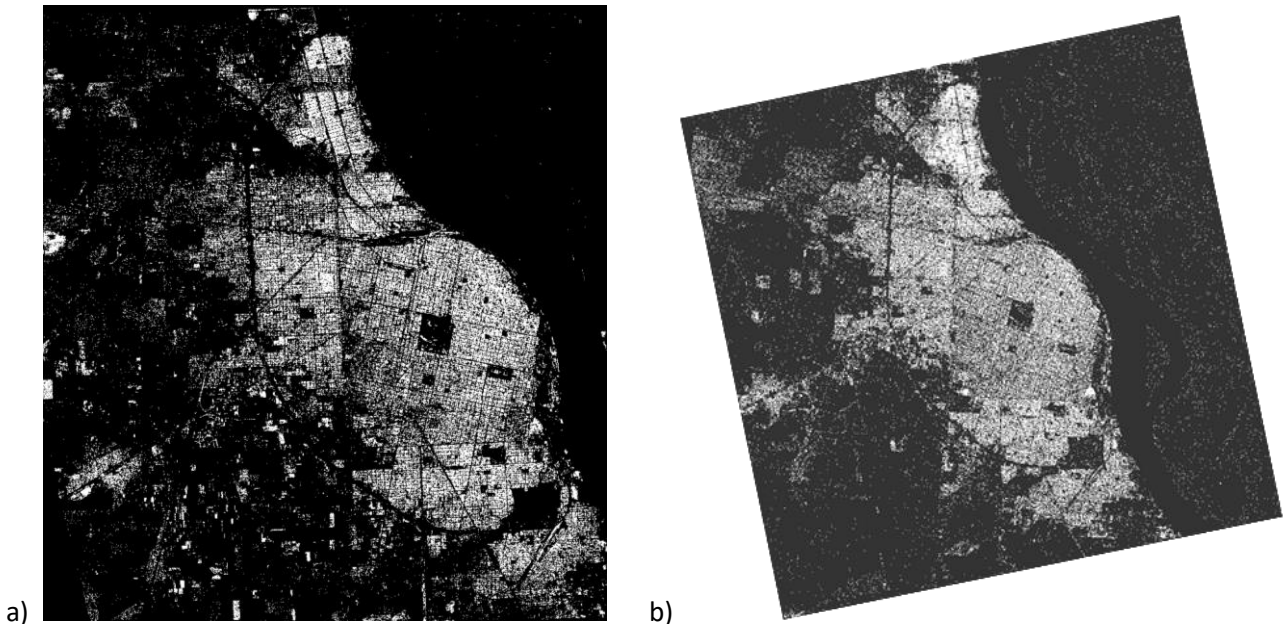


Figura 9. Huellas Urbanas: a) COSMO-SkyMed, año 2013 y b) Radarsat-2, año 2015

En la Figura 9, se observa una concordancia en el perfil de las huellas urbanas correspondiente a los años 2013 y 2015; dado, principalmente, por el entramado urbano y el contraste que se evidencia con aquellas zonas donde no hay edificaciones, tales como: las avenidas y bulevares, las vías del ferrocarril y los parques de la ciudad.

Índice de relación entre las huellas urbanas GUF resampleada y HU

Una vez finalizado el cálculo del índice que relaciona las superficies correspondientes a la huella urbana de GUF resampleada y la obtenida a partir de imágenes COSMO-SkyMed (HU), se procedió a realizar una cartografía que permitió visualizar las zonas similares y las disímiles (Figura 10).

Así, en la Figura 10, los polígonos de manzanas_modif en color blanco indican que la superficie cubierta por ambas huellas es igual o similar (valores del índice próximos a cero). En cambio, los polígonos en verde claro e intenso (valores positivos del índice), son indicativos de que GUF resampleada identificó una mayor superficie que el producto HU, es decir detección por exceso. Por último, los polígonos en los dos tonos de rojo, representan los valores negativos del índice, evidenciando que HU detectó mayor superficie edificada que GUF resampleada, en este caso se menciona como detección por defecto.

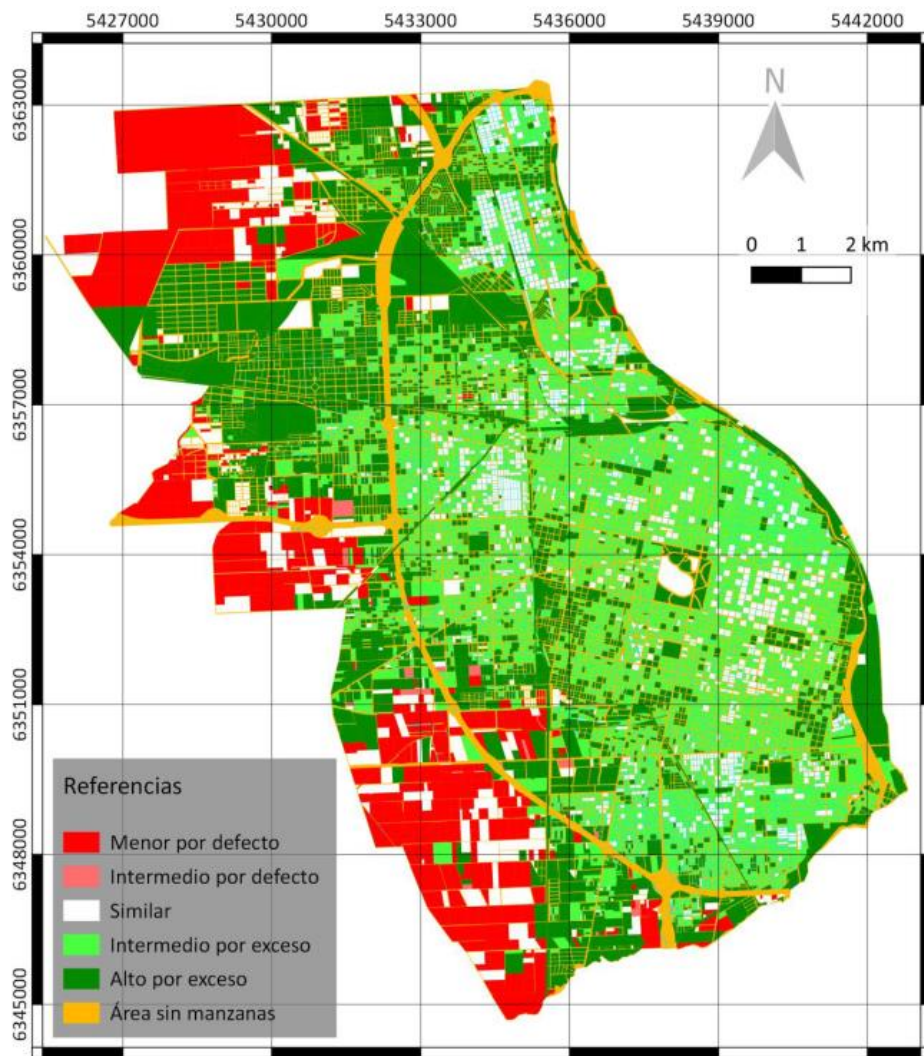


Figura 10. Índice de la relación entre la huella urbana GUF resamplada y HU

Análisis exploratorio en sitios testigos

Un total de 14 sitios testigos distribuidos en la ciudad de Rosario (Figura 11), se seleccionaron siguiendo los criterios pre-establecidos, con fines exploratorios.

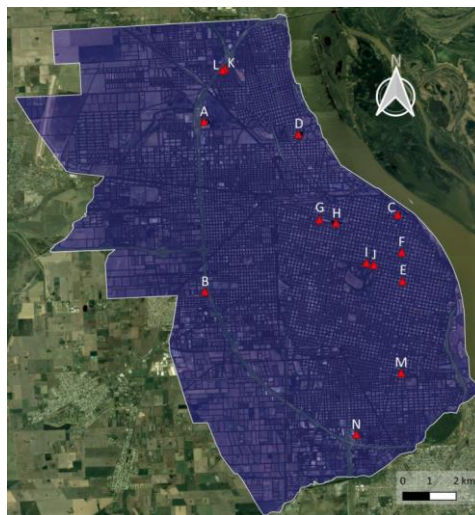


Figura 11. Ubicación de los sitios testigos seleccionados

Si bien, el proceso de digitalización de lo edificado en planta y su análisis, se realizó para todos los casos seleccionados (Tazzioli, 2020), en este capítulo, a modo de ejemplo, sólo se presenta el estudio de un sitio donde se encuentra emplazado un supermercado que abarca aproximadamente 2/3 del total de una manzana.

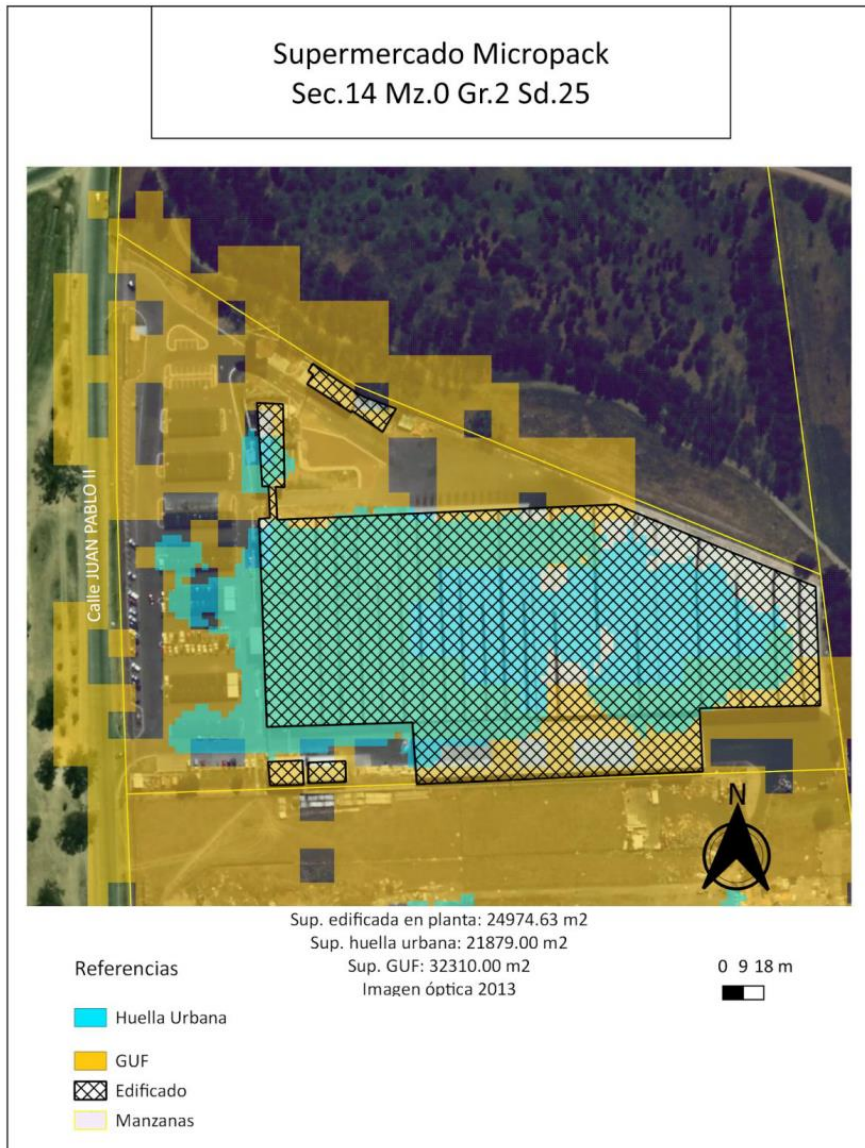


Figura 12. Ejemplo de sitio testigo. Sitio testigo A, tipo supermercado

En la Figura 12, se observa la manzana y sus alrededores donde se ubica el supermercado MicroPack (cito en Juan Pablo II y Av. Sorrento). A partir del aerofotomosaico se digitalizó el contorno de la superficie edificada que ocupa un total de 24974.63 m² (entramado cuadrícula). La superposición con las huellas urbanas de interés, permitió identificar que GUF resampleada detectó de manera importante por exceso (píxeles en color naranja) en todas las direcciones. En cambio, la HU, determinó en el área oeste por exceso, pero en menor medida y, además, en el área este y sur del supermercado detectó por defecto.

En los 12 sitios testigos con construcciones edilicias, se calcularon los valores de superficie correspondientes a: edificado en planta (ED), huella urbana GUF resampleada, huella urbana COSMO-SkyMed (HU) y la razón porcentual de ambas huellas en relación a lo edificado en planta. La nómina de los sitios testigos y los resultados de estos indicadores se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Sitios testigos edificados con sus respectivas superficies y relaciones porcentuales

Sitio	ED [m ²]	GUF[m ²]	HU [m ²]	(GUF-ED)/ED [%]	(HU-ED)/ED [%]
A) Supermercado Micropack	24974,63	32310,00	21879,00	29,37	-12,40
B) Fabaher S.A.	6097,06	12474,00	3564,00	104,59	-41,55
C) Escuela Técnica N°7	9270,22	14139,00	7560,00	52,52	-18,45
D) Portal Rosario Shopping	34738,41	36981,00	12726,00	6,46	-63,37
F) Escuela Normal Superior N°1 "Dr. Nicolás Avellaneda"	3686,27	14274,00	3807,00	287,22	3,28
H) Mercado del Patio – Mc Donald's	9115,37	40770,00	11097,00	347,27	21,74
I) Museo Municipal de Bellas Artes Juan B. Castagnino	1510,85	10062,00	1701,00	565,98	12,59
J) Tribunales Provinciales de Rosario	9454,77	12222,00	7812,00	29,27	-17,38
K) Natividad del Señor	1260,97	2970,00	18,00	135,53	-98,57
L) Monoblock Barrio Rucci	740,80	2889,00	972,00	289,99	31,21
M) Centro Municipal de Distrito Sur Rosa Ziperovich	3745,26	5868,00	2817,00	56,68	-24,79
N) Manzana con edificaciones unifamiliares	1962,77	3798,00	1449,00	93,50	-26,18

La huella urbana GUF resampleada identificó en promedio el 166,53% por exceso respecto a la superficie en planta digitalizada. En cambio, HU lo hace por exceso en cuatro casos, con un promedio de 17,20% y por defecto, en ocho casos con 37,83%. Tomando todos los casos de la huella urbana HU de manera conjunta resulta en una predominancia de identificación por defecto del 19,49%.

De igual modo, la Tabla 3 contiene datos de superficie referidos a los sitios testigos correspondientes a espacios recreativos (plazas), considerando como referencia para el análisis la superficie de la manzana.

Tabla 3. Sitios testigos recreativos (plazas) con sus superficies y relaciones porcentuales

Lugar	MZ [m ²]	GUF [m ²]	HU [m ²]	GUF/MZ [%]	HU/MZ [%]
E) Plaza Libertad	13010,31	7965,00	0,00	61,22	0,00
G) Plaza Mariano Moreno	15166,53	6444,00	9,00	42,49	0,06

En este punto, queda en evidencia la génesis del producto GUF, donde se observó un porcentaje de huella urbana importante dentro de la manzana; a diferencia de la huella urbana HU que prácticamente no identifica construcciones.

DISCUSIÓN

La metodología utilizada para la obtención de la Huella Urbana de la ciudad de Rosario, a partir de datos COSMO-SkyMed, difiere de la usada por GUF en aspectos tales como la técnica, el volumen de datos, la temporalidad y la resolución espacial. Si bien, ambas propuestas tienen como objetivo la detección de la huella urbana teniendo en cuenta las edificaciones, GUF termina seleccionando un área más amplia, que incluye superficies impermeables tales como calzadas, rutas, pistas de aterrizaje, y otras superficies de uso recreativo (superficies de asfalto, cemento, baldosas, cerámicas, entre otras). Esta situación se pone de manifiesto en el análisis exploratorio en sitios testigos, con una detección por exceso en todos los casos evaluados (respecto de lo edificado). A pesar de las diferencias, los resultados así obtenidos se podrían constituir en antecedentes o datos de entrada en futuros trabajos en esta línea de investigación.

Un punto a considerar es que, en el producto HU, se detectaron algunos píxeles falsos positivos correspondientes a parcelas rurales ubicadas en la periferia de la ciudad. Esta determinación se pudo realizar a través de la comparación del producto GUF resampleado y el aerofotomosaico disponible en el Infomapa IDERosario. Los falsos positivos se podrían llegar a descartar considerando otras fuentes de información, como por ejemplo máscaras de vegetación creadas con imágenes ópticas.

Algunos polígonos resultantes de la digitalización de lo edificado en planta, no se ubicaron por completo dentro de la unidad de análisis (polígonos de la capa manzanas_modif). Si bien los datos de las distintas fuentes utilizadas, cumplen con los estándares del Open Geospatial Consortium (OGC)¹², en ninguno de los casos se encontró una medida que indique la calidad o el error de los productos. Las diferencias encontradas se pueden deber al propósito para el cual las capas fueron editadas. Así, el aerofotomosaico se elaboró con fines de visualización, contando con una precisión distinta a la unidad de análisis contemplada en este estudio, resultante de la combinación de las capas manzanas y parcelas#, editadas estas últimas con fines catastrales.

En los sitios testigos, se identificaron en la huella urbana COSMO-SkyMed (HU) superficies por exceso y, en otros casos, por defecto. Esto indica la necesidad de realizar ajustes, como el agregado de imágenes de orientación orbital descendente. También, se observa un desplazamiento en dirección sur-oeste de la huella urbana obtenida respecto de la digitalización de lo edificado en planta. No obstante, la metodología utilizada en el presente trabajo permite obtener un resultado más cercano a la realidad de terreno, en relación a GUF y en concordancia a los objetivos planteados.

Debido a la temporalidad de las fuentes de datos con la que fue creado el producto GUF, se tomó la decisión de no realizar la comparación con la huella urbana obtenida a partir de imágenes Radarsat-2. Asimismo, para este segundo producto obtenido, queda pendiente realizar una comparación con lo edificado en planta, dado que aún no se encontró una fuente de datos de resolución espacial y temporal similar, tal como la que se utilizó en la metodología de análisis exploratorio implementada con la huella urbana COSMO-SkyMed.

CONCLUSIONES

La metodología aplicada, adaptada de la propuesta educativa del EO-College, permitió la obtención de la huella urbana para la ciudad de Rosario, años 2013 y 2015, utilizando imágenes radar de apertura sintética de alta resolución de los satélites COSMO-SkyMed y Radarsat-2. Cabe

¹² OGC: organización internacional sin fines de lucro constituida en 1994, con el objetivo de promover el desarrollo y uso de estándares y tecnologías abiertas en el campo de la información geográfica.

mencionar que, un punto importante dentro de la metodología es la utilización de técnicas interferométricas que posibilitaron la caracterización de la cobertura y la posterior identificación de la huella urbana.

En el análisis cuantitativo de la huella urbana obtenida a partir de imágenes COSMO-SkyMed, en relación con el producto GUF, se encontró una mayor concordancia de los productos en el casco céntrico de la ciudad de Rosario, delimitado por el Río Paraná, la avenida Carlos Pellegrini y el bulevar Nicasio Oroño, así como también en otros emplazamientos urbanos establecidos de larga data en los distritos descentralizados Norte, Noroeste y Sur. Mientras que, en la zona periférica de la ciudad de Rosario (al oeste de la avenida de circunvalación 25 de mayo), se presentaron las mayores discordancias en ambos sentidos, es decir en determinados sectores una mayor detección de GUF y en otros, una mayor identificación a través del producto derivado de COSMO-SkyMed.

El análisis de sitios testigos permitió concluir que, en todos los casos, la huella urbana GUF resampleada clasificó por exceso en relación a la digitalización sobre una aerofotografía de lo edificado en planta. En cambio, el producto de huella urbana a partir de COSMO-SkyMed identificó por exceso y defecto con un comportamiento más errático; en algunos casos influenciado por el desplazamiento que se visualiza cuando se analiza cada caso en particular, y en otros, debido a las características propias de cada construcción.

Los resultados obtenidos en el presente trabajo, más precisamente en la fase de validación, ponen de manifiesto las oportunidades de mejora y dan paso al planteo de nuevos trabajos en esta línea de investigación. Se pueden considerar otros conjuntos de datos (sensores remotos y fechas diferentes), introducir modificaciones en la metodología, así como también ampliar el proceso de validación. En esta última etapa, se podrían incorporar nuevos sitios testigos, trabajo de campo y otras fuentes de datos, tales como las disponibles en los organismos gubernamentales vinculados al catastro de la Municipalidad de Rosario o de la Provincia de Santa Fe.

Si bien, son sumamente importantes los proyectos de alcance global, tales como GUF, GHSL y HBASE, llevados a cabo por instituciones altamente reconocidas a nivel internacional, también resultan significativas las investigaciones del orden y alcance local. Esta dicotomía permite enriquecer la temática de interés e incluir puntos relevantes, tales como el conocimiento del área de estudio, el acceso a datos puntuales y la cercanía a las autoridades gubernamentales municipales encargadas de la gestión. De este modo, se habilita el intercambio de saberes, datos, técnicas y productos validados, con miras a contribuir en las etapas de planificación urbana, en pos de alcanzar un desarrollo urbanístico más inclusivo y sostenible. Se espera que todos estos esfuerzos, se constituyan en mayor o menor medida en aportes, que permitan acercarnos cada vez más a la concreción de los objetivos y metas planteados en los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas.

BIBLIOGRAFÍA

Agencia Espacial Alemana. (2018). *DLR Portal*. Disponible en: http://www.dlr.de/eoc/en/desktopdefault.aspx/tabid-9628/16557_read-40454/. Fecha de consulta: 24/05/2018.

Balparda, L.; del Valle, H.; López, D.; Torralba, M.; Aquili, V.; Peña, H.; Vicioso, B.; Delorenzi, D.; Tazzioli, F.; Ciattaglia, B.; Solis, T. (2020). Identificación de la Huella Urbana de la ciudad de Rosario (Santa Fe, Argentina), utilizando imágenes satelitales radar. Año 2013-2020. [Presentación de póster]. XIV Jornadas de Ciencia, Tecnología e Innovación 2020. Universidad Nacional de Rosario. Rosario, Argentina. Disponible en: <https://jornadasctei.unr.edu.ar/12b-balparda/>

Chuvieco E (2010). Teledetección ambiental. Barcelona, España: Editorial Ariel.

Esch, T., Heldens, W., Hirner, A., Keil, M., Marconcini, M., Roth, A., Zeidler, J., Dech, S., Strano, E. (2017): Breaking new ground in mapping human settlements from space – The Global Urban

Footprint. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 134 (2017) 30-42. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.10.012>.

Esch, T., Schenk, A., Ullmann, T., Thiel, M., Roth, A., Dech, S. (2011): Characterization of Land Cover Types in TerraSAR-X Images by Combined Analysis of Speckle Statistics and Intensity Information. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Volume 49, Issue 6, pp. 1911- 1925. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2010.2091644>.

Esch, T.; Bachofer, F.; Heldens, W.; Hirner, A.; Marconcini, M.; Palacios-Lopez, D.; Roth, A.; Üreyen, S.; Zeidler, J.; Dech, S., *et al.* (2018): Where we live—a summary of the achievements and planned evolution of the global urban footprint. Remote Sensing 2018, 10. <http://dx.doi.org/10.3390/rs10060895>.

European Commission. *Copernicus Open Access Hub*. Disponible en: [https://scihub.copernicus.eu/dhus/odata/v1/Products\('de108251-9aed-463e-91dc1c5b8d8109d0'\)/\\$value](https://scihub.copernicus.eu/dhus/odata/v1/Products('de108251-9aed-463e-91dc1c5b8d8109d0')/$value). Fecha de consulta: 4/05/2018.

European Commission. *Copernicus Open Access Hub*. Disponible en: [https://scihub.copernicus.eu/dhus/odata/v1/Products\('c2b1cf90-5746-447f-80aa60122909723e'\)/\\$value](https://scihub.copernicus.eu/dhus/odata/v1/Products('c2b1cf90-5746-447f-80aa60122909723e')/$value). Fecha de consulta: 4/05/2018.

Objetivos de Desarrollo Sostenible. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. Objetivo 11: Lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles. Disponible en: <https://www1.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals.html> Fecha de consulta: 10/03/2021.

Tazzioli, F. (2020). Huella urbana de la ciudad de Rosario - Santa Fe, Argentina - Año 2013. Trabajo Final. Ingeniería en Agrimensura. Escuela de Agrimensura. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario.

Voltersen, M.; Esch, T.; Berger, C.; Eckardt, R. (2017). Urban footprints. Module 3105: Urban Areas. SAREDU. Disponible en: https://eo-college.org/resource/urban_footprints/

Breve descripción del grupo de trabajo y sus actividades

El Área de Sensores Remotos dependiente de la Escuela de Agrimensura de la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura (FCEIA) de la Universidad Nacional de Rosario (UNR) comenzó sus funciones en marzo de 2003, con el objetivo de realizar tareas de docencia e investigación en Teledetección con apoyo de los Sistemas de Información Geográfica.

Los proyectos de investigación más significativos son:

1. Desarrollo de un Modelo Digital de Terreno urbano, utilizando Modelos Digitales de Elevación Interferométricos ajustados y validados mediante datos GNSS. Caso Rosario-Argentina (AO DEM CONAE e IGN, 2019).
2. Identificación de la huella urbana de la ciudad de Rosario (Santa Fe, Argentina), utilizando imágenes satelitales radar. Año 2013-2018 (80020180100067UR, R.C.S. 348/2020, UNR).
3. Detección de Polución Lumínica Marina Nocturna en Grandes Ciudades Costeras Utilizando Imágenes Satelitales DMSP-NOAA (ING537, A.R.C.S. N°1395/2016, UNR).
4. Horticulture Crop Yield and Urban Sprawl and Urban Fringe Shift with Radarsat 2 Images (AO SOAR-EI, CSA y CCRS, 2013).
5. Clasificación multitemporal de coberturas de áreas urbanas, mediante el uso de imágenes radar de las plataformas SARAT, Radarsat-2, COSMO-SkyMed y PALSAR. El caso de las ciudades de Rosario y San Juan, Argentina (AO SAOCOM, CONAE y MINCyT, 2011).
6. The Use of RADARSAT-2 Ultra-Fine images in Horticulture-Intensive Farming: Detecting Land Use and Crop Discrimination (AO SOAR, CCRS, 2009).
7. Monitoring Urban Night-Time Lights Related to Economic Activity, Urban Heat Island and Fires detection in the Paraná Flooding Valley Argentina using the Observatory SAC-D/Aquarius Satellite data (AO CONAE, MINCyT y NASA, 2009).

Estos proyectos en investigación han dado lugar a la presentación de trabajos en jornadas, congreso y simposios a nivel local, nacional e internacional, y a la publicación en revistas científicas.

Desde sus inicios capacita periódicamente a graduados universitarios y estudiantes avanzados en fundamentos teóricos-prácticos del Sensoramiento Remoto, relacionado a temáticas tales como Urbanismo, Medio Ambiente, Agricultura, entre otros.

En el año 2017, el Área fue incluida como Unidad de Desarrollo de la Maestría en Aplicaciones de Información Espacial (IG-UNC-CONAE). Disponible en: <https://ig.conae.unc.edu.ar/unidades-de-desarrollo/>

En el año 2013, comenzó con el dictado del Trayecto Curricular Sistemático de Posgrado/Pregrado en SIG y Teledetección (EPEC-FCEIA-UNR). <https://posgrado.fceia.unr.edu.ar/trayectos/trayectos-de-posgrado.html>

En cuanto a las actividades de Extensión Universitaria, las más destacadas son:

1. Participación en el Censo del arbolado público de la localidad de Chabás. Primera parte. PI Fanelli, S. (2019). 6ta Convocatoria Vinculación Inclusiva (R.C.S. 201/2019, UNR).
2. Colaboración en los Proyectos Finales de Ingeniería Electrónica "Decodificador de Imágenes Recibidas de los Satélites NOAA/Metop/Feng Yun" Busto D. y Gallegos J.L. (2008) y "Posicionamiento de Rotor de Antena Satelital" Farré J.A. y Perrone P.G. (2010).
3. Compilación de eventos de incendios en islas frente a Rosario en SIG, solicitado por Rectorado UNR para presentación judicial (2008).
4. Desarrollo del Catastro de Isla (2004), actualización del Catastro Urbano (2006) y capacitación en SIG (2006), Victoria (E.R).