



Fusão de dados LiDAR com modelos 3D urbanos: Uma aplicação para o potencial solar de edifícios

Cristina CATITA ^{1*}, Paula REDWEIK ¹, Joana PEREIRA ² e Miguel BRITO ¹

¹ Instituto Dom Luiz, Dep. De Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

² ESRI Portugal

(cmcatita@fc.ul.pt; pmredweik@fc.ul.pt; joanaguerrapereira@gmail.com; mcbrito@fc.ul.pt)

Palavras-chave: Radiação solar, Modelo 3D urbano, SIG, Análise Espacial.

Resumo: A avaliação do potencial solar desempenha atualmente um papel crítico no desenvolvimento de políticas de planeamento e no desenvolvimento de sistemas de financiamento para a implantação bem sucedida de sistemas fotovoltaicos nas cidades. Considerando que a área disponível em fachadas dos edifícios de uma cidade moderna é significativamente superior à área dos telhados, a avaliação do potencial solar à escala local ou municipal deverá também ter em conta a irradiação em paredes verticais. Apresenta-se neste artigo uma metodologia desenvolvida em ambiente SIG, para integrar espacialmente um modelo de radiação solar para telhados, solo e fachadas, um modelo 3D do edificado urbano, e um modelo digital de superfície derivado de dados LiDAR obtidos por via aérea. A base de dados SIG gerada permite a análise espaço-temporal da distribuição do potencial solar em todas as componentes de um edifício. O nível de detalhe espacial produzido possibilita um planeamento rigoroso da instalação dos sistemas de energia solar nos edifícios (telhados e/ou fachadas) de uma cidade, bem como a quantificação mais rigorosa da área disponível para essa instalação. No âmbito deste artigo apresentam-se ainda algumas aplicações que resultam da exploração da informação na base de dados gerada.



1. Introdução

Em 2020, todos os edifícios novos deverão ser altamente eficientes e ter um balanço energético próximo do zero, ou seja, edifícios nos quais a procura e a oferta energéticas sejam quase equivalentes (Diretiva Europeia 2010/31 / EU, 2010). Para o cumprimento destes objetivos verifica-se a necessidade de desenvolver novas tecnologias para o aproveitamento das energias renováveis em ambiente urbano, em particular das energias solar e eólica. Paralelamente à evolução tecnológica, têm sido desenvolvidos programas computacionais e metodologias de processamento de dados que estimam com rigor o potencial energético, em particular o potencial solar em edifícios urbanos (Hofierka e Súri, 2002), (Brito *et al.*, 2012), (Nguyen e Pearce, 2012), (Wiginton *et al.*, 2010), (Jakubiec e Reinhart, 2013). Grande parte dos estudos desenvolvidos, centram-se na estimação do potencial solar nos telhados, contudo é sabido que a área das fachadas verticais dos edifícios típicos das cidades modernas é muito superior à dos telhados, e a motivação para explorar novas formas de estimar o potencial solar nas fachadas tem originado alguns trabalhos de natureza científica relevantes (Carneiro *et al.*, 2010), (Redweik *et al.*, 2011), (Hofierka e Zlocha, 2012), (Catita *et al.*, 2014). O conhecimento do potencial solar nos edifícios de uma cidade permite um melhor planeamento na colocação de módulos fotovoltaicos ou coletores solares nas fachadas ou ainda de módulos fotovoltaicos semi-transparentes nas janelas com vista a um melhor aproveitamento da energia produzida por exemplo, para o aquecimento ou para a iluminação do próprio edifício.

É na sequência dos trabalhos científicos supracitados que os autores deste artigo, desenvolveram o algoritmo de nome SOL (Redweik *et al.*, 2013) cujos resultados permitem estimar o potencial solar em áreas urbanas, incluindo o solo, telhados e fachadas dos edifícios. O SOL usa informação da localização da área de estudo, que é dada pelas coordenadas geodésicas (latitude e longitude) do ponto médio da mesma, usa um Modelo Digital de Superfície (MDS), obtido a partir de dados LiDAR (*Light Detection And Ranging*) de ALS (*Aerial Laser Scanning*) que contém o solo, os telhados dos edifícios e as árvores e usa ainda dados de radiação solar, calculados por um modelo genérico de radiação que fornece os valores de radiação solar difusa e global incidente num plano horizontal a cada hora de cada dia de um ano, na latitude considerada. Do SOL resulta informação sobre a radiação solar global incidente num ponto, incluindo a radiação direta e a difusa, independentemente da localização do ponto ser no solo, na fachada ou no telhado, com uma resolução espacial média de 1 ponto por m², compatível com a dos dados ALS de origem, e uma resolução temporal que pode variar, consoante a necessidade do utilizador, entre uma hora a um ano. Para além do mapa de radiação incidente, calculado para o solo e para os telhados, o SOL gera ainda um mapa com o valor do SVF (*Sky View Factor*) e um mapa de sombras para cada uma das horas de cada dia do ano. Estes resultados apresentam-se na forma de grelhas regulares de *pixels*, numa estrutura matricial (*raster*) com 1 m de resolução espacial. Para as fachadas os resultados são apresentados em tabelas horárias que contém informação referente às coordenadas tridimensionais (planimetria (X,Y) e cota (Z)) de cada elemento de hiperponto que no contexto do trabalho desenvolvido, refere-se ao conjunto de pontos que partilham as mesmas coordenadas planimétricas e que variam sistematicamente em cota, numa mesma coluna vertical, desde o solo até à altura da fachada a que pertence. Os elementos de um hiperponto não existem nos dados de ALS, mas são gerados artificialmente através do programa SOL para os quais é também estimada a respetiva radiação direta, difusa e global, o SVF, o ângulo de incidência dos raios solares e a orientação da fachada nesse elemento.

As grelhas e os hiperpontos gerados pelo SOL, tal como os dados LiDAR originais, não apresentam uma contextualização espacial que permita identificar os objetos urbanos que representam, porque simplesmente os dados LiDAR originais não estão classificados a não ser pelas coordenadas tridimensionais que apresentam. Como tal, os produtos gerados pelo algoritmo SOL permitem apenas responder a questões simples como por exemplo “onde se encontram os pontos que apresentam maior radiação solar anual numa cidade?” ou “qual é a radiação solar média dos pontos localizados numa determinada área geográfica?”. Para dar respostas a questões onde o contexto geoespacial seja relevante, tais como “qual é a quantidade de radiação solar que recebe o edifício A ou a fachada B do edifício A?” ou “qual é a fachada ou telhado do edifício C mais favorável para a instalação de módulos fotovoltaicos?” ou ainda “qual é a área disponível na fachada, com maior rendimento solar anual, do edifício A com vista à otimização de instalação de módulos fotovoltaicos?” é necessário fazer corresponder a cada *pixel* das grelhas geradas pelo SOL, assim como a cada elemento dos hiperpontos das fachadas, o objeto urbano que representam de forma a tornar mais útil toda a informação produzida pelo algoritmo. A fusão de um modelo tridimensional (3D) urbano com a informação da radiação solar gerada pelo SOL é então necessária e facilmente implementada em ambiente SIG (Sistemas de Informação Geográfica), através de uma base de dados relacional criada para o efeito.

Este artigo descreve assim uma metodologia para a análise e a representação do potencial solar no solo, nos telhados e nas fachadas dos edifícios do *Campus* da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (FCUL) (edifícios C1 a C8), e de outros

na sua envolvente (edifícios de investigação, um edifício de administração local e o Museu de Lisboa), distribuídos por uma área de cerca de 25 ha (Figura 1). A metodologia é desenvolvida em ambiente SIG, e foca-se na fusão espacial do modelo 3D do edificado com os produtos gerados pelo SOL, para os telhados e fachadas dos edifícios, de modo a permitir uma consulta sobre o potencial solar, com contexto geográfico, dos objetos urbanos presentes na área de estudo.

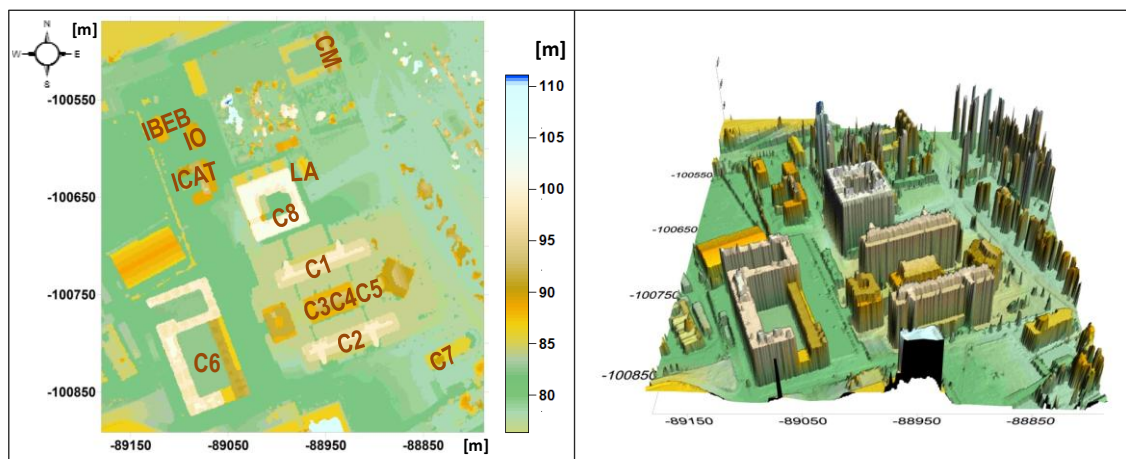


Figura 1 – Na esquerda: MDS da área de estudo e respectiva identificação dos edifícios do *Campus* da FCUL e dos edifícios próximos (as elevações encontram-se em metros); Na direita: vista 3D do modelo LiDAR da área de estudo (as coordenadas de ambas as figuras encontram-se no sistema de referência ETRS89-TM06-PT)

2. Metodologia

A metodologia de trabalho desenvolve-se em três fases distintas, ilustradas na Figura 2. Numa primeira fase, dado que para a área de estudo não existia um modelo 3D do edificado com o detalhe exigido para a aplicação em causa, procedeu-se à criação de um modelo 3D do conjunto dos edifícios do *Campus* da FCUL. Numa segunda fase, procedeu-se à criação de um modelo de dados geográficos para a integração espacial do MDS, do modelo 3D e dos valores de radiação solar resultantes do algoritmo SOL. Este modelo serviu para a implementação, em ambiente SIG, da estrutura geométrica e semântica descrita na base de dados relacional criada para as pesquisas subsequentes. Por fim, na última fase, procedeu-se à visualização e à análise da informação relativa à radiação solar para cada objeto da área de estudo e à realização de estatísticas de interesse baseadas nos valores de radiação.

2.1 Modelo 3D Urbano

É reconhecido que um modelo 3D urbano ajuda a compreender melhor as interações espaciais dos diferentes objetos de uma cidade. No presente trabalho, a modelação tridimensional dos edifícios da FCUL foi efetuada através do *software* CAD (*Computer Aided Design*) Trimble SketchUp® (Trimble SketchUp, 2011). O apoio necessário a esta modelação derivou de uma estrutura vetorial criada para a representação da pegada no solo (*footprint*) dos edifícios da área do *Campus*, obtida a partir de meios fotogramétricos. A altura dos vértices dos edifícios foi também obtida a partir de medições estereoscópicas realizadas em fotografias aéreas da área de estudo, permitindo assim a extrusão vertical dos edifícios. Seguidamente, todas as fachadas foram fotografadas com uma câmara digital e as fotos resultantes foram retificadas nas superfícies verticais do modelo para lhe serem adicionados detalhes em falta no modelo inicial simplificado. No total, foram modelados dezanove edifícios com detalhe correspondente ao LoD 3 (*Level of Detail*) definido no CityGML (Kolbe, 2009) (cf. Figura 2: “3D Building Model”).

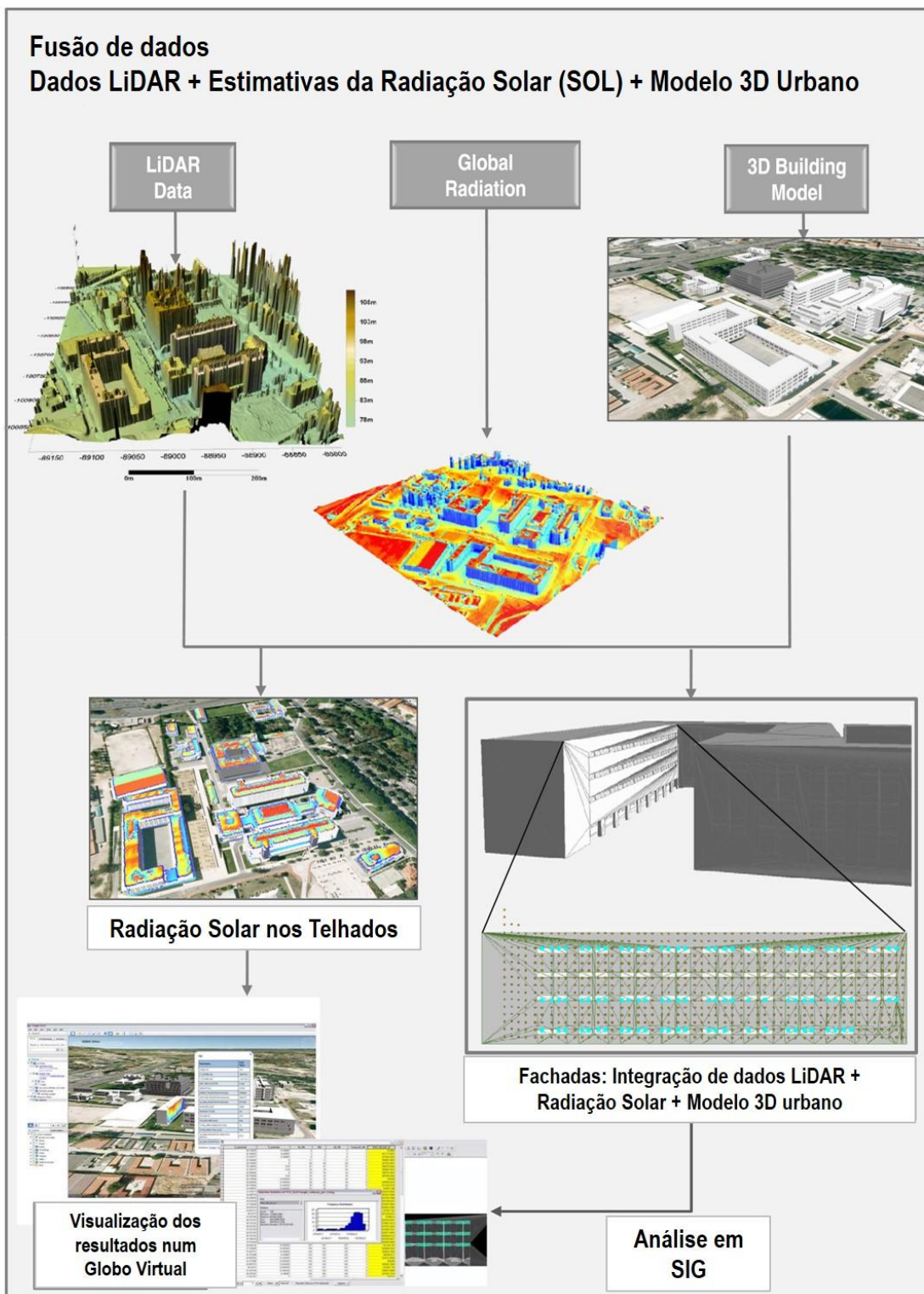


Figura 2 – Sequência metodológica usada para a fusão dos dados de radiação solar, dos dados LiDAR e do modelo 3D urbano com vista à análise e representação do potencial solar em edifícios urbanos.



2.2 Modelo Geográfico e Fusão de Dados

O primeiro passo consistiu em importar o MDS, a informação da radiação solar e o modelo 3D urbano para uma base de dados SIG. Para o efeito, o modelo 3D dos edifícios foi convertido numa estrutura geométrica do tipo *multipatch* (ESRI, 2008). De forma a combinar devidamente os dados das diferentes fontes de informação, foi necessário desagregar os elementos da estrutura *multipatch* numa estrutura de polígonos 3D (*polygonZ*) (polígonos cujos vértices armazenam informação da sua dimensão Z, para além da sua informação planimétrica X e Y) usando para o efeito o *software Feature Manipulation Engine (FME) Desktop* (Safe Software, 2013), e ainda isolar o *footprint* dos edifícios. A cada *footprint* foi atribuído um identificador único (código de edifício). Por simplicidade, neste estudo cada edifício foi identificado pelo seu próprio nome no contexto do espaço do *Campus* (cf. Figura 1).

2.2.1 - Processamento para os telhados

Uma vez que a informação da radiação solar para os telhados e para o solo foi importada para a base de dados SIG em camadas *raster*, estas foram posteriormente convertidas em geometrias pontuais e combinadas espacialmente com o MDS, através de operações simples de análise em SIG, de forma a extrair-se, para cada ponto de telhado ou solo, a respetiva informação altimétrica. Seguidamente, para proceder à fusão da geometria pontual anterior com os edifícios, aplicou-se uma operação de *Spatial Join*, por intersecção, da geometria pontual com o *footprint* dos edifícios devidamente classificados. Desta forma, cada elemento pontual, pertencente ao telhado de qualquer edifício, recebe o código do edifício a que pertence, para além da informação relativa à radiação solar gerada pelo SOL e da informação altimétrica obtida a partir do MDS (cf. Figura 2: “Radiação Solar nos Telhados”). Os pontos não pertencentes a qualquer edifício foram classificados como solo (*ground points*), embora saibamos que podem incluir objetos como árvores, vedações, ou pequenas construções (altura < 2m) não modeladas como edifícios.

2.2.2 - Processamento para as fachadas

Para as fachadas, cada elemento com coordenadas (X,Y,Z) (planimétrica e cota) dos hiperpontos foi importado para a base de dados SIG como uma geometria pontual com semântica associada (*point feature*) à qual foi atribuída um identificador numérico único. Cada *point feature*, armazena, para além das coordenadas planimétricas e respetiva cota, informação sobre a radiação solar: o SVF, a radiação difusa, a radiação direta, e a radiação global geradas pelo SOL. Numa perspetiva orientada para o objeto é conveniente que cada *point feature*, armazene também o código do edifício e da fachada a que pertence. Para este efeito, procedeu-se à desagregação geométrica dos polígonos que representam os *footprints* dos edifícios em segmentos de linha, sendo que cada segmento representa o traço no solo de uma fachada particular. Estes segmentos de linha foram posteriormente usados numa operação de *Spatial Join* com os elementos dos hiperpontos. Como resultado desta operação, a cada elemento de um hiperponto ficou associado o identificador da fachada e do edifício a que pertence para além dos atributos anteriormente mencionados.

2.2.3 - Fusão com o modelo 3D Urbano

A radiação recebida por cada elemento de hiperponto pode ser variável consoante o material da superfície em que se encontra. É por isso importante distinguir por exemplo, as janelas das paredes ou de outros objetos das fachadas, para avaliar a zona da fachada mais adequada para a instalação dos sistemas solares. Para que esta análise seja possível é necessário operar sobre a estrutura *multipatch* de cada edifício. O primeiro passo consistiu em avaliar a qualidade da triangulação produzida automaticamente pelo *software ArcGIS* (ESRI, 2008) ao importar o modelo CAD para a estrutura *multipatch*. Tendo-se verificado que a triangulação do *multipatch* não era a mais adequada para o propósito em causa, procedeu-se a uma triangulação de *Delaunay* usando os vértices dos elementos *polygonZ* para garantir a maximização dos ângulos interiores dos triângulos da triangulação. Como resultado, cada fachada pôde ser adequadamente discretizada em triângulos mais homogêneos permitindo assim uma melhor identificação dos seus elementos arquitetónicos (por exemplo, das janelas ou das varandas). Esta classificação, pode ser automatizada por exemplo, no caso dos edifícios modernos através do atributo ‘area’, devido à regularidade da geometria dos elementos.

Para estabelecer a correspondência entre os elementos dos hiperpontos e a classe arquitetural de cada elemento da fachada, por exemplo considerando os materiais dos edifícios e as suas propriedades, foi necessário projetar os hiperpontos de cada fachada num plano horizontal, preservando as distâncias relativas entre cada elemento. Uma vez projetados no plano horizontal, os elementos dos hiperpontos, de cada fachada, foram usados para gerar áreas de influência de cada elemento, usando para o efeito os Polígonos de Thiessen. Os novos polígonos assim gerados, preservam todos os atributos de cada elemento dos hiperpontos, assim como os polígonos da anterior triangulação de Delaunay preservam os atributos associados aos materiais e às características arquitetónicas de cada fachada. Parece assim intuitivo que ambas as tesselações (Delaunay e de Thiessen), de uma mesma fachada, possam ser intersecadas, através de uma operação de interseção espacial (*overlay 2D*) em SIG produzindo assim novos polígonos (facetadas) que preservam os atributos das camadas que lhe deram origem (Figura 3). A estrutura de dados resultante, congrega assim a informação relativa à geometria, à semântica e à radiação solar, facilitando as análises e as investigações que podem ser realizadas sobre um edifício ou fachada particular.

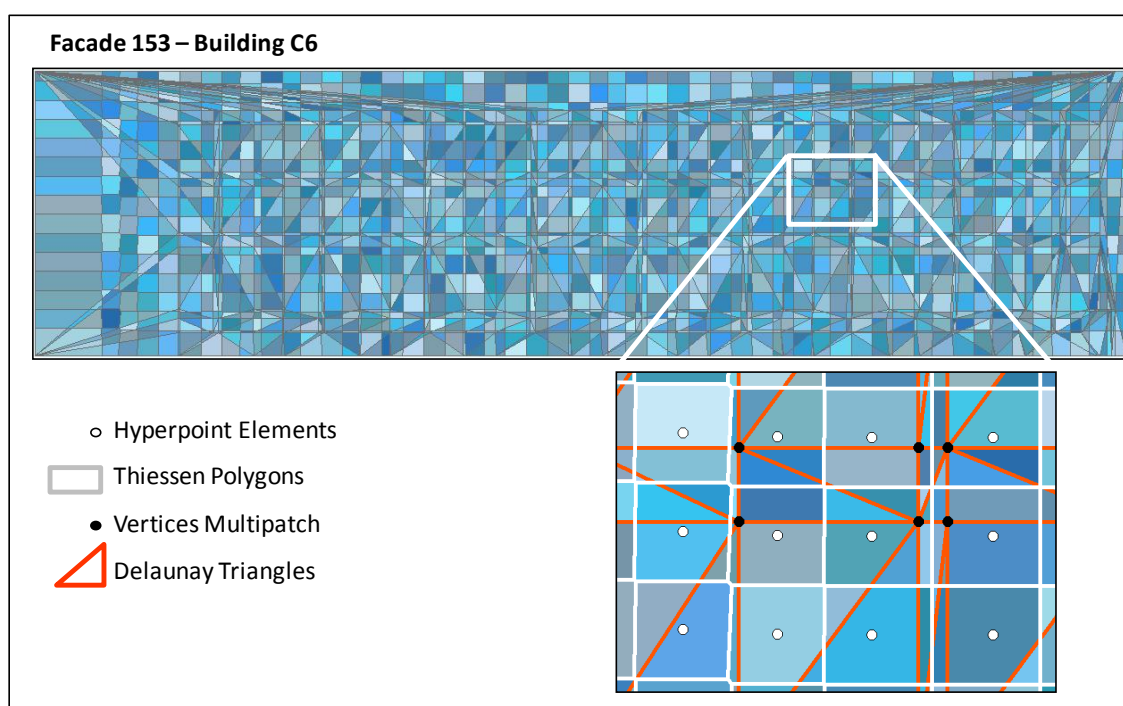


Figura 3 - Facetas da fachada 153 (edifício C6) resultantes da intersecção espacial dos polígonos de Thiessen (polígonos de contornos em cinza claro) e dos triângulos de Delaunay (triângulos de contornos a vermelho). Os elementos dos hiperpontos estão representados a branco e os vértices dos triângulos da estrutura *multipatch* estão representados a preto

3. Análise espacial dos resultados produzidos

A análise do potencial solar pode ser realizada a diferentes escalas espaciais: regional, municipal ou local. Este estudo permite que a análise espacial seja realizada a uma escala local com um detalhe muito elevado, uma vez que o potencial solar é gerado para cada metro quadrado de superfície de telhado, fachada ou solo. Desta forma, podem ser colocadas questões específicas e a base de dados SIG criada está preparada para devolver resultados legíveis que podem apoiar os especialistas a planear da melhor forma a instalação dos sistemas solares nos edifícios de uma cidade.

Apresentam-se de seguida exemplos das possíveis análises que podem ser elaboradas, e cujas ilustrações não podem ser todas aqui apresentadas por limitações associadas à extensão deste documento:

- Identificação do edifício da área de estudo que apresenta maior potencial solar.
- Identificação da fachada, de um edifício específico, com maior potencial solar.

- c. Análise da variação mensal de radiação global, difusa ou direta, por metro quadrado, numa determinada fachada ao longo do ano.
- d. Análise da variabilidade vertical da radiação solar, numa determinada escala temporal, para cada hiperponto de uma determinada fachada.
- e. A quantidade de horas de sol recebidas em cada metro quadrado de fachada, numa determinada escala temporal (desde 1 hora até 1 ano).
- f. Quantificação da radiação solar anual apenas nas janelas de determinada fachada, considerando a hipótese de substituir o vidro por módulos fotovoltaicos semi-transparentes (Figura 4).

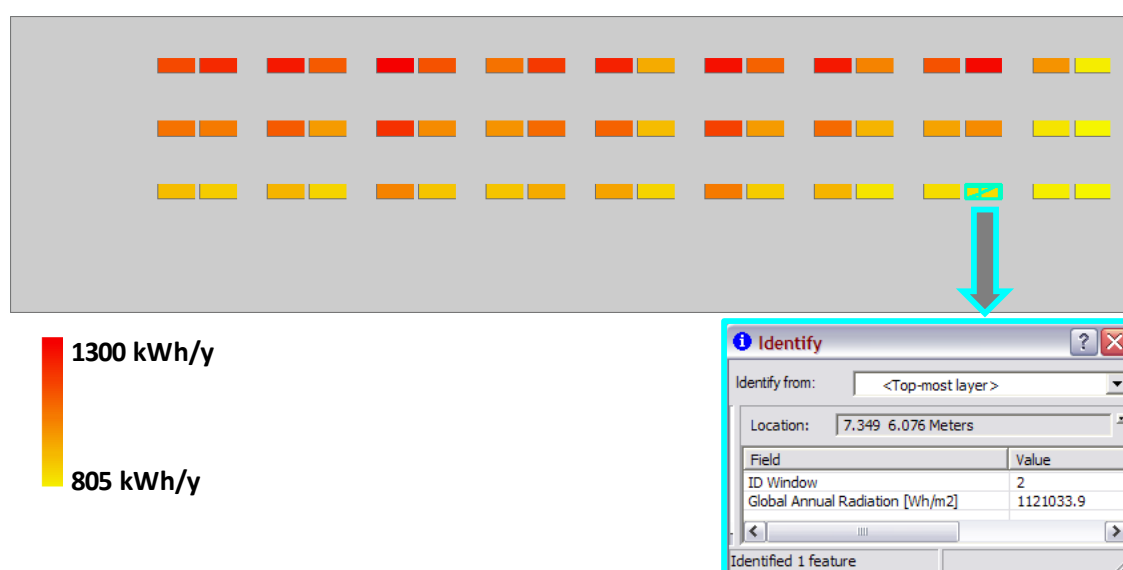


Figura 4 – Radiação incidente (kWh/y) em cada janela de uma fachada (fachada 153) do edifício C6 do *Campus* da FCUL

4. Conclusões

Este trabalho propõe uma nova metodologia para a representação e a análise da radiação solar em telhados e fachadas verticais de edifícios em meio urbano. A base de dados gerada numa plataforma SIG, permite responder a questões relevantes dos especialistas do ordenamento do espaço urbano, dos técnicos/especialistas dos sistemas fotovoltaicos ou até de proprietários particulares que pretendam identificar os edifícios, ou elementos de edifícios com maior potencial solar para a instalação de módulos fotovoltaicos ou coletores solares.

Agradecimentos

Agradece-se à empresa LOGICA pela cedência dos dados LiDAR usados neste trabalho. O estudo desenvolvido foi parcialmente financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia no âmbito do projecto de I&D “PVCITY-Solar potential in the urban environment” - PTDC/EMSENE/4525/2014.

Referências Bibliográficas

Brito, M.C.; Gomes, N.; Santos, T.; Tenedório, A. (2012). Photovoltaic potential in a Lisbon suburb using LiDAR data. *Solar Energy*, 86, pp. 283–288.



- Carneiro, C.; Morello, E.; Desthieux, G.; Golay, F. (2010). Urban Environment Quality Indicators: Application to Solar Radiation and Morphological Analysis on Built Area. VIS '10: Proceedings of the 3rd WSEAS International Conference on Visualization, Imaging and Simulation, Faro.
- Catita, C.; Redweik, P.; Pereira, J.; Brito, M.C. (2014). Extending solar potential analysis in buildings to vertical facades. Computers & Geosciences, Elsevier, Volume 66, May 2014, Pages 1–12 DOI: 10.1016/j.cageo.2014.01.002.
- Diretiva Europeia 2010/31 EU (2010). Directiva 2010/31 do Parlamento Europeu e do Conselho de 19 de Maio de 2010 relativa ao desempenho energético dos edifícios (reformulação). Jornal Oficial da União Europeia, Estrasburgo.
- ESRI (2008). The Multipatch Geometry Type. [online] <http://www.esri.com/library/whitepapers/pdfs/multipatch-geometry-type.pdf>, consultada em Janeiro de 2013.
- Hofierka, J.; Zlocha, M. (2012). A new 3-D Solar Radiation Model for 3D-City Models. Transactions in GIS, 16(5): 681-690
- Hofierka, J.; Sári, M. (2002). The solar radiation model for Open source GIS: implementation and applications. In: Proceedings of the Open source GIS – GRASS Users Conference. Trento, Italy, 11–13 Sept.
- Jakubiec, J.A.; Reinhart, C.F. (2013). A Method for Predicting City-Wide Electricity Gains from Photovoltaic Panels Based on LiDAR and GIS Data Combined with Hourly DAYSIM Simulations, Solar Energy, 93, pp. 127-143. doi:10.1016/j.solener.2013.03.022.
- Kolbe, T.H. (2009). Representing and Exchanging 3D city Models with CityGML. 3D Geo-information Sciences. Chapter 2, pp. 15-31, Springer, Seoul, Korea.
- Nguyen, H.; Pearce, J. M. (2012). Incorporating Shading Losses in Solar Photovoltaic Potential Assessment at the Municipal Scale. Solar Energy 86 (5), pp. 1245–1260. Available at SSRN: <http://ssrn.com/abstract=2035096>.
- Redweik, P.; Catita, C.; Brito, M. C. (2011). PV Potential Estimation Using 3D Local Scale Solar Radiation Model Based on Urban Lidar Data, Proceedings of the 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Hamburg.
- Redweik, P.; Catita, C.; Brito, M. (2013). Solar energy potential on roofs and facades in an urban landscape, Solar Energy, 97: 332-341, ISSN 0038-092X, <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2013.08.036>.
- Safe Software (2013). [online] <http://www.safe.com>, consultada em Janeiro de 2013.
- Trimble Sketchup (2011). [online] <http://www.sketchup.com/>, consultada em Janeiro de 2011.
- Wiginton, L.K.; Nguyen, H.T.; Pearce, J.M. (2010). Quantifying rooftop solar photovoltaic potential for regional renewable energy policy. Computers, Environment and Urban Systems, 34, (4), July, pp. 345-357.