

# Potencial d'aprofitament solar fotovoltaic en les cobertes dels edificis d'Andorra. Informe metodològic

Oriol Travesset-Baro, Marc Vilella

*Andorra Recerca + Innovació*

---

## Resum

El present document detalla la metodologia seguida per a l'obtenció dels resultats mostrats en el mapa d'aprofitament solar fotovoltaic de les cobertes dels edificis d'Andorra. Aquest mapa presenta el potencial de generació elèctrica mitjançant panells solars fotovoltaics en gairebé la totalitat d'edificis del país<sup>1</sup>, així com indicadors econòmics i mediambientals de les hipotètiques instal·lacions.

*Darrera actualització: abril 2023*

---

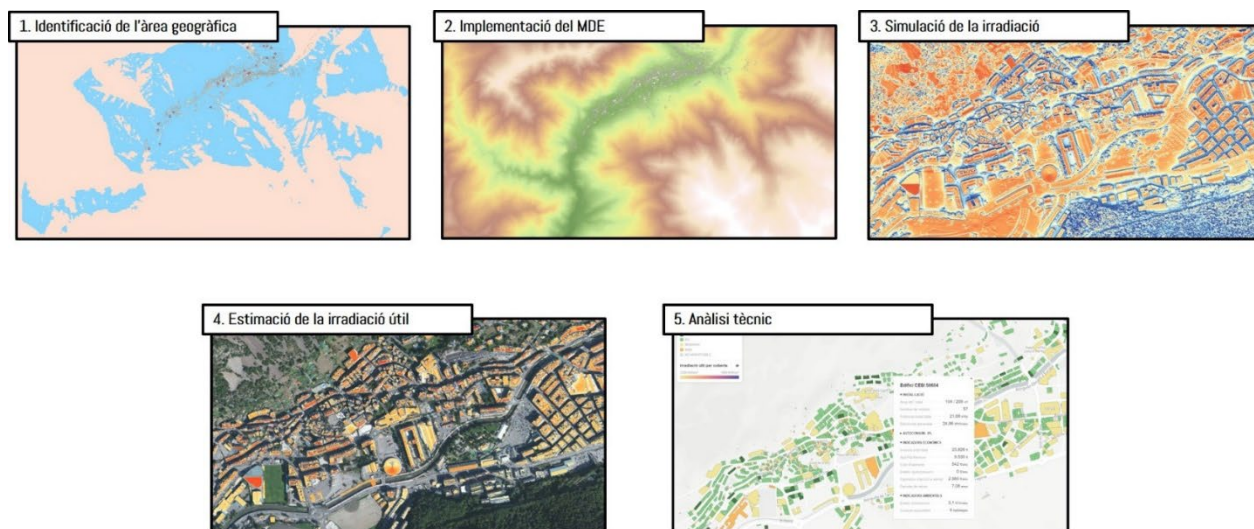
## 1. Metodologia de càlcul

Un dels aspectes fonamentals en l'anàlisi del potencial solar és la caracterització del terreny mitjançant models digitals d'elevacions (MDE). A diferència d'altres estudis també centrats en l'àmbit urbà (Brito et al., 2012; Cellura et al., 2012; Redweik et al., 2013) però ubicats en zones planes, la influència de la topografia en el cas dels Pirineus és determinant en l'obtenció dels resultats finals (Travesset-Baro et al., 2017). En aquest sentit, és important caracteritzar adequadament les muntanyes per tal de representar les ombres que aquestes provoquen i, en conseqüència, la limitació provocada en el nombre d'hores d'insolació que s'obtindrà en la zona d'estudi.

En el cas d'Andorra, per tal de representar el terreny, es parteix d'un MDE de resolució 15x15 m (Govern d'Andorra, 2003), adequat per captar l'efecte de les muntanyes sobre la irradiació però insuficient per representar les cobertes dels edificis. Així doncs, per representar de forma acurada els edificis, és necessari treballar a resolucions superiors, havent de gestionar arxius molt pesats. Per tal d'evitar simulacions molt costoses, s'ha dividit Andorra en diferents zones d'estudi. És important limitar al màxim la zona d'estudi però assegurant d'incloure en el MDE l'àrea suficient que permeti captar l'efecte de l'orografia. La Figura 1 presenta un diagrama que resumeix la metodologia desenvolupada per construir el mapa d'aprofitament solar fotovoltaic de les cobertes dels edificis d'Andorra.

---

<sup>1</sup> 11109 edificis (segons codi CESI) representats en 15363 polígons (1 polígon per coberta)



**Figura 1.** Metodologia desenvolupada per construir el mapa d'aprofitament fotovoltaic

A continuació es detallen les diferents fases del procés realitzat.

### 1.1 Identificació de l'àrea geogràfica

Amb l'objectiu d'evitar simulacions molt costoses, el primer pas consisteix en dividir el territori en diferents zones. En el cas d'Andorra, la zonificació consisteix en set zones<sup>2</sup> amb els seus respectius edificis i MDE's. Tot i la importància d'acotar les zones d'estudi, cal remarcar que el terreny representat ha d'incloure l'àrea suficient que permeti tenir en compte les ombres provocades per l'orografia.

L'àrea d'interès a considerar en el MDE s'ha determinat mitjançant el mètode *viewshed*<sup>3</sup>, el qual permet identificar les zones d'un ràster amb visió directa respecte un o varis punts. D'aquesta manera, i tenint en consideració la trajectòria solar, s'obté la zona a incloure en el MDE tenint en compte tant el terreny com els edificis. La Figura 2 mostra el *viewshed* de la Vall Central amb el qual s'ha delimitat aquesta zona d'estudi. El color blau representa la zona visible des dels observadors (punts vermells) ubicats en edificis.

<sup>2</sup> Sant Julià, Vall central, Vall d'Orient principal, Vall D'Orient Pas, Vall d'Orient Incles, Vall Nord principal, Vall Nord Nord

<sup>3</sup> <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/viewshed-2.htm>

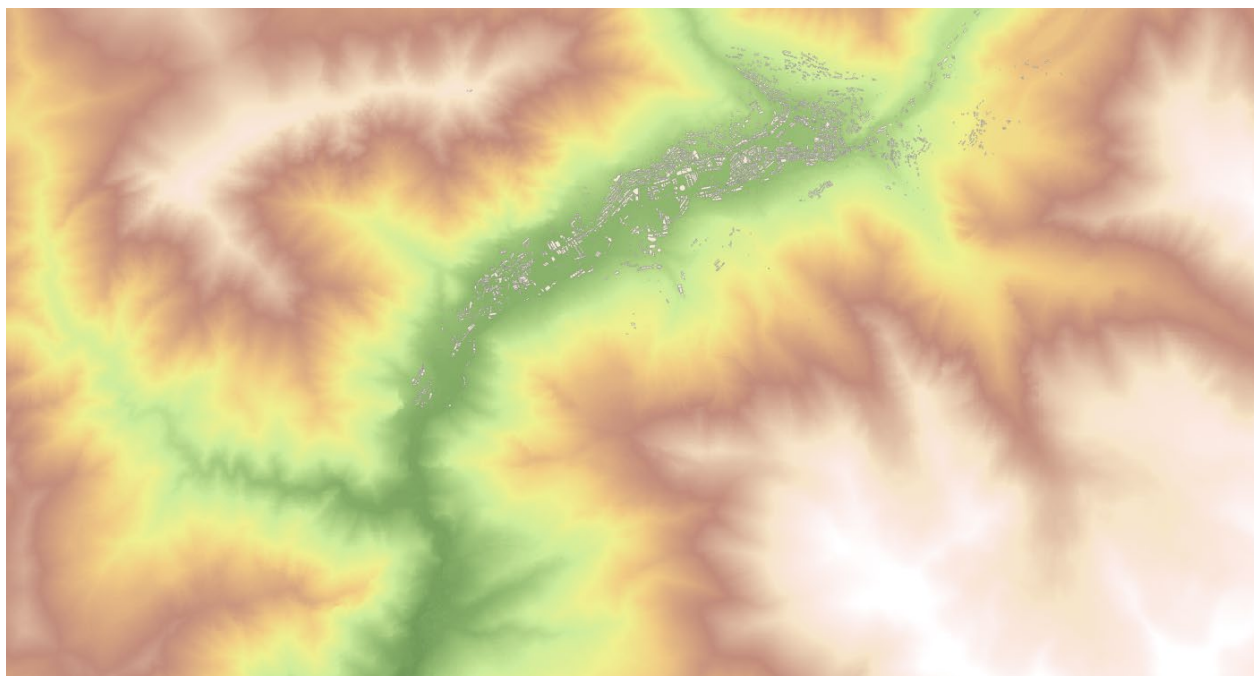


**Figura 2.** *Viewshed* de la Vall Central

## 1.2 Implementació del MDE

Basant-se en els límits establerts en el punt anterior, es construeix el MDE d'alta resolució representant els edificis i la orografia de forma acurada. Tot i que un MDE de resolució 15x15 m és suficient per representar l'orografia, les infraestructures urbanes requereixen de major resolució. En aquest model s'utilitzen dades LiDAR (*Light Detection And Ranging*)<sup>4</sup> amb una densitat d'1 punt/m<sup>2</sup> amb les que s'ha construït un MDE d'1x1 m de resolució, la mínima per representar de forma acurada característiques de les cobertes com el pendent, l'orientació o estructures adjacents i vegetació (Kodysh et al., 2013). La Figura 3 mostra el MDE de la Vall Central representant tant les edificacions de la zona urbana com les muntanyes que hi provoquen ombres.

<sup>4</sup> Font de les dades: <https://www.cartografia.ad/dades-lidar>



**Figura 3.** MDE d'alta resolució i edificis de la Vall Central

### 1.3 Simulació de la irradiació

Per calcular la insolació de les àrees d'estudi s'ha utilitzat l'eina *Solar Analyst* d'ArcGIS (Fu and Rich, 1999). Aquesta estima el valor d'irradiació en cada cel·la del MDE tenint en compte la trajectòria solar en la latitud estudiada així com les ombres provocades per la resta de cel·les del model.

La disponibilitat de dades històriques de producció de les instal·lacions fotovoltaiques existents<sup>5</sup> ha permès ajustar els paràmetres de simulació per representar de forma més acurada les condicions d'Andorra. A partir de les produccions anuals<sup>6</sup> de 20 instal·lacions ubicades a la Vall Central repartides en 24 cobertes (polígons), s'ha ajustat la transmissivitat (paràmetre *transmittivity*).

La transmissivitat és una propietat de l'atmosfera que s'expressa com la relació de l'energia (mitjana per a totes les longituds d'ona) que arriba a la superfície de la terra respecte a la que es rep en el límit superior de l'atmosfera (extraterrestre). Els valors varien de 0 (sense transmissió) a 1 (transmissió completa). Habitualment s'observen valors de 0,6 o 0,7 per a condicions de cel molt clar i 0,5 només per a un cel generalment clar<sup>7</sup>. En el cas de la Vall Central, el valor que minimitza el diferencial entre les hores solar pic (HSP) anuals simulades i les reals és 0,55. En la Taula 1 es presenten els valors dels paràmetres de simulació aplicats a les set zones del país considerades.

<sup>5</sup> Comunicació personal de l'Oficina de l'Energia i del Canvi Climàtic (OECC)

<sup>6</sup> Dades de l'any 2020

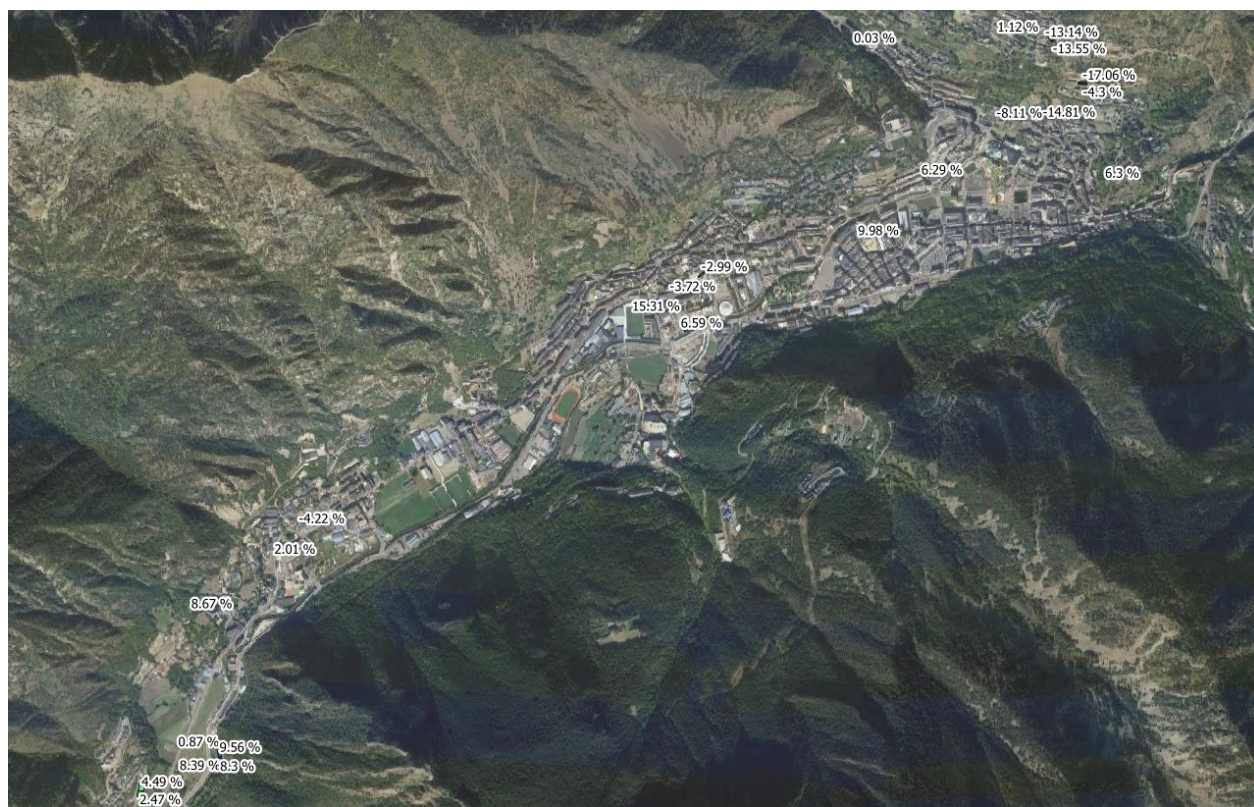
<sup>7</sup> Més informació a <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/area-solar-radiation.htm>



<i>Time configuration</i>	<i>Whole year</i>
<i>Year</i>	2020
<i>Hour interval</i>	1
<i>Sky size resolution</i>	200
<i>Calculation directions</i>	32
<i>Zenith divisions</i>	8
<i>Azimuth divisions</i>	8
<i>Diffuse model type</i>	<i>Uniform overcast sky</i>
<i>Diffuse proportion</i>	0,3
<i>Transmittivity</i>	0,55

**Taula 1.** Valors dels paràmetres utilitzats en les simulacions

La Figura 4 mostra els diferencials entre les HSP simulades i les reals basades en les produccions de l'any 2020 de la mostra d'instal·lacions de la Vall Central. Les majors sobreestimacions i subestimacions són del 15,3% i del -17,1%, respectivament. Tenint en compte tota la mostra, de mitjana, les simulacions sobreestimen les HSP en un 0,35%.



**Figura 4.** Diferencial entre les HSP simulades i les reals

#### 1.4 Estimació de la irradiació útil

Un cop simulada la irradiació anual en la totalitat del terreny que inclou la zona d'estudi, s'extreu la irradiació d'interès mitjançant una capa vectorial de cobertes. Aquesta parteix de la capa

d'edificis CESI<sup>8</sup> (Codi Edifici Seguretat Instal·lacions) la qual s'ha segregat per tal de poder separar cobertes molt diferents dins d'un mateix edifici.

A la irradiació anual simulada en els edificis s'ha aplicat un seguit de filtres per tal d'identificar la superfície aprofitable de cada coberta així com la irradiació útil a utilitzar en hipotètiques instal·lacions fotovoltaiques. Els límits establerts d'irradiació mínima, pendent màxim i orientació es presenten en la Taula 2.

---

<sup>8</sup> Més informació a [https://www.mediambient.ad/images/stories/PDF/Instruccions\\_trobar\\_CESI.pdf](https://www.mediambient.ad/images/stories/PDF/Instruccions_trobar_CESI.pdf)

---

**Irradiació**  $\geq 1200 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{any}$

**Pendent**  $\leq 80^\circ$

$337,5^\circ \geq \text{Orientació}^9 \geq 22,5^\circ$

---

**Taula 2.** Filtres per identificar l'àrea i irradiació útil

La Figura 5 mostra, en una petita part de la Vall Central, la irradiació anual simulada i la útil un cop aplicats els filtres així com el nivell de detall en el que s'han representat les cobertes dels diferents edificis.



**Figura 5.** Irradiació anual total simulada (esquerra) i irradiació útil (dreta) sobre la capa de cobertes

### 1.5 Anàlisi tècnic

La metodologia d'estimació del potencial d'aprofitament fotovoltaic conclou amb el càlcul de la conversió d'irradiació anual útil mitjana sobre cada coberta al potencial de generació elèctrica. A banda de la producció estimada es calculen també diferents indicadors econòmics (cost d'inversió i operació, ingressos, període de retorn i benefici) i ambientals (estalvi d'emissions de  $\text{CO}_2$  i equivalència de la producció en nombre d'habitatges). En la integració dels càlculs econòmics s'han tingut en compte els ajuts proporcionats pel programa Renova 2023<sup>10,11</sup> en vigor des del 23/03/2023 i fins al 17/11/2023 o exhauriment de la disponibilitat pressupostària. Les característiques tècniques i els costos econòmics de les instal·lacions caracteritzades s'han establert en base al criteri de l'empresa SUD Pirineus S.L. i l'Oficina de l'Energia i del Canvi Climàtic d'Andorra. La Taula 3 presenta els paràmetres tècnics i econòmics considerats en els càlculs.

---

<sup>9</sup> Aquest filtre únicament s'aplica en pendents superiors als  $15^\circ$

<sup>10</sup> Més informació a <https://www.mediambient.ad/renova>

<sup>11</sup> Bases a [https://www.bopa.ad/bopa/035040/Documents/GB20230317\\_14\\_17\\_59.pdf](https://www.bopa.ad/bopa/035040/Documents/GB20230317_14_17_59.pdf)

Mòduls fotovoltaics	1,8 m <sup>2</sup>	380 Wp
Eficiència de les instal·lacions	83%	
Temps de vida de les instal·lacions	25 anys	
Cost de les instal·lacions	<b>Potència (kWp)</b>	<b>€/Wp</b>
	P≤2	1,50
	2>P≤6	1,30
	6>P≤20	1,15
	20>P≤50	1,10
	P>50	1,00
Cost d'operació* P≤50 kWp	25	€/kWp•any
Cost d'operació* P>50 kWp	18	€/kWp•any

**Taula 3.** Paràmetres tècnics i econòmics considerats en els càlculs. \*Inclou manteniment, assegurança i compensació a les distribuïdores

Els ingressos per injecció a la xarxa de l'electricitat generada es calculen en base al preu actual de la Tarifa C<sup>12</sup> i assumint un increment d'un 1,5% anual. L'estalvi aportat per l'electricitat autoconsumida es calcula en base a un preu de 0,153 €/kWh tenint en compte el preu actual de la Tarifa Blava Domèstica i una llar tipus d'una família de quatre persones<sup>13</sup>. En aquest cas, l'increment del preu durant el temps de vida de les instal·lacions s'estableix també en un 1,5% anual.

Les emissions de CO<sub>2</sub> anuals evitades per les instal·lacions fotovoltaïques es calculen tenint en compte un factor d'emissions del mix elèctric andorrà de 124 gCO<sub>2eq</sub>/kWh (Govern d'Andorra, 2020). L'equivalència de la producció en nombre d'habitatges es calcula tenint en compte el consum elèctric mitjà d'un habitatge a Andorra<sup>14</sup>.

### 1.5.1 Cartografia publicada

L'aplicació desenvolupada presenta dos capes que aporten informació a diferents escales espacials. La capa "Potencial d'aprofitament fotovoltaic", mostrada en la Figura 6, presenta la informació agrupada a escala d'edifici bastant-se en el codi CESI i inclou els indicadors econòmics i ambientals. A nivell visual, els edificis es categoritzen segons el seu potencial d'aprofitament (veure Taula 4), tenint en compte el seu període de retorn (PR) i que el 100% de l'electricitat es injectada a la xarxa. Els edificis categoritzats com "No aprofitable" són aquells en els que un cop aplicats els filtres descrits en la Secció 1.4, no disposen de superfície útil per instal·lar ni un mòdul fotovoltaic.

<b>Molt bo</b>	PR < 6,5
<b>Bo</b>	6,5 ≤ PR < 8

<sup>12</sup> 0,1104 €/kWh (Decret 530/2022, del 14-12-2022, que fixa la tarifa de retribució de l'electricitat injectada a la xarxa en el context de les previsions de l'article 20.3.b.ii i de l'article 22.3 de la Llei 21/2018)

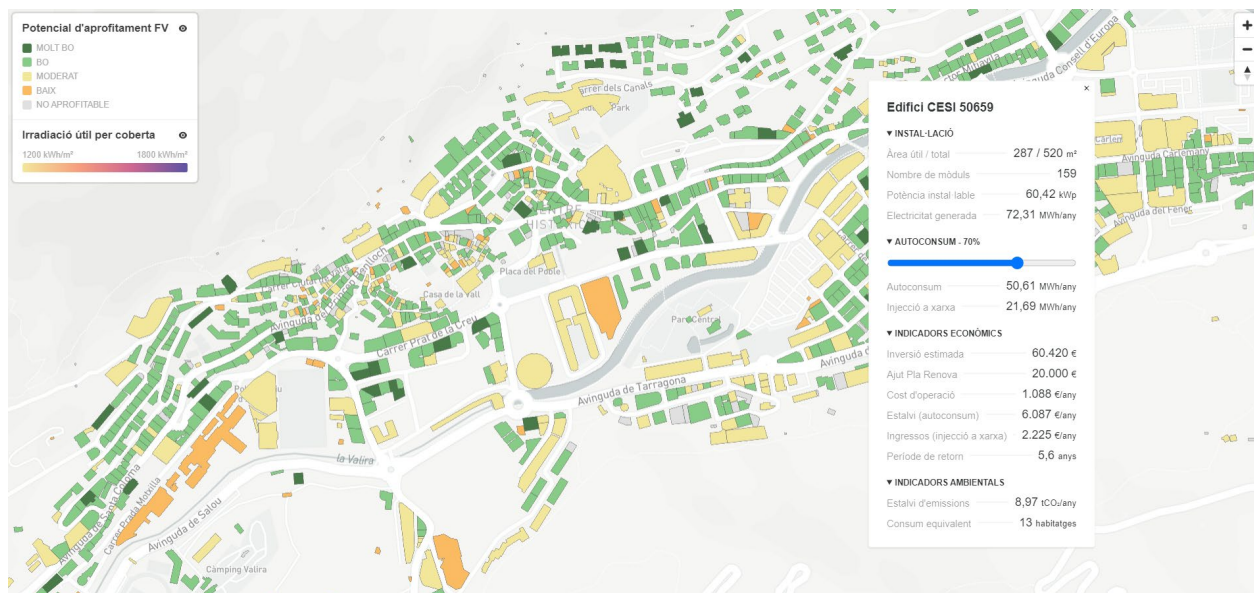
<sup>13</sup> Comunicació personal de l'OECC

<sup>14</sup> 5768 kWh l'any 2019 (el nombre d'habitatges s'estima a partir de la població i les persones per habitatge - EPF2012)



<b>Moderat</b>	$8 \leq PR < 10$
<b>Baix</b>	$PR \geq 10$

**Taula 4.** Llindars considerats en la categorització (PR expressat en anys)



**Figura 6.** Capa “Potencial d’aprofitament fotovoltaic”

La capa “Irradiació útil per coberta”, mostrada en la Figura 7, presenta la informació a escala de coberta i inclou informació sobre la irradiació mitjana i instal·lació potencial en cada coberta d’un edifici. El nivell de detall aportat en aquesta capa pot ser de gran utilitat per identificar les millors zones a utilitzar en cada edifici.



**Figura 7.** Capa “Irradiació útil per coberta”

## Referències

- Brito, M., Gomes, N., Santos, T., Tenedório, J., 2012. Photovoltaic potential in a Lisbon suburb using LiDAR data. *Solar Energy* 86, 283–288. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.09.031>
- Cellura, M., Di Gangi, a., Longo, S., Orioli, a., 2012. Photovoltaic electricity scenario analysis in urban contexts: An Italian case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, 2041–2052. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.032>
- Fu, P., Rich, P.M., 1999. Design and Implementation of the Solar Analyst: an ArcView Extension for Modeling Solar Radiation at Landscape Scales. 19th Annual ESRI User Conference 1–24.
- Govern d'Andorra, 2020. Decret del 29-1-2020 pel qual s'aprova el Reglament de la qualificació de l'eficiència energètica en l'edificació [WWW Document]. URL [https://www.bopa.ad/bopa/032010/Pagines/GR20200131\\_11\\_29\\_26.aspx](https://www.bopa.ad/bopa/032010/Pagines/GR20200131_11_29_26.aspx)
- Govern d'Andorra, 2003. Model digital del terreny 15 metres [WWW Document]. URL <http://www.ideandorra.ad/geodades/index.jsp?lang=ca> (accessed 10.30.20).
- Kodysh, J.B., Omitaomu, O.A., Bhaduri, B.L., Neish, B.S., 2013. Methodology for estimating solar potential on multiple building rooftops for photovoltaic systems. *Sustainable Cities and Society* 8, 31–41. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2013.01.002>
- Redweik, P., Catita, C., Brito, M., 2013. Solar energy potential on roofs and facades in an urban landscape. *Solar Energy* 97, 332–341. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.08.036>
- Travesset-Baro, O., Francisco, G., Vilella, M., Pons, M., 2017. Building rooftops photovoltaic potential in mountainous regions: a case study from the Pyrenees (Extended Abstract), in: European PV Solar Energy Conference. pp. 2–5.