



Cambio climático:
aprender y compartir



Mapeo del potencial solar en entornos urbanos

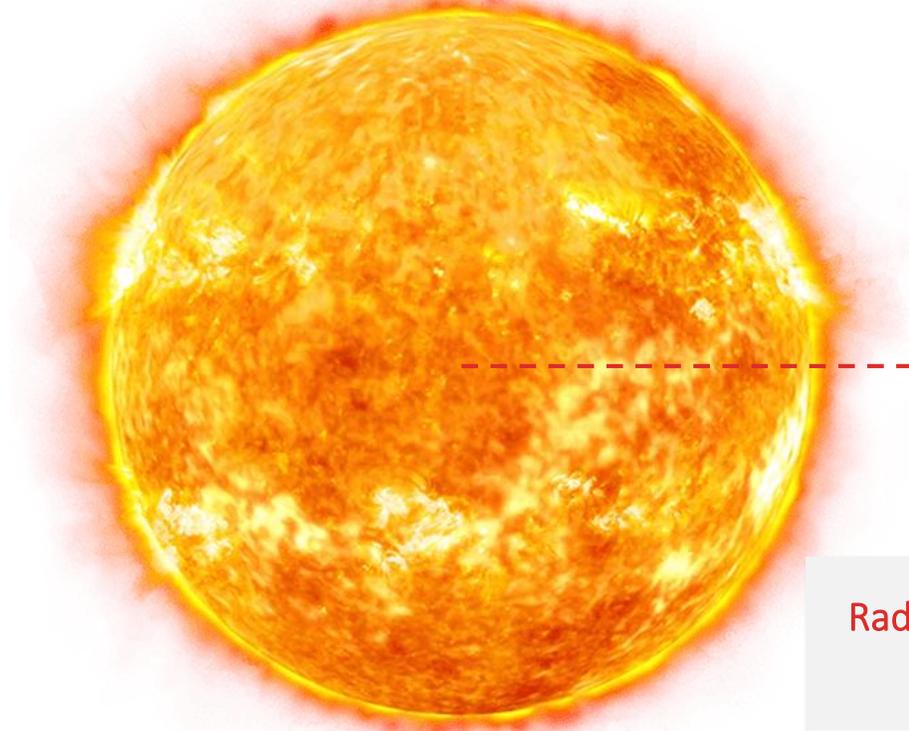
Ignacio García Ruiz

Universidad Pública de Navarra – Instituto de Smart Cities (ISC) / UNED Pamplona

La radiación solar

→ El Sol y la constante solar

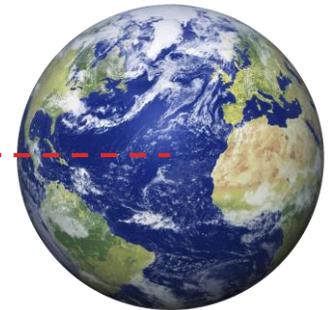
- Edad actual: 4.600 millones de años.
- Vida esperada: 10.000 millones de años.
- Temperatura superficial: 6050 K



Constante solar: 1361.1 W/m^2

Potencia por unidad de superficie que llega a la parte alta de la atmósfera

$149.6 \cdot 10^6 \text{ km}$

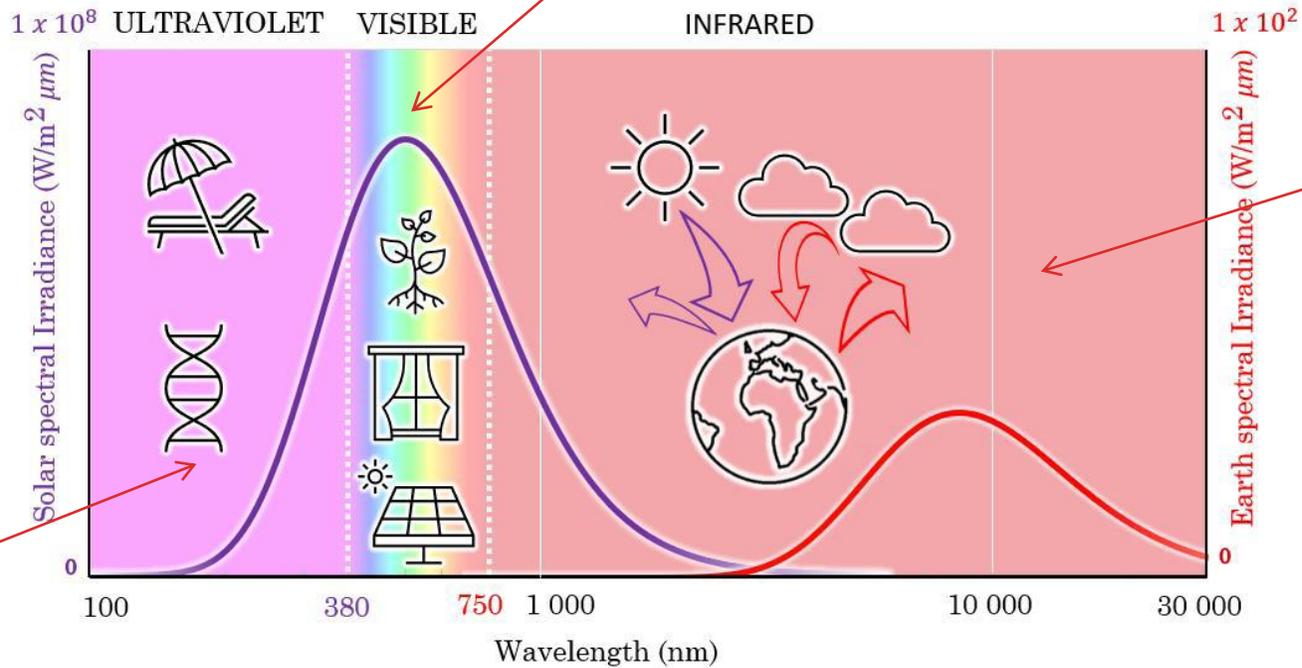


Radiación solar total: $6,83 \cdot 10^{23} \text{ kW}$
($6.3 \cdot 10^4 \text{ kW/m}^2$)

La radiación solar

→ Espectro de la radiación solar extraterrestre

- La conocemos como “luz”.
- Produce importantes efectos en los seres vivos, tales como la fotosíntesis y la visión humana.
- Supone la mayor parte de la radiación solar.



- El Sol, las estrellas y otros objetos calientes emiten rayos UV.
- Una exposición prolongada a rayos UV produce quemaduras en la piel y puede dar lugar a cáncer.
- Son absorbidos en la atmósfera, especialmente en la capa de ozono.

- Al incidir la radiación infrarroja sobre un cuerpo induce movimientos de vibración y rotación en las moléculas produciendo calentamiento.
- Según su proximidad al visible: dividido en lejano, medio y cercano (NIR).

La radiación solar

→ Componentes de la radiación solar

RADIACIÓN DIRECTA

- Potencia radiativa por unidad de superficie que llega a la superficie terrestre directamente desde el sol sin que la atmósfera la haya dispersado.
- Lleva la dirección de los rayos del sol.



RADIACIÓN DIFUSA

- Es la parte de la radiación total que incide en la superficie terrestre después de que la atmósfera la haya dispersado.
- Es anisotrópica y tiene un carácter multidireccional.



RADIACIÓN GLOBAL

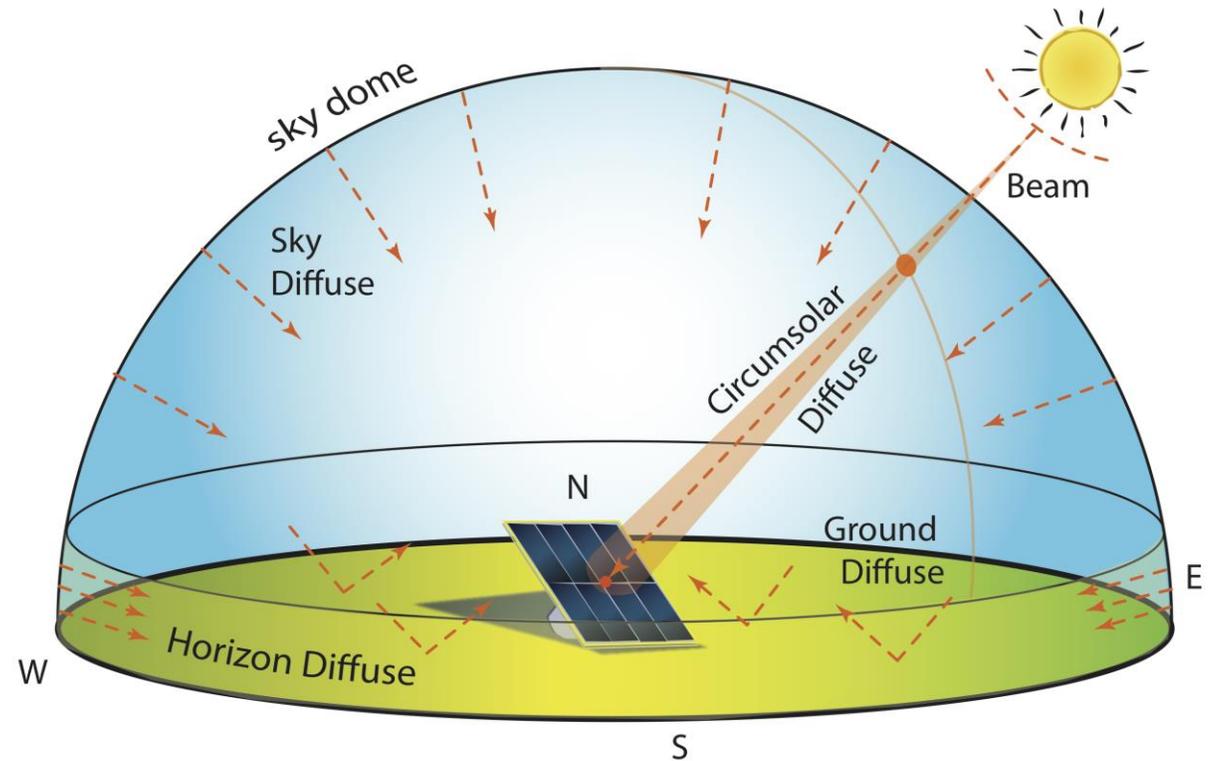


Diagrama de las múltiples componentes de la radiación solar en un día claro.

Fuente: Jeffrey R. S. Brownson © Penn State University is licensed under [CC BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

La radiación solar

→ ¿Dónde producir energía solar fotovoltaica?

TERRENOS AGRÍCOLAS



VS.

ENTORNOS URBANOS



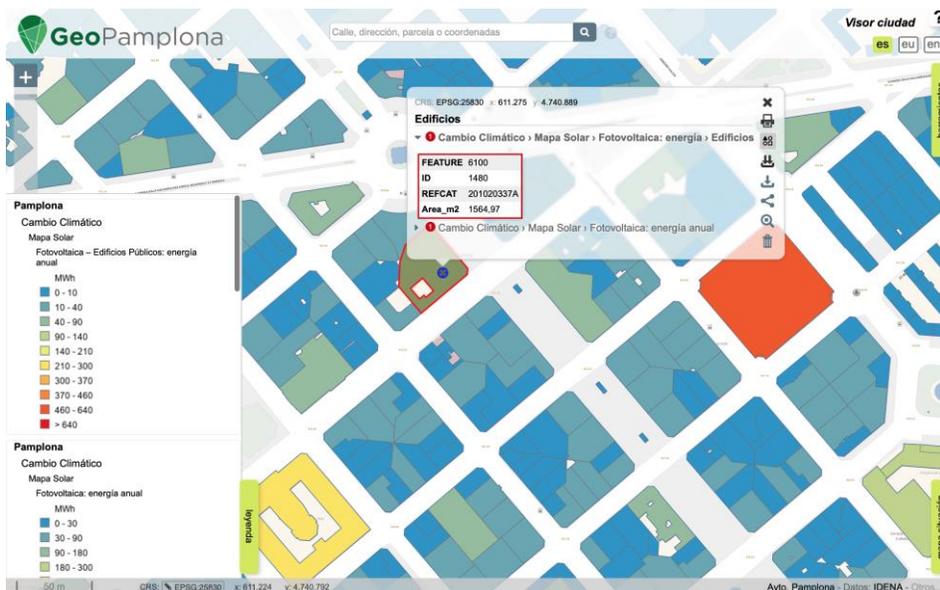
Mapeo del potencial solar en entornos urbanos

→ Mapas solares elaborados por la UPNA en colaboración con las Administraciones Locales y Regionales

MAPA SOLAR DE PAMPLONA



- Análisis del potencial de los tejados de la ciudad para producir energía solar fotovoltaica y energía solar térmica.
- Colaboración: Agencia Energética Municipal de Pamplona – UPNA
- Año de elaboración: 2020



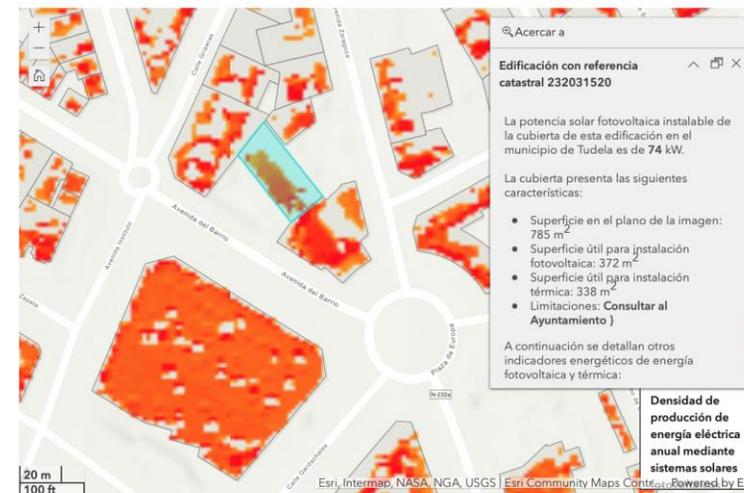
MAPA SOLAR DE NAVARRA



- Análisis del potencial de los tejados de la Comunidad Foral para producir energía solar fotovoltaica y energía solar térmica.
- Colaboración: Gobierno de Navarra – Nasuvinsa – UPNA
- Año de elaboración: 2022

Potencial solar

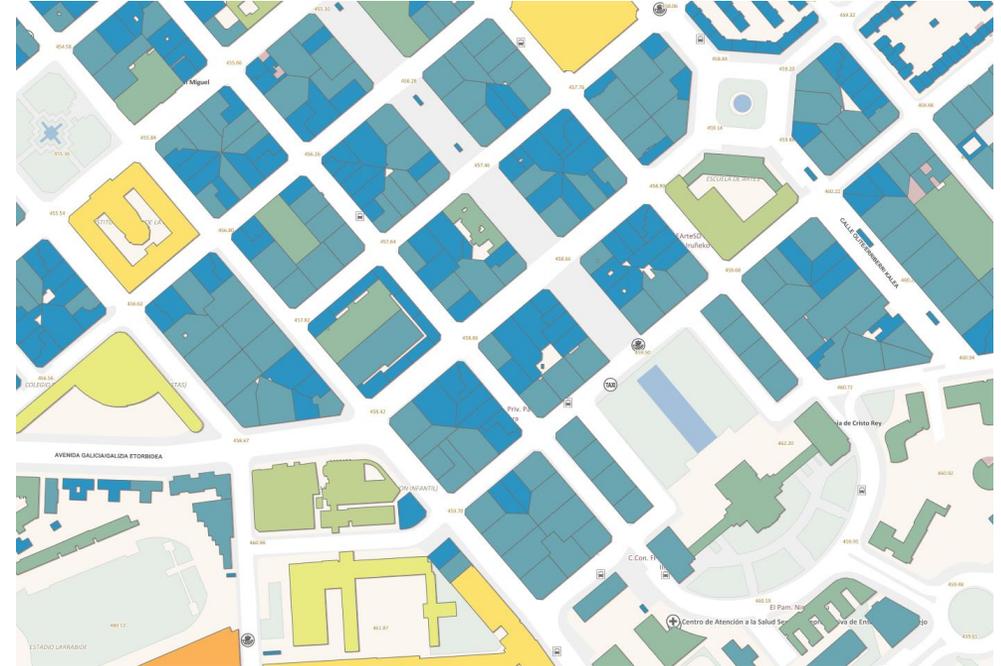
Consulta previa



Mapeo del potencial solar en entornos urbanos

→ Datos generales del mapa solar de Pamplona

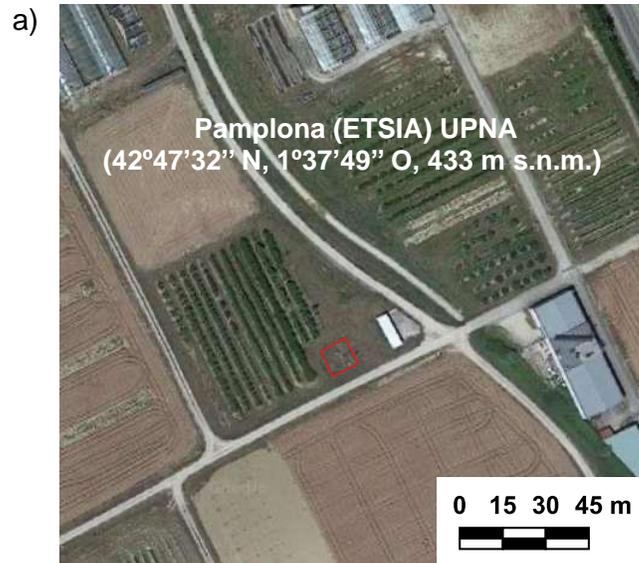
- **Radiación** global, directa y difusa, sobre plano horizontal, en **cada una de las horas** de un año meteorológico típico.
- **Radiación** global sobre cada uno de los planos correspondientes a las **cubiertas de los edificios de la ciudad** y de las superficies de calles, plazas y demás espacios municipales.
- Densidad de **energía** eléctrica producida mediante conversión **fotovoltaica** y de energía **solar térmica**.
- **Potencia pico fotovoltaica** a instalar.



Datos meteorológicos

→ Estación meteorológica

Estación **Pamplona (ETSIA) UPNA** situada en la finca de prácticas de la Universidad Pública de Navarra (UPNA).



Ubicación de la estación Pamplona (ETSIA) UPNA en la finca de prácticas de la UPNA sombreada en rojo (a) e imagen de la estación (b).

CARACTERÍSTICAS DE LA SERIE DE DATOS

- Longitud de la serie : 16 años (ene 2005 - sep 2020).
- Variables radiométricas utilizadas:
 - ✓ Irradiancia global horizontal.
 - ✓ Temperatura.
 - ✓ Humedad relativa.
- Frecuencia de registro: horaria
- Control de calidad: Baseline Surface Radiation Network (BSRN)

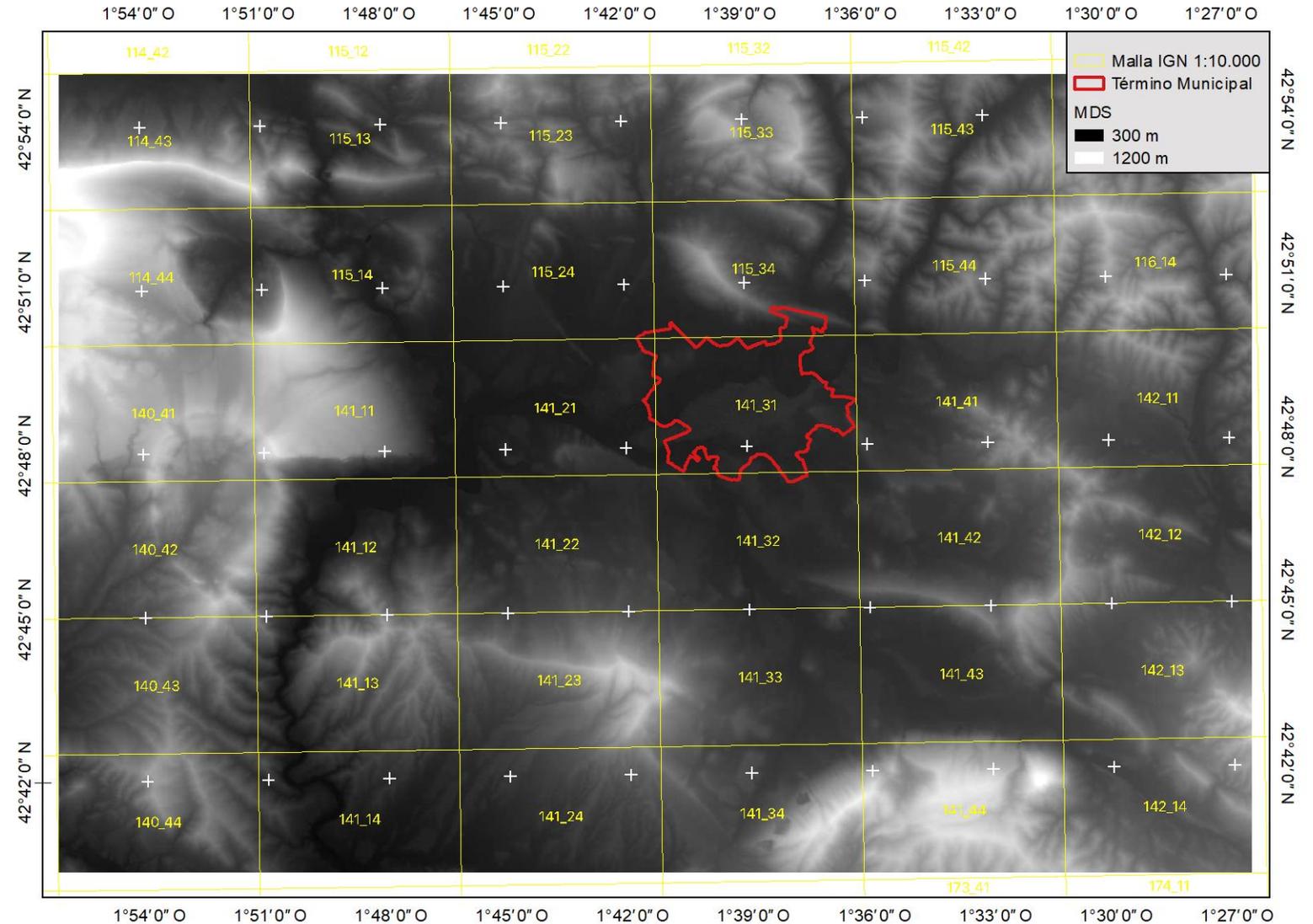
Datos geográficos

→ Modelo digital de superficie (MDS)

MODELO DIGITAL DE SUPERFICIE

- Fuente: nube de puntos LiDAR (Leica Single Photon LiDAR-SPL)
- Año de vuelo: 2017
- Densidad de puntos: 14 puntos/m².
- Resolución: 2 m.

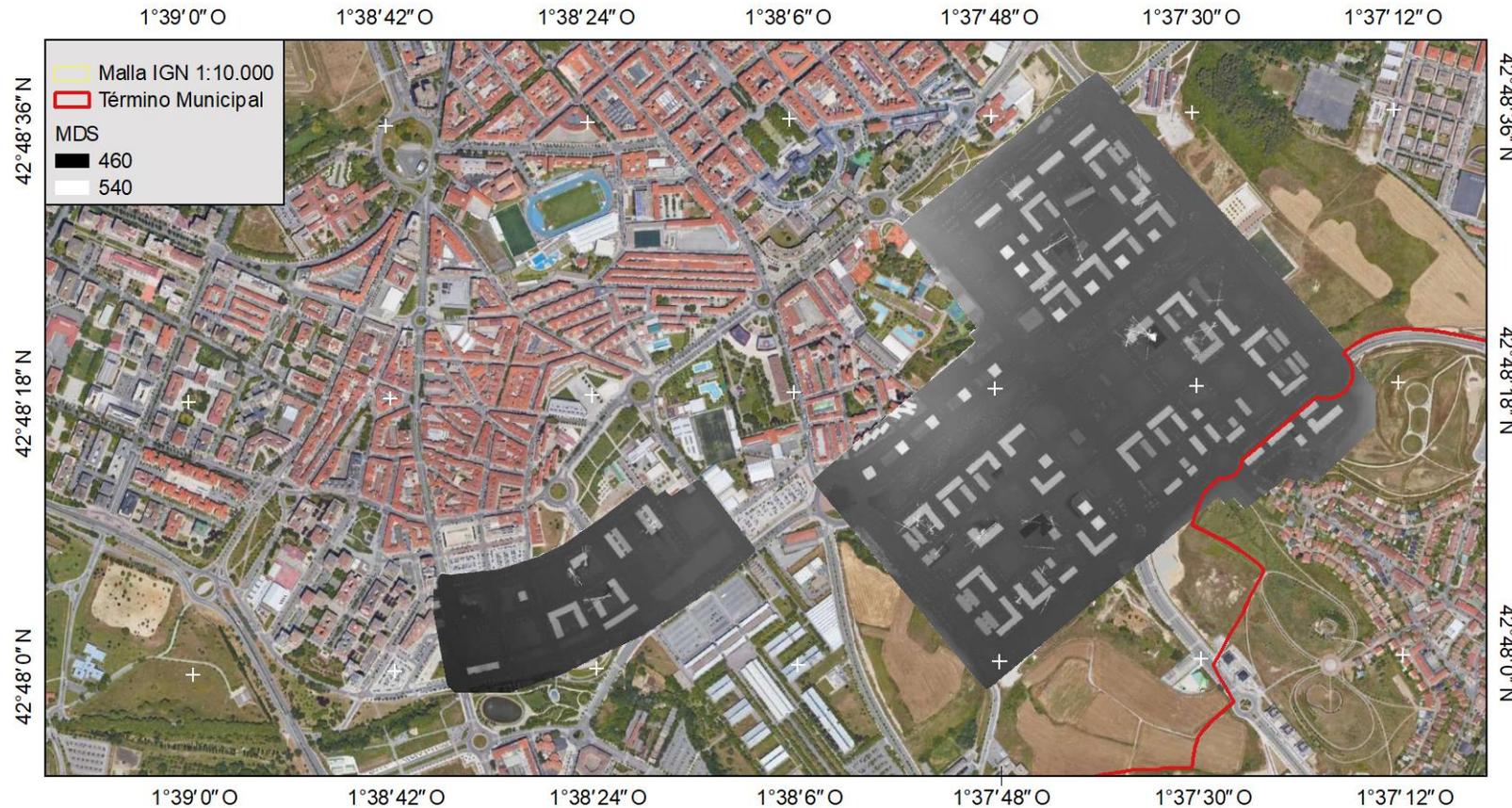
Extensión del MDS utilizado. Las líneas amarillas se corresponden con las hojas de escala 1:10.000 del IGN y la línea roja delimita el término municipal de Pamplona.



Datos geográficos

→ Modelo digital de superficie (MDS)

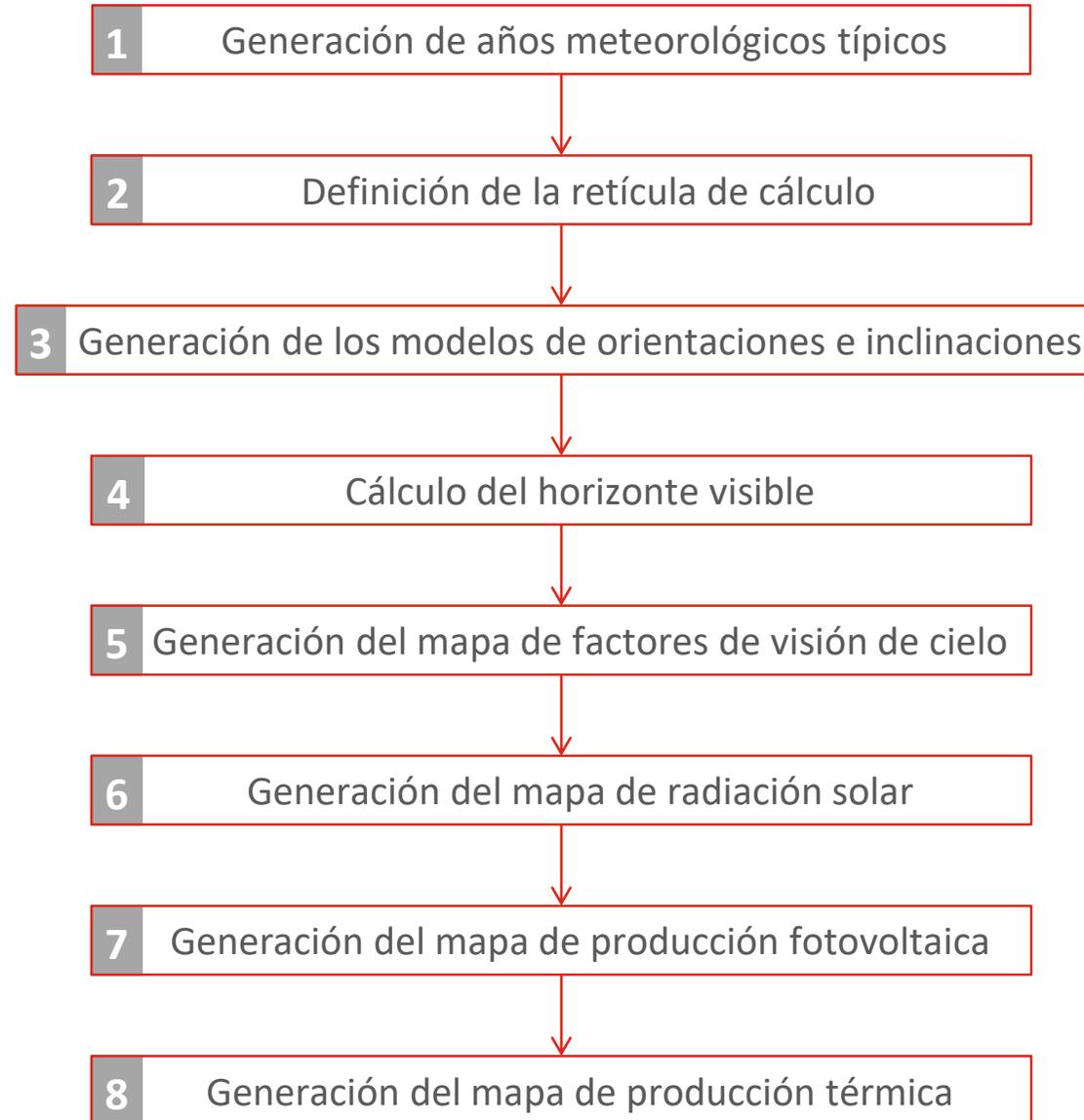
Actualización de determinadas regiones del MDS a partir de un vuelo LiDAR más reciente.



Zonas actualizadas del MDS representadas en escala de grises.

Metodología

→ Metodología general



Metodología

→ Generación de años meteorológicos típicos

¿QUÉ ES UN TRY?

Año sintético compuesto por la concatenación de meses o días reales de la serie histórica de observaciones que reproduce las condiciones meteorológicas típicas de una determinada ubicación a largo plazo.

¿POR QUÉ UTILIZAR UN TRY?

La utilización de TRYs para simular el comportamiento de sistemas de aprovechamiento de la energía solar presenta una serie de ventajas frente a la utilización de la serie histórica completa de observaciones meteorológicas:

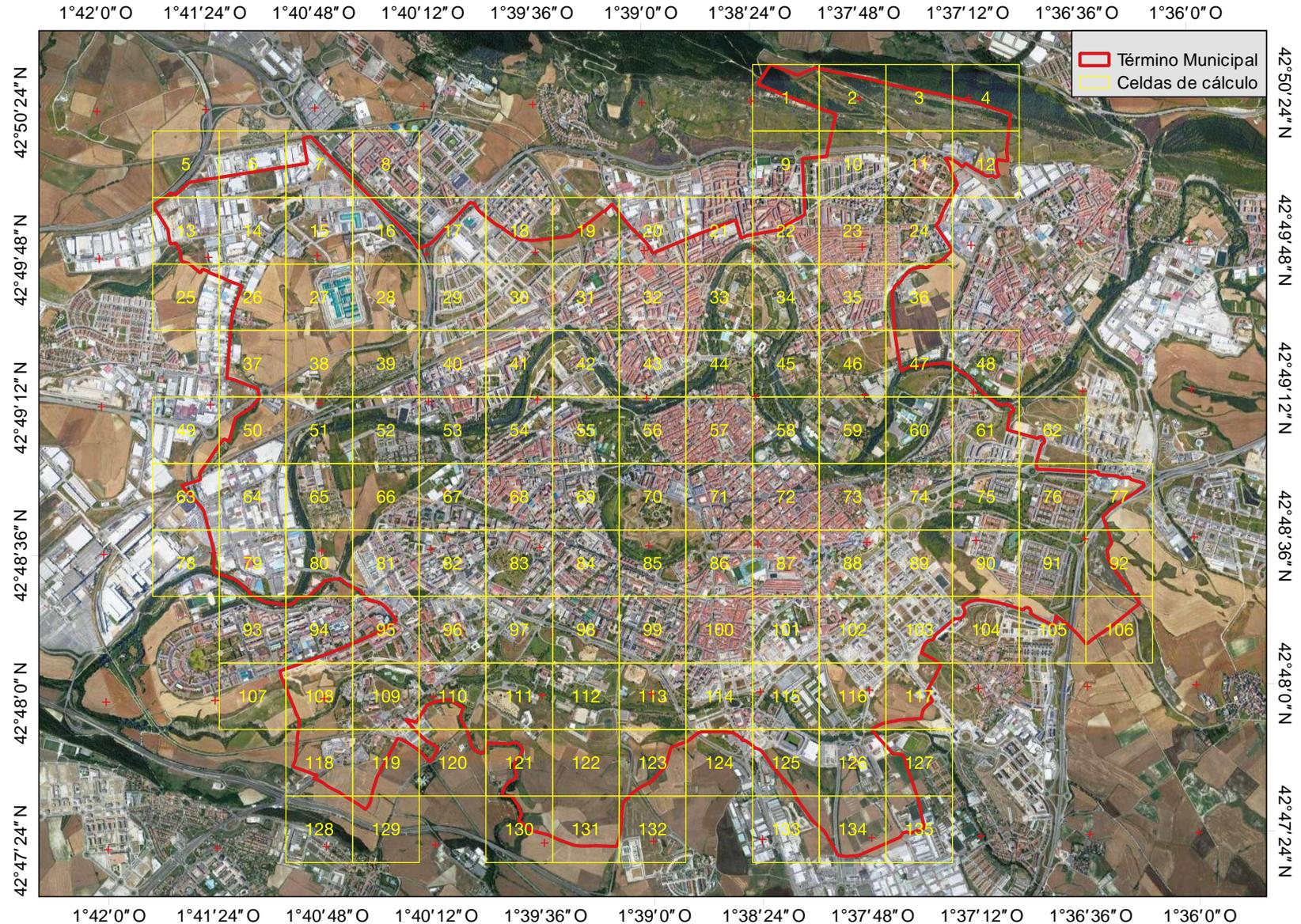
- Reducción del tiempo computacional de la simulación.
- Simplificación del análisis de los resultados.
- Mitigación de los efectos de los datos faltantes o erróneos en la serie de observaciones.

Metodología

→ Definición de la retícula de cálculo

- 135 celdas cuadradas con unas dimensiones de 500 x 500 metros.
- Cada celda de la retícula constituye una unidad de cálculo.
- Paralelización de los cálculos en el clúster de computación del ISC de la UPNA.

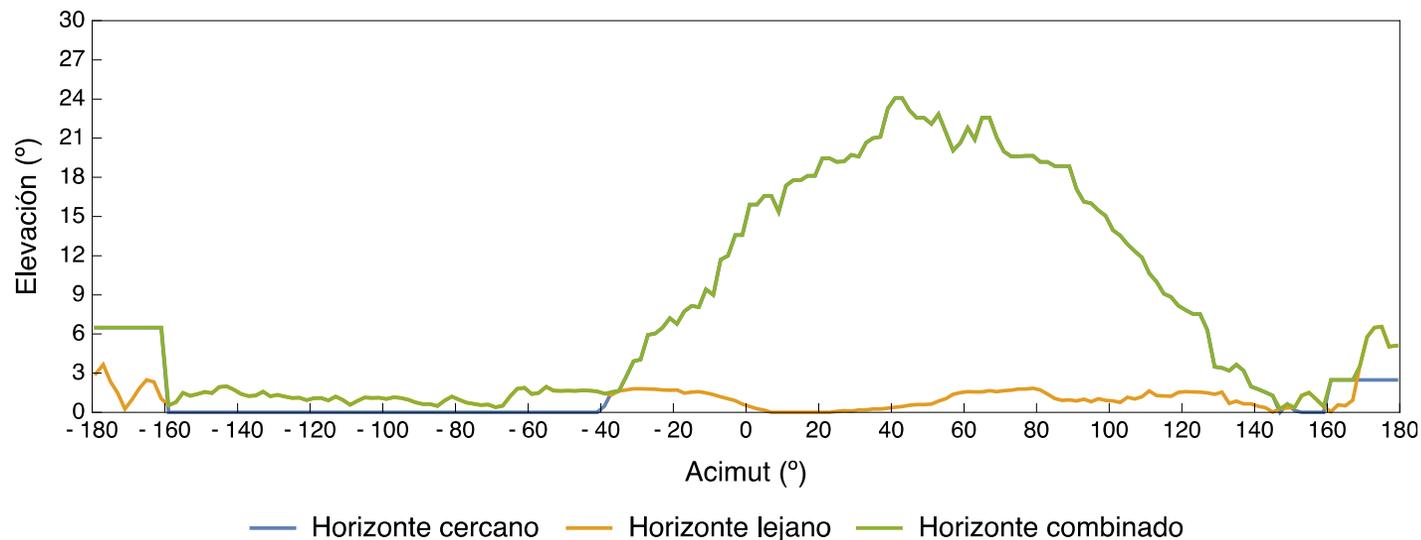
División del término municipal de Pamplona (sombreado en rojo) en 135 celdas de cálculo.



Metodología

→ Cálculo del horizonte visible

- Consideración del **efecto de los obstáculos del entorno** sobre las dos componentes de la **radiación solar**.
- Elevación del horizonte en cada píxel del MDS incluido en el término municipal de Pamplona:
 1. **Horizonte cercano**: para cada píxel considerando un radio de cálculo de 500 metros y un ángulo de paso de 1º.
 2. **Horizonte lejano**: para cada celda de cálculo de la retícula considerando la extensión del MDS y un ángulo de paso de 1º.
 3. **Combinación** de horizontes cercano y lejano para cada píxel (envolvente superior de los dos horizontes).



Perfil del horizonte visible desde un píxel del MDS. Se puede apreciar que la línea de horizonte resulta de la combinación de las líneas de horizonte lejano y cercano. De hecho, el horizonte cercano no se ve completamente ya que queda solapado por el horizonte combinado.

Metodología

→ Generación del mapa de factores de visión de cielo

Sky View Factor (SVF): cociente de la irradiancia difusa recibida por un plano inclinado entre la irradiancia difusa horizontal considerando una distribución isotrópica de la radiancia en el cielo.

$$SVF = \frac{G_{d,T}}{G_d} = \frac{1 + \cos \beta_p}{2}$$

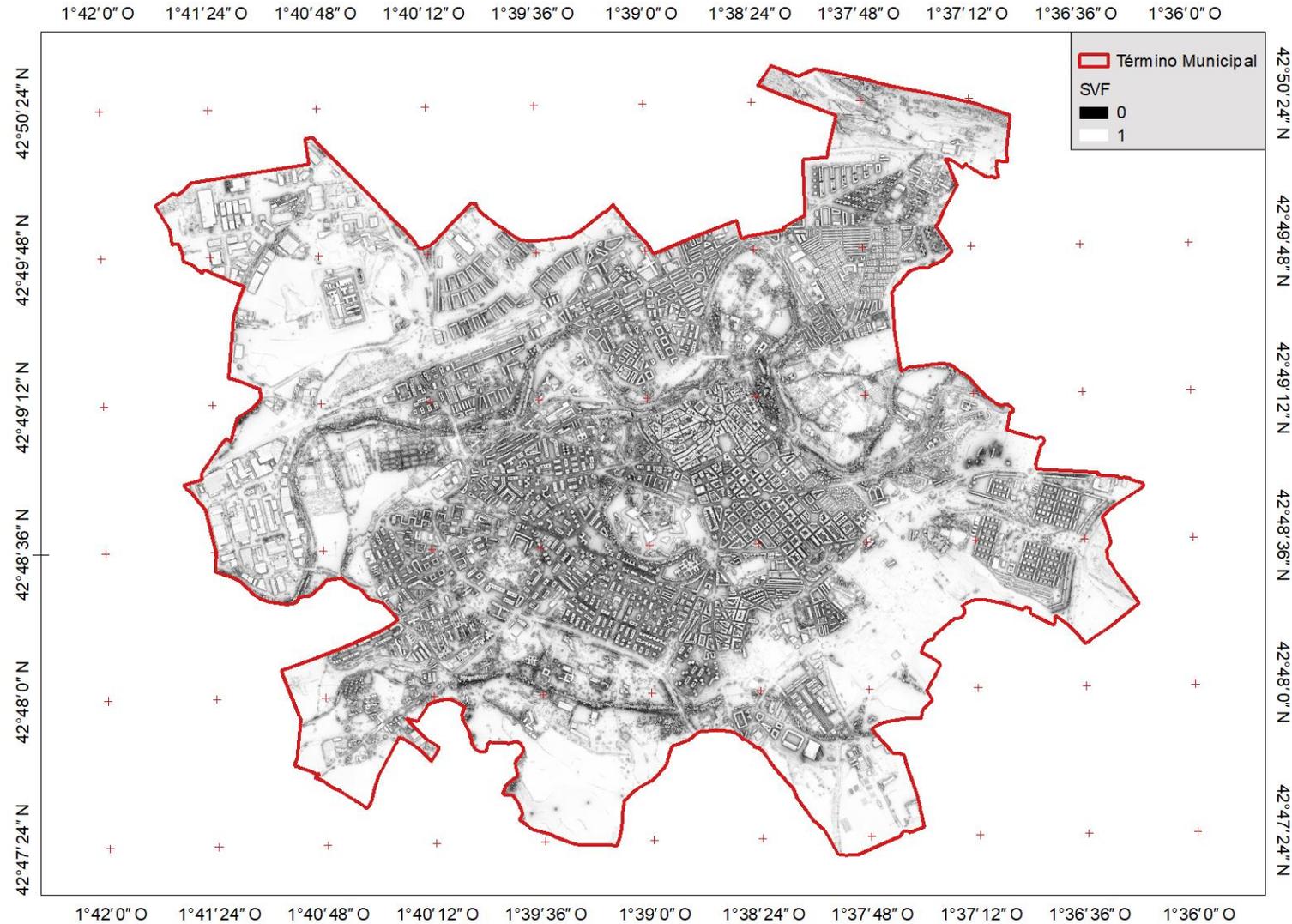
- Funciones:
 1. Permite considerar el **efecto de los obstáculos** sobre la **irradiancia difusa** recibida en cada píxel del MDS.
 2. Está directamente relacionado con la definición de las **islas de calor urbanas**.
- En **entornos obstruidos**, calculado mediante la expresión de Böhner y AntoniĆ (2009) modificada:

$$SVF_{obs} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left\{ \max \left[0, \cos \beta_p \cos^2 \alpha_i + \sin \beta_p \cos(\gamma_i - \gamma) (\pi/2 - \alpha_i - \sin \alpha_i \cos \alpha_i) \right] \right\}$$

³Böhner, J., AntoniĆ, O., 2009. Geomorphometry - Concepts, Software, Applications, Developments in Soil Science, Developments in Soil Science. Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)00008-1](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)00008-1)

Metodología

→ Generación del mapa de factores de visión de cielo



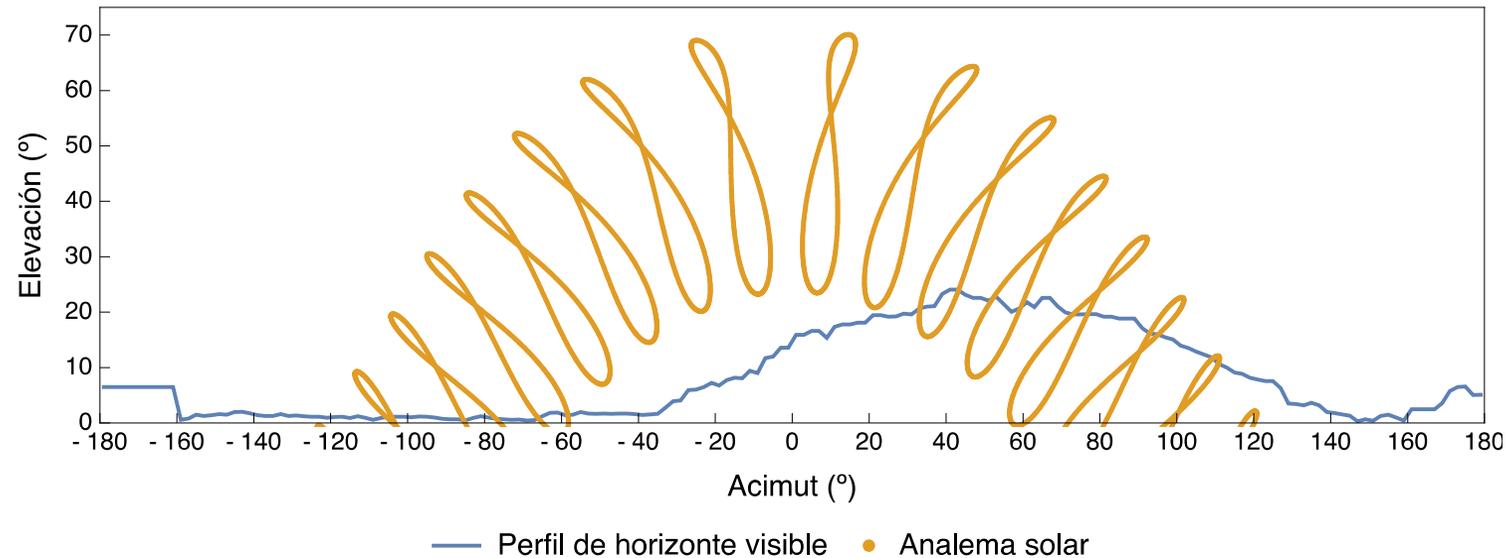
Mapa de factores de visión de cielo (SVF).

Metodología

→ Generación del mapa de radiación solar

CÁLCULO DE LA IRRADIANCIA DIRECTA

- **Relación geométrica** que tiene en cuenta el ángulo de cénit solar y el ángulo de incidencia entre el sol y el plano (píxel) en cuestión.
- Efecto de los obstáculos del entorno sobre la irradiancia directa incidente. Es decir, determinar en cada momento si los **obstáculos se interponen entre el sol y el píxel o no.**



Perfil del horizonte visible desde un píxel del MDS y representación de los analemas solares para cada hora UTC.

Metodología

→ Generación del mapa de radiación solar

CÁLCULO DE LA IRRADIANCIA DIFUSA Y REFLEJADA

MODELO DE CIELO ANISOTRÓPICO DE Perez et al. (1990)⁴

- Modificado para considerar el efecto de los obstáculos sobre la irradiancia difusa.

Expresión original:

$$G_{d,T} = G_d \left[(1 - F_1) \left(\frac{1 + \cos \beta_p}{2} \right) + F_1 \frac{a}{b} + F_2 \sin \beta_p \right]$$

Expresión modificada:

$$G_{d,T} = G_d \left[(1 - F_1) SVF_{obs} + F_1 \frac{a}{b} + F_2 \sin \beta_p \right]$$

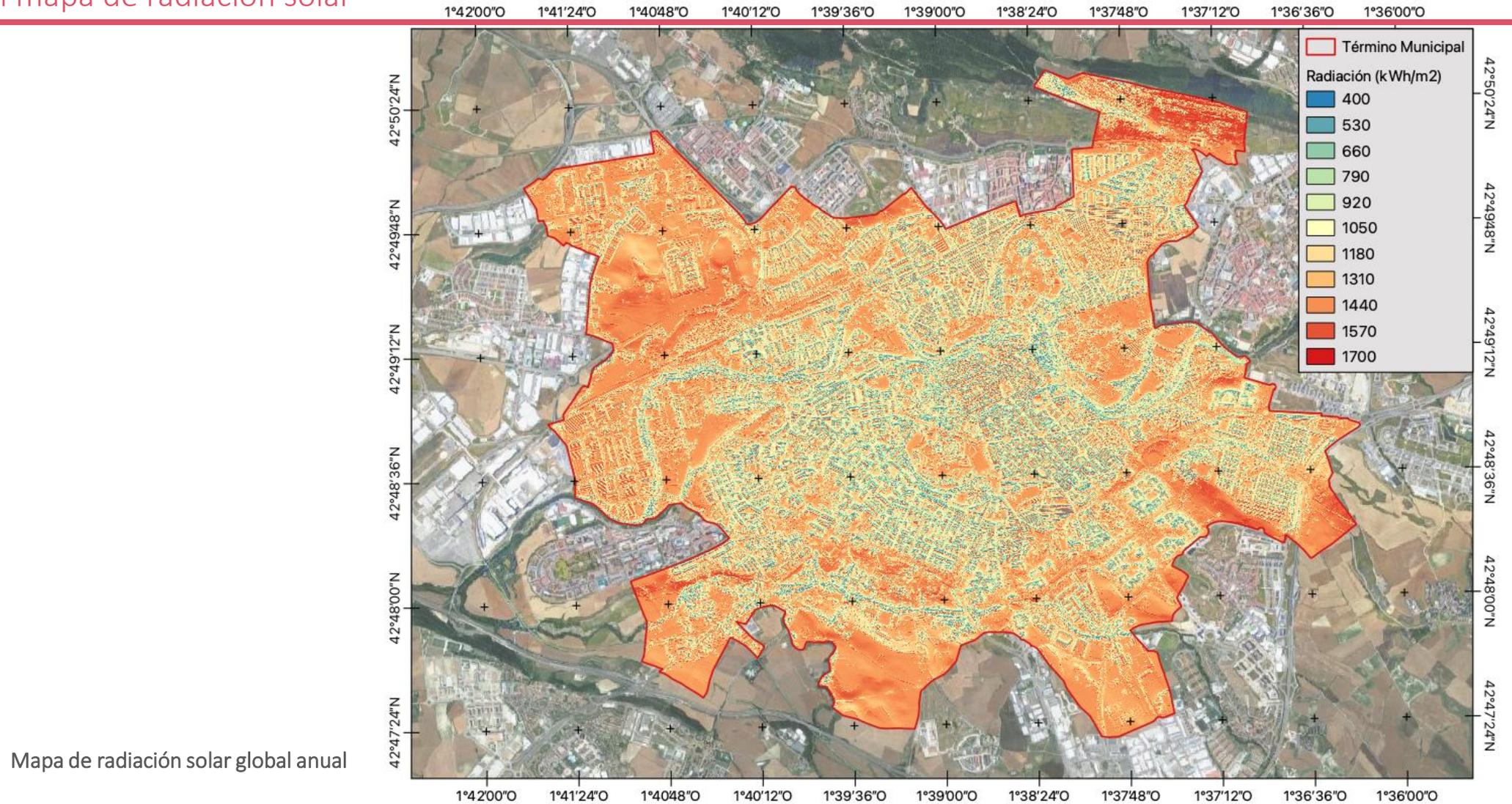
- Consideración de irradiancia reflejada lambertiana con un albedo constante de 0.3.

$$G_{r,T} = G(1 - SVF_{obs})$$

⁴Perez, R., Ineichen, P., Seals, R., Michalsky, J.J., Stewart, R., 1990. Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. Sol. Energy 44, 271–289. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(90\)90055-H](https://doi.org/10.1016/0038-092X(90)90055-H)

Metodología

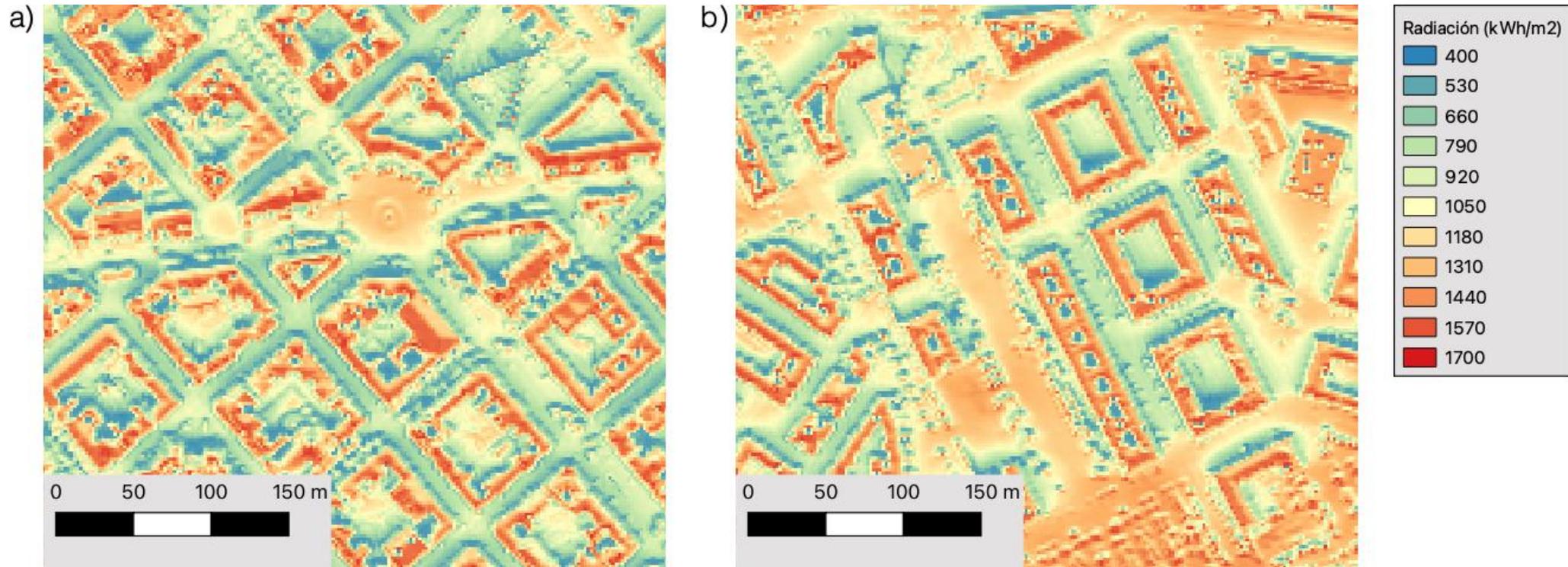
→ Generación del mapa de radiación solar



Mapa de radiación solar global anual

Metodología

→ Generación del mapa de radiación solar



Detalle del mapa de radiación solar global anual en dos zonas de Pamplona: el Segundo Ensanche (a) y Rochapea (b).

Metodología

→ Cálculo del mapa de estimación de la producción fotovoltaica

PARÁMETROS DEL MODELO CIRCUITAL

- Módulo monocristalino de células partidas con 5 busbar.
- Modelo de diodo de 5 parámetros para determinar la densidad de potencia máxima para distintas condiciones de **temperatura e irradiancia** (Villalba et al., 2009)⁵

Potencia pico (Wp)	I_{cc} (A)	V_{oc} (V)	I_{mp} (A)	V_{mp} (V)	$W \cdot m^{-2}$
157.5	5.02	40.7	4.745	33.2	186.68

PÉRDIDAS POR REFLEXIÓN Y ABSORCIÓN

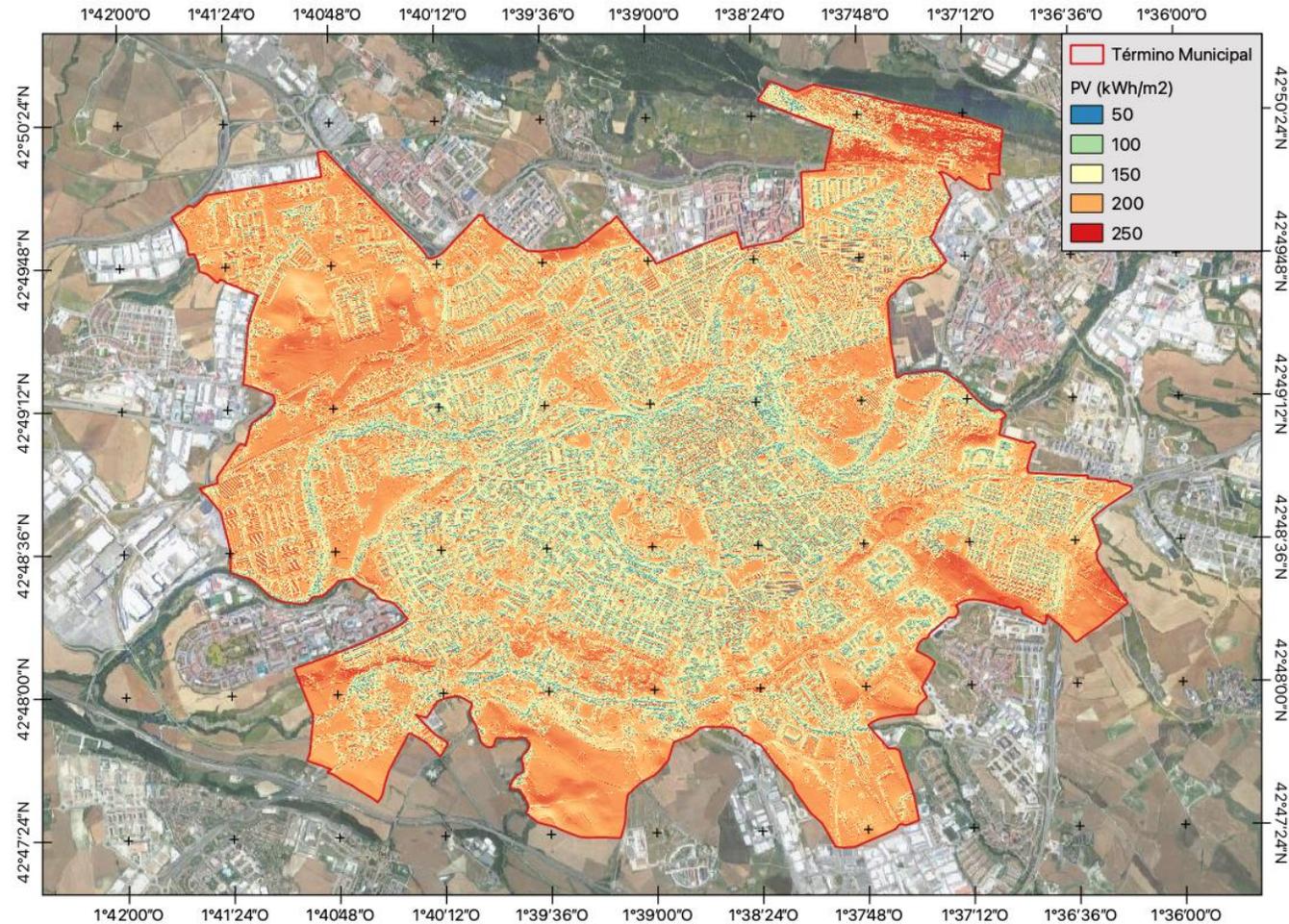
- Producidas cuando la radiación no incide perpendicularmente a la superficie de captación.
- Calculadas según la propuesta de Martín y Ruiz (2002)⁶.

⁵Villalba, M.G., Gazoli, J.R., Filho, E.R., 2009. Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays. IEEE Trans. Power Electron. 24, 1198–1208. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2009.2013862>

⁶Martín, N., Ruiz, J.M., 2002. A new model for PV modules angular losses under field conditions. Int. J. Sol. Energy 22, 19–31. <https://doi.org/10.1080/01425910212852>

Metodología

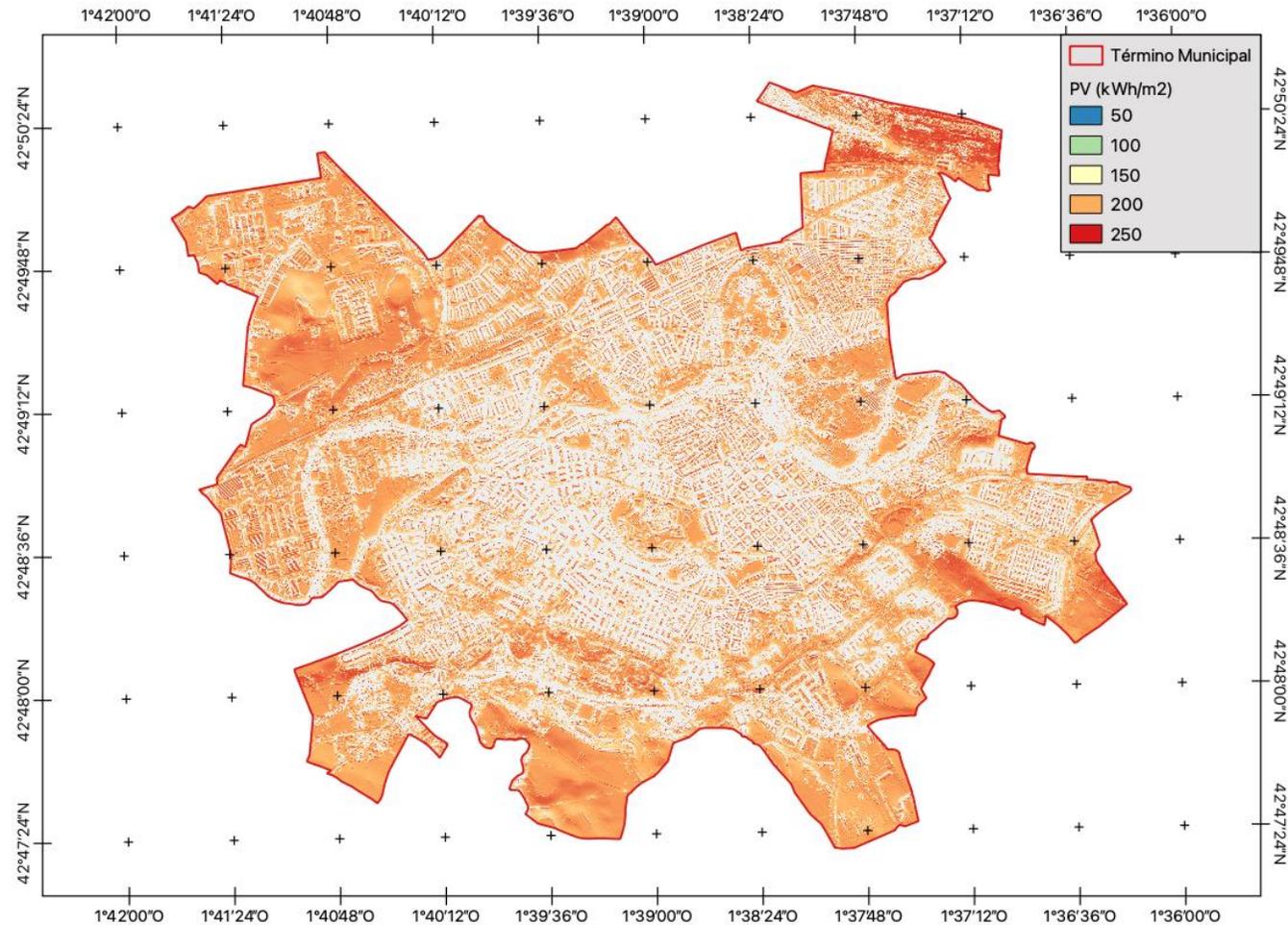
→ Cálculo del mapa de estimación de la producción fotovoltaica



Mapa de densidades de energía eléctrica fotovoltaica anual de salida por píxel.

Metodología

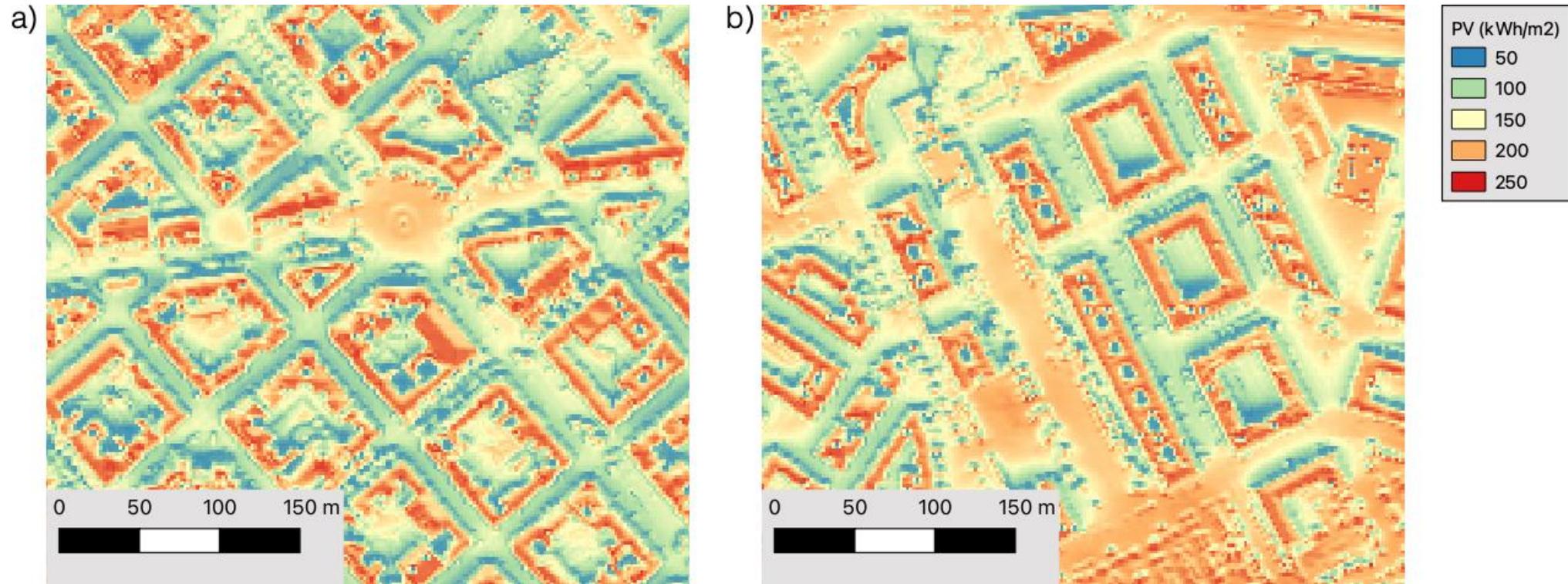
→ Cálculo del mapa de estimación de la producción fotovoltaica



Mapa de densidades de energía eléctrica fotovoltaica anual de salida por píxel de interés.

Metodología

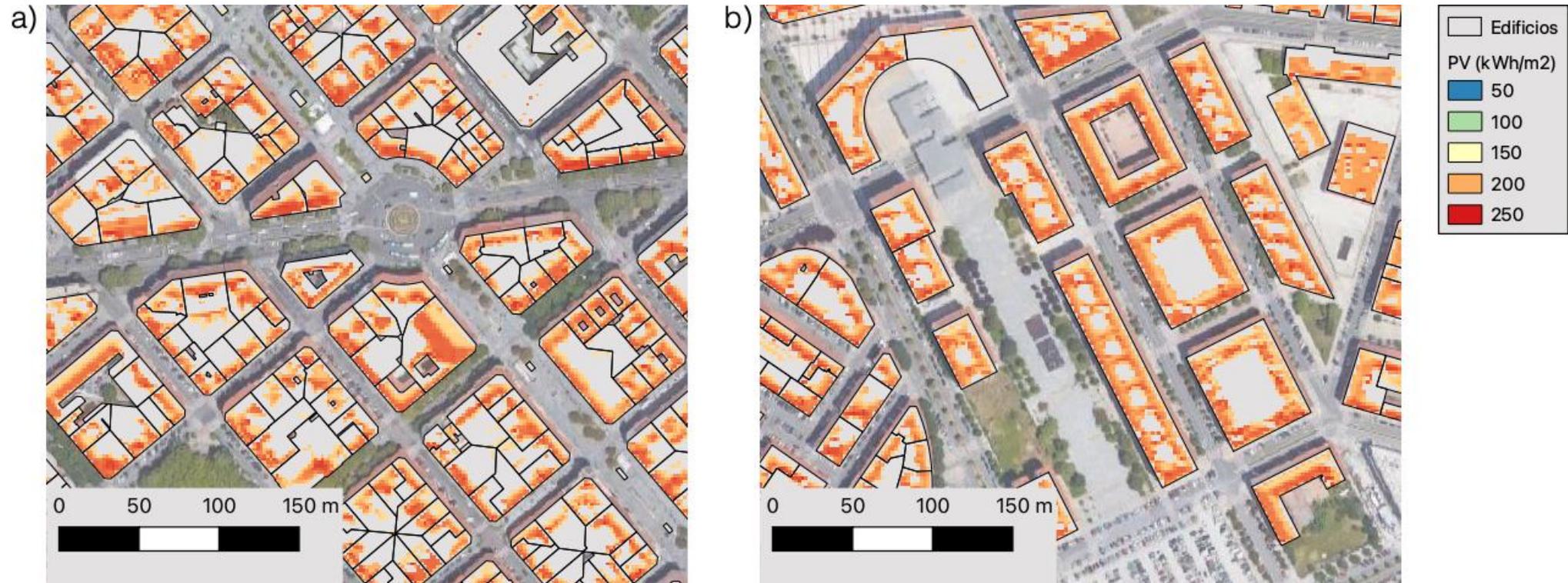
→ Cálculo del mapa de estimación de la producción fotovoltaica



Detalle del mapa de densidades de energía eléctrica fotovoltaica anual de salida por píxel en dos zonas de Pamplona: el Segundo Ensanche (a) y Rochapea (b).

Metodología

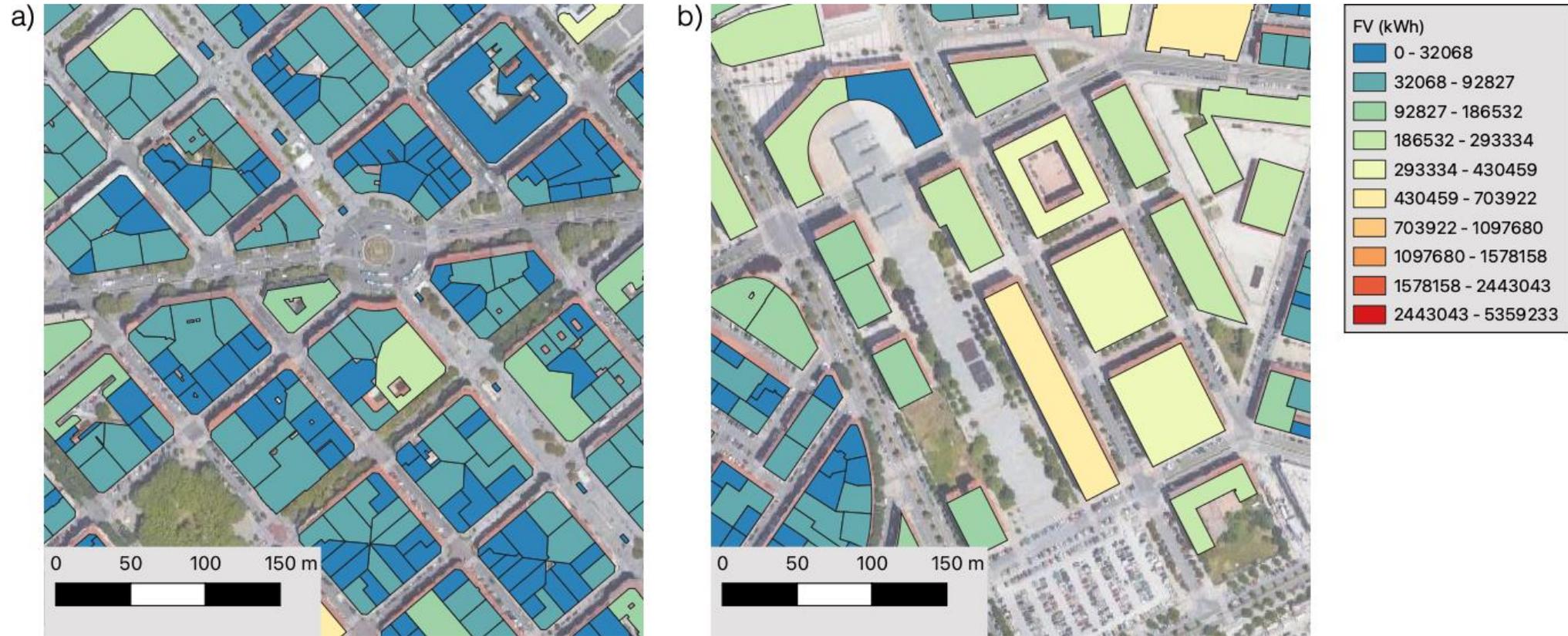
→ Cálculo del mapa de estimación de la producción fotovoltaica



Detalle del mapa de densidades de energía eléctrica fotovoltaica anual de salida por píxel de interés en dos zonas de Pamplona: el Segundo Ensanche (a) y Rochapea (b).

Metodología

→ Cálculo del mapa de estimación de la producción fotovoltaica



Detalle del mapa de producciones fotovoltaicas anuales por edificios en dos zonas de Pamplona: el Segundo Ensanche (a) y Rochapea (b).

Metodología

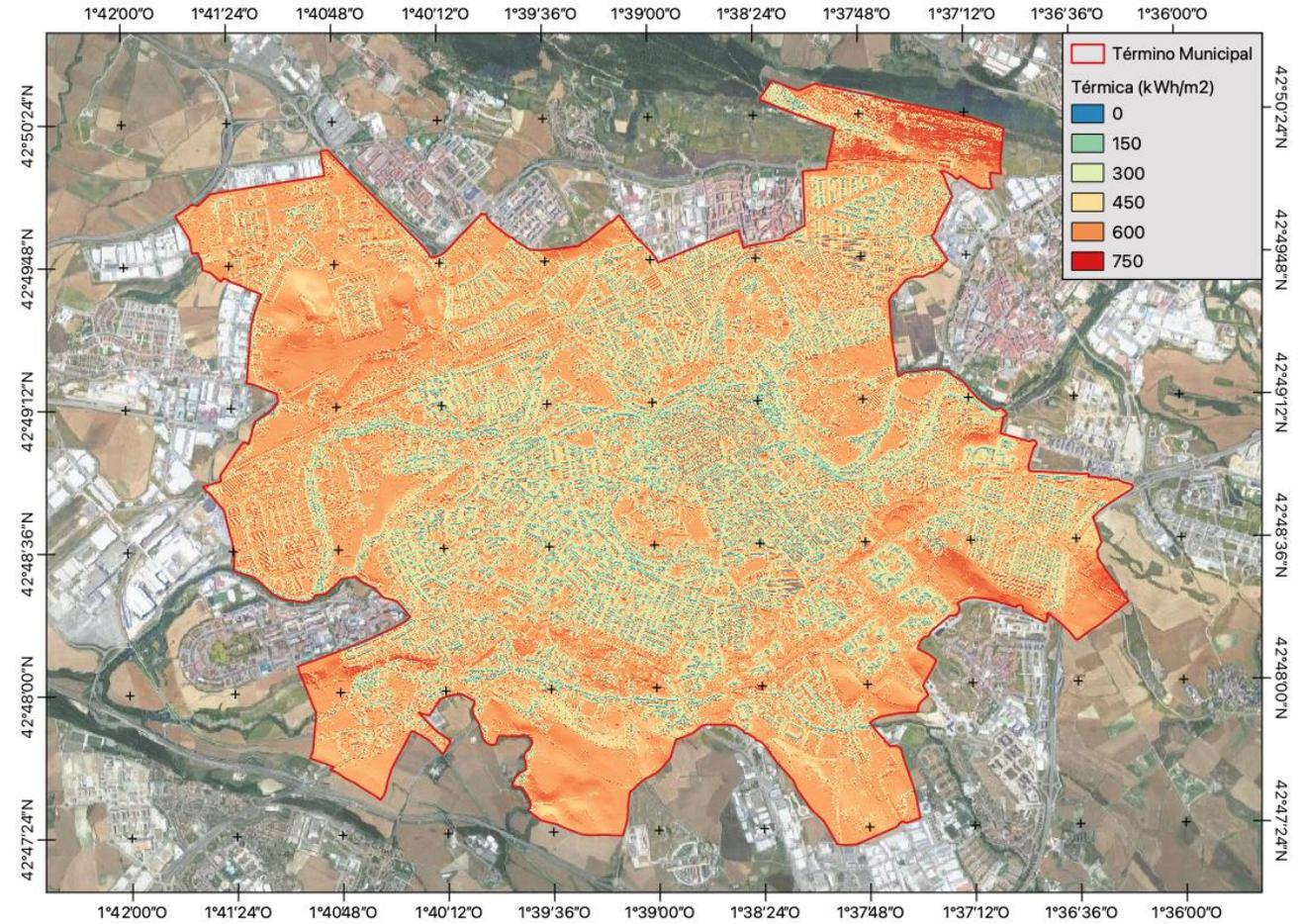
→ Cálculo del mapa de estimación de la producción térmica

- Estimación del potencial solar térmico de baja temperatura.
- Mediante la siguiente expresión:

$$\dot{Q}_{cap} = \left[\eta_0 - a_1 \frac{T_m - T_a}{G_T} - a_2 \frac{(T_m - T_a)^2}{G_T} \right] A_{cap} G_T$$

- Considerando una temperatura media del fluido (T_m) de 50°C.

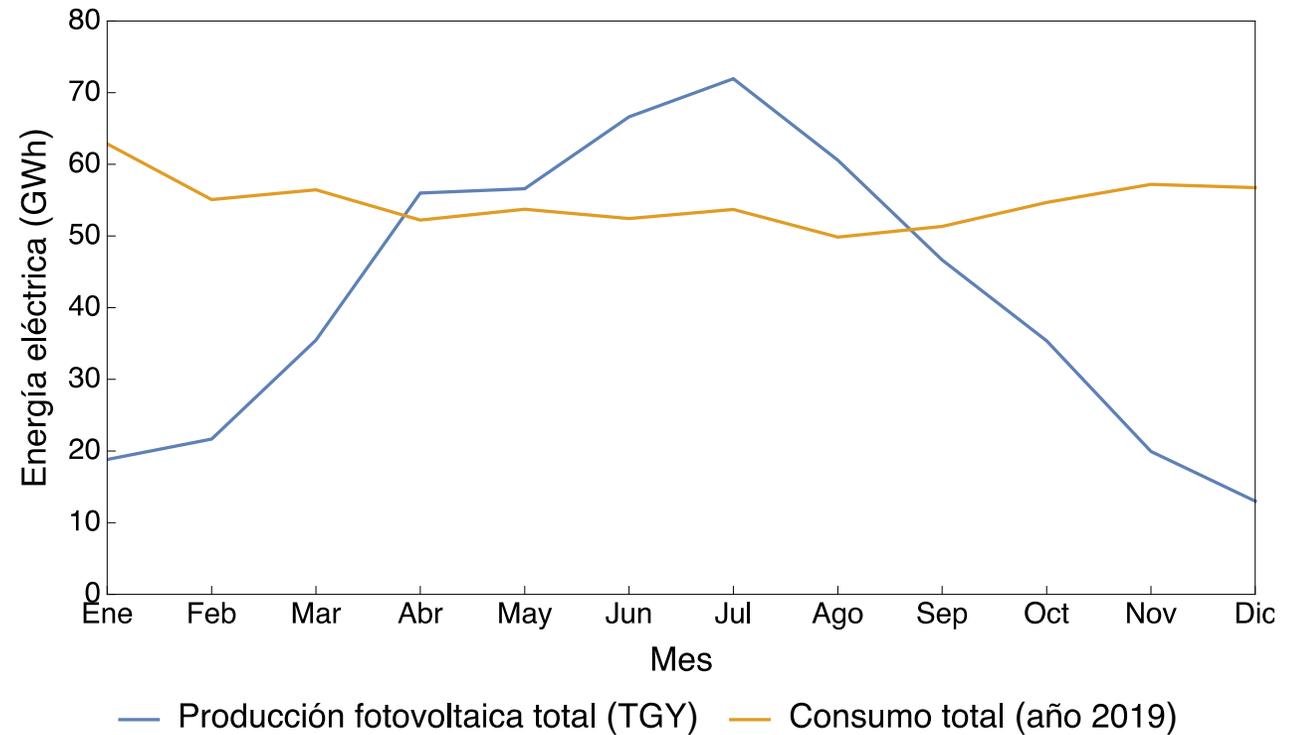
Mapa de densidades de energía térmica anual de salida por píxel



Resultados

→ Potencial fotovoltaico

- Producción FV total anual: **502.65 GWh**.
- Cobertura anual de la demanda: **76.6%**:
 - Considerando un consumo anual total de electricidad de 656.41 GWh.
 - Si la oferta y la demanda de energía solar renovable estuvieran perfectamente acopladas en el tiempo.
 - El mayor consumo de energía eléctrica no coincide con las horas de mayor radiación solar.

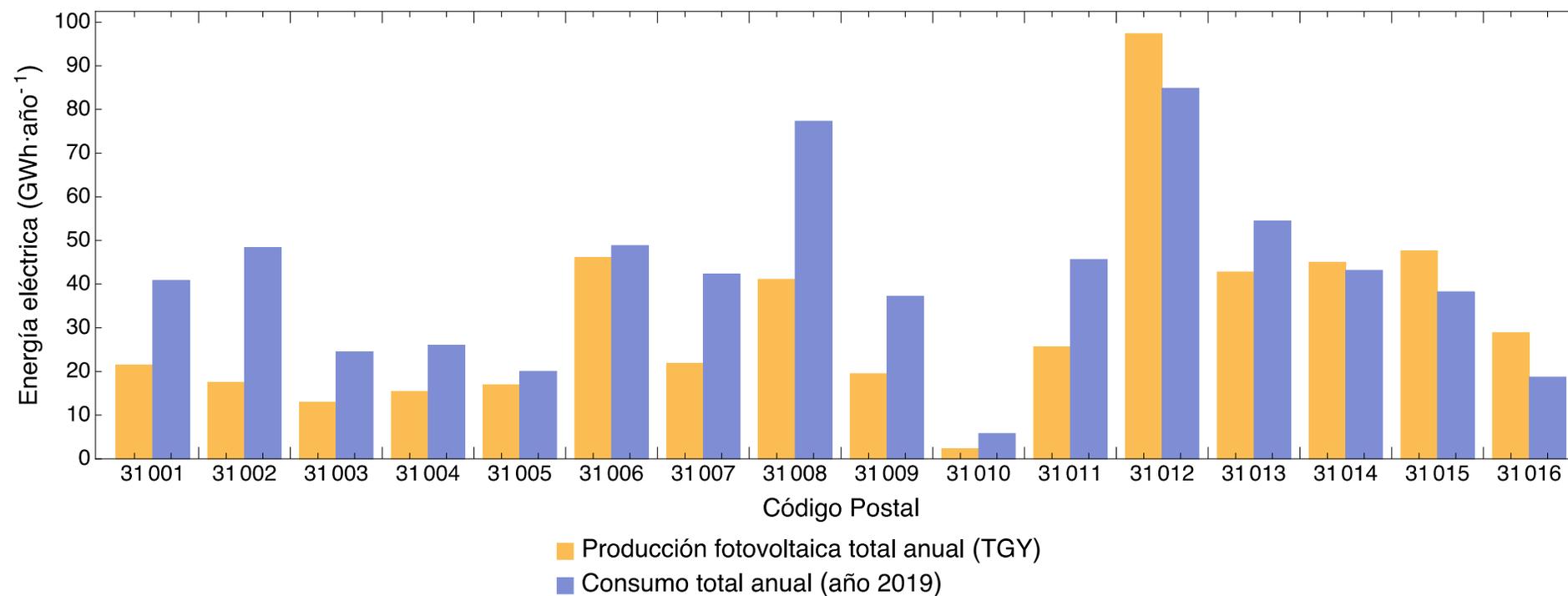


Estimación de producción FV mensual y consumo mensual de energía eléctrica correspondiente al año 2019 para ciudad de Pamplona.

Resultados

→ Potencial fotovoltaico

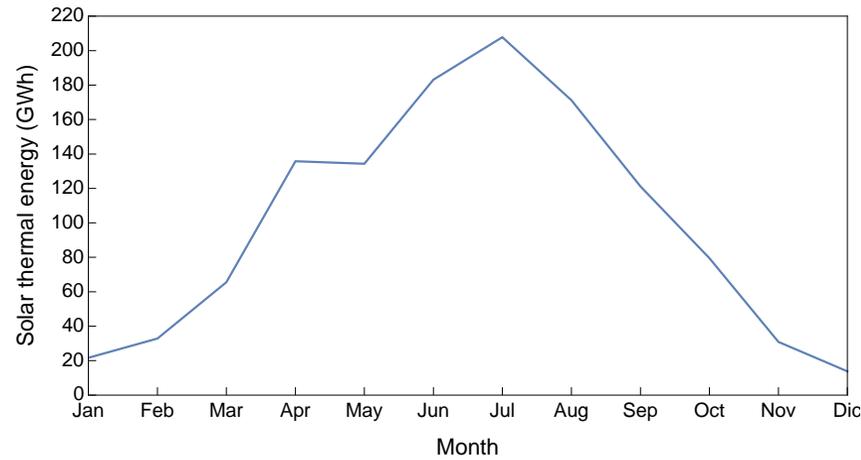
- El potencial de producción fotovoltaica supera el consumo de electricidad en 4 de los 16 distritos postales.
- Destaca el alto potencial de producción del distrito postal **31012**, que concentra la mayor parte del **tejido industrial**.



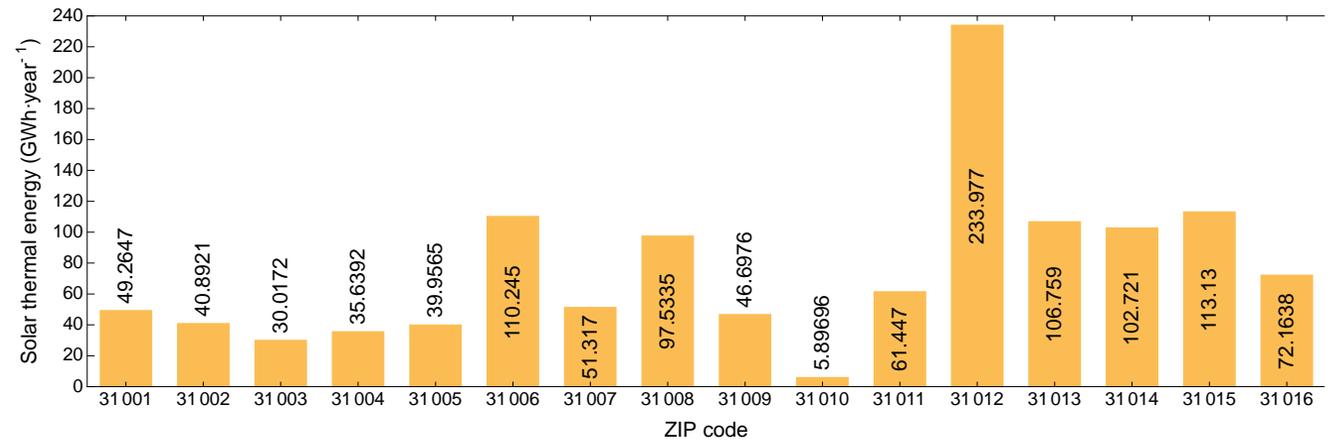
Resultados

→ Potencial solar térmico

- Producción total anual de energía solar térmica: **1197,69 GWh**.
- Cobertura de la demanda térmica anual: **99,1%**:
 - Considerando un consumo total anual de gas natural de 1208 GWh.
 - Si la oferta y la demanda de energía solar renovable estuvieran perfectamente acopladas en el tiempo.
 - El mayor consumo de energía térmica no coincide con las horas de mayor radiación solar.



Producción solar térmica mensual en la ciudad de Pamplona.



Producción solar térmica anual para los distritos postales de la ciudad de Pamplona.

Conclusiones

→ Mapa solar de Pamplona

- Herramienta fundamental para la planificación energética de la ciudad y estímulo para la implantación de instalaciones solares individuales.
- Se estimó una producción total para toda la ciudad de:
 - **Energía eléctrica fotovoltaica: 502.65 GWh.**
 - **Energía solar térmica: 1197.69 GWh.**
- Se estimó el potencial solar para la inclinación y orientación actuales de las superficies de los tejados de los edificios.
- Las futuras líneas de trabajo se centran en:
 - Determinar la **disposición óptima de los paneles FV y térmicos** instalados en las cubiertas planas disponibles.
 - Estimación del **potencial solar de las fachadas de la ciudad.**

Mapeo del potencial solar en entornos urbanos

→ ¿Dónde producir energía solar fotovoltaica?

TERRENOS AGRÍCOLAS



VS.

ENTORNOS URBANOS



Mapeo del potencial solar en entornos urbanos

→ Una alternativa mixta: los sistemas AGRIVOLTAICOS





Cambio climático: aprender y compartir



Eskerrik asko
Muchas gracias