

# Análisis comparativo de modelos digitales del terreno obtenidos con LiDAR aéreo y *structure from motion*: aplicación en estudios del paisaje en el sitio inka El Shincal de Quimivil (Noroeste argentino)

Reinaldo A. Moralejo, Luciano López, Diego Gobbo y Daniel Del Cogliano

Recibido 10 de diciembre 2021. Aceptado 25 de agosto 2022

## RESUMEN

En este trabajo se comparan los resultados de un relevamiento con LiDAR aéreo y *structure from motion* en el sitio *inka* El Shincal de Quimivil. Este sitio se localiza en la provincia de Catamarca y es considerado uno de los centros políticos, administrativos y ceremoniales incaicos más emblemáticos del Noroeste argentino. Para realizar esta comparación y explorar las potencialidades de ambas técnicas, se realizaron cálculos estadísticos de las diferencias de alturas y se llevaron a cabo análisis espaciales de visibilidad y movilidad humana, entendidos respectivamente como la representación visual de un espacio y como la capacidad de moverse a través de él. Las mayores diferencias se registraron en zonas con vegetación densa y altas pendientes. Naturalmente, la referencia es el Modelo Digital del Terreno determinado con LiDAR, que no es afectado por esas circunstancias y tiene calidad de pocos centímetros en todas las componentes. En suelo desnudo, ambos modelos son comparables. Por lo tanto, una de las claves para la elección de estas técnicas es decidir el uso que le daremos a cada una de ellas de acuerdo con el tipo de terreno, la escala del trabajo y el error que estamos dispuestos a aceptar.

**Palabras clave:** *Light Detection and Ranging*; VANT; SfM-MVS; Visibilidad; Movilidad.

## Comparative analysis of digital terrain models obtained with aerial LiDAR and Structure from Motion: application in landscape studies at the Inka site El Shincal de Quimivil, Northwest Argentina

## ABSTRACT

This paper compares the results of a survey with aerial LiDAR and Structure from Motion at the Inka site El Shincal de Quimivil. This site is located in the province of Catamarca and is considered one of the most emblematic Inka political, administrative and ceremonial centres in the Northwest Argentina. In order to compare and explore the potential of both techniques, statistical calculations of height differences were made and spatial analysis of visibility and human mobility, understood respectively as the visual representation of a space and the ability to move through it, were carried out. The greatest differences were

Reinaldo A. Moralejo. División Arqueología, Museo de La Plata. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Facultad de Ciencias Naturales y Museo (FCNyM), Universidad Nacional de La Plata (UNLP). Paseo del Bosque s/n° (B1900FWA), La Plata, Buenos Aires, Argentina. E-mail: reinaldomoralejo@yahoo.com.ar

Luciano López. Instituto de Recursos Minerales. CONICET. FCNyM, UNLP. Calle 64 s/n° esq. 120, (B1904AMC), La Plata, Buenos Aires, Argentina. E-mail: lopezluciano@hotmail.com

Diego Gobbo. División Arqueología, Museo de La Plata. CONICET. FCNyM, UNLP. Paseo del Bosque s/n° (B1900FWA), La Plata, Buenos Aires, Argentina. E-mail: dgobbo@fcnym.unlp.edu.ar

Daniel Del Cogliano. Departamento de Astrometría. CONICET. Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, UNLP. Paseo del Bosque s/n° (B1900FWA), La Plata, Buenos Aires, Argentina. E-mail: ddelco3057@gmail.com

Intersecciones en Antropología 23(2), julio-diciembre. 207-225. 2022. ISSN-e 1850-373X

<https://doi.org/10.37176/iea.23.2.2022.703>

Facultad de Ciencias Sociales - UNICEN - Argentina

registered in areas with dense vegetation and high slopes. Naturally, the reference is the Digital Terrain Model determined with LiDAR, which is not affected by these circumstances and has a quality of a few centimetres in all components. On bare ground, both models are comparable. Therefore, one of the keys to choose between these techniques is to decide how to use each of them according to the type of terrain, the scale of work, and acceptable error.

**Keywords:** Light Detection and Ranging; VANT; SfM-MVS; Visibility; Mobility.

## INTRODUCCIÓN

El desarrollo tecnológico de la sociedad ha generado impactos profundos en diversas disciplinas científicas, y la arqueología, por supuesto, no ha quedado al margen de dicha situación. Tan es así que, a lo largo de su avance como disciplina, han acontecido diversos cambios teóricos y metodológicos que fueron de la mano de las nuevas tecnologías. Este impacto no hay que verlo solo por el uso en sí mismo de cada herramienta tecnológica durante las diferentes etapas de una investigación (trabajo en gabinete, prospección, excavación, etc.), sino más bien por la posibilidad que nos han brindado a la hora de plantear nuevos interrogantes. Un claro ejemplo de ello es la amplitud de criterios que ha provocado el uso de *software* de sistemas de información geográfica (SIG) a la hora de analizar el paisaje (Olaya, 2020).

En este artículo nos interesa explorar los límites y posibilidades del uso de dos metodologías diferentes para el estudio de la espacialidad incaica en el sitio arqueológico El Shincal de Quimivil (Londres, Catamarca). Específicamente, se trata de dos técnicas que hemos puesto en práctica en el lugar: por un lado, LiDAR aéreo y, por otro, una cámara fotográfica montada en un vehículo aéreo no tripulado (VANT). El objetivo específico es analizar las potencialidades que nos brindan ambas metodologías para responder determinadas preguntas antropológicas vinculadas con la organización de la representación visual y el desplazamiento a lo largo del espacio. Es decir, nos interesa ver cómo a través de cada una de ellas podemos aproximarnos a la comprensión del paisaje pretérito. Para ello hemos seleccionado dos aspectos (variables) muy abordados dentro de la disciplina arqueológica: el paisaje visual y la movilidad (accesibilidad).

Dentro de los estudios acerca del comportamiento humano, tanto la visibilidad como la movilidad constituyen prácticas intrínsecas propias de la vida cotidiana. Debido a su relevancia, pueden reflejar patrones que son importantes para entender diferentes aspectos cognitivos, culturales, sociales,

económicos y políticos de una sociedad, como así también comprender aquellos procesos relacionados con la construcción de identidades, la idea de territorio, el intercambio tecnológico o el desarrollo de procesos de complejidad social (Murrieta-Flores, 2010). Ambas son acciones humanas que pueden ser cuantificadas y analizadas desde los SIG, ya que estos nos brindan información acerca de la organización del espacio en un lugar determinado (Wheatley y Gillings, 2000; Zamora Merchán, 2006; Fábrega Álvarez, 2017).

En cuanto a los estudios de espacialidad andina, los abordajes de visibilidad y movilidad se han vuelto muy significativos en los últimos años. Diversos trabajos, con múltiples escalas de paisaje y estrategias metodológicas, han explorado y demostrado la existencia de patrones de visión, desplazamiento y conectividad que regulan la configuración social de un lugar determinado (Vitry, 2000; Acuto, 2012; Moralejo y Gobbo, 2015, 2017; Kosiba, 2017; Wynveldt et al., 2018; Moralejo et al., 2020, entre otros).

Los análisis de visibilidad, por un lado, permiten generar cuencas visuales para representar y evaluar la percepción o control visual del paisaje, entendido como parte de una configuración espacial específica (Llobera, 2003). Los análisis de movilidad, por otro, permiten evaluar el desplazamiento óptimo, o de menor esfuerzo, a lo largo del paisaje como una forma de conocimiento y apropiación del espacio por parte de los seres humanos (Richards-Rissetto y Landau, 2014). Ambos reflejan la interacción social producto de diferentes relaciones de poder (Moralejo y Gobbo, 2015).

Para realizar estos análisis espaciales es necesario contar con datos y herramientas SIG adecuadas que permitan profundizar en la investigación de la asociación entre diversos elementos del paisaje. En este sentido, cualquier estrategia que implique visibilidad y movilidad estará sujeta a diversos aspectos dinámicos y multidimensionales que no siempre quedan reflejados en el registro arqueológico (Murrieta-Flores, 2010).

De acuerdo con el objetivo de este trabajo, nos interesa comparar dos modelos generados con técnicas diferentes (LiDAR y SfM-MVS) y explorar su valor potencial y, por ende, su utilidad en la comprensión del paisaje del pasado. Es decir, qué tanto afectan estos modelos en los análisis espaciales al punto que generen diferencias en la interpretación del comportamiento humano. En cuanto a la movilidad humana, hemos elegido un estudio de accesibilidad (o conectividad) entre diferentes estructuras del sitio teniendo en cuenta su topografía y su organización arquitectónica general: desplazamiento entre la *kancha* "Casa del Curaca" y el Cerro Aterrazado Oriental, y desplazamiento entre la *kancha* "y" y la *kancha* "5f". En cuanto a la visibilidad humana, fueron seleccionadas las mismas estructuras, dentro de las cuales se colocó un punto de observación a partir del cual se generaron las cuencas visuales simples.

La comparación de los modelos de elevación digital obtenidos a partir de las mediciones con LiDAR y con VANT requiere de la correcta georreferenciación de ambos productos, que en nuestro caso fue obtenida a partir de mediciones GPS geodésicas realizadas sobre puntos POSGAR07. Si bien varios trabajos remarcan la potencialidad y limitaciones de ambas técnicas (Fonstad *et al.*, 2013; Green *et al.*, 2014; Hatzopoulos *et al.*, 2017; Parcero-Oubiña, 2021), en este artículo pretendemos ir más allá de la comparación de los modelos de terreno y centrarnos en lo que aportan para resolver determinadas problemáticas arqueológicas.

Conociendo las limitaciones de las técnicas se espera que, en las zonas con escasa vegetación, o vegetación dispersa, ambos modelos de elevación sean consistentes. Para eliminarla, se pueden utilizar filtros. Sin embargo, en zonas con densa cobertura vegetal, el relevamiento con VANT presenta una limitación severa respecto del LiDAR (Micheletti *et al.*, 2015). Este último, en general, permite registrar la vegetación y la superficie del suelo, de manera que es ideal para realizar modelos del terreno. Entonces, el éxito de los análisis de visibilidad y movilidad estará condicionado por dicho aspecto. Para ambos análisis, como veremos luego, es necesario contar primero con un modelo digital de terreno (MDT). Tendremos entonces dos MDT provenientes de diferentes dispositivos, a partir de los cuales analizaremos la capacidad de cada uno a la hora de realizar los estudios espaciales.

## ÁREA DE ESTUDIO

El sitio arqueológico inka El Shincal de Quimivil (1350 msnm) se encuentra ubicado sobre el piedemonte de la serranía del Shincal, en la localidad de Londres de la provincia de Catamarca, noroeste argentino (NOA). Es considerado uno de los centros políticos, administrativos y ceremoniales más emblemáticos del Qollasuyu, que revelan la presencia y poder inka al sur del Tawantinsuyu (Raffino, 2004; Raffino *et al.*, 2015).

El área de ocupación supera las 30 hectáreas y está conformada por diversos edificios tipo *kancha* – en lengua quechua– o recinto perimetral compuesto (RPC) cuyo patrón ortogonal respondía a un planeamiento incaico planeado y construido para sus centros políticos regionales (Raffino, 2004) (Figura 1).

La planta urbana del sitio está compuesta por una *haucaypata* o plaza cuadrangular (175 m de lado) con dos accesos. En su interior se destacan el *ushnu* o plataforma ceremonial, una *kallanka* rectangular donde se llevaban a cabo diversas actividades públicas y ceremoniales y un muro doble de piedra con cuatro vanos que permitían organizar el movimiento y la visibilidad interna (Moralejo *et al.*, 2020). Hacia el oriente y al occidente de la plaza se encuentran, respectivamente, dos cerros aterrazados de 25 m de altura (Cerro Aterrazado Oriental y Cerro Aterrazado Occidental) con cimas aplanadas donde se llevaban a cabo actividades de tipo ceremonial.

En los alrededores de la plaza se encuentran varias *kanchas* (algunas presentan *kallankas* internas) que habrían alojado a la elite gobernante, como también a ciertas personas que asistían a los eventos festivos o a aquellos habitantes que se encargaban de mantener el sitio. Otras funcionaron como *kanchas*-templos donde se llevaban a cabo actividades ceremoniales (Farrington, 1999; Raffino, 2004; Couso *et al.*, 2011; Moralejo, 2011, 2013; Giovannetti, 2015; Corrado *et al.*, 2019).

En el sitio también se ha hallado un gran número de *qollqas* o depósitos de almacenamiento que permitían acumular el excedente producido y sostener las diversas prácticas de redistribución y reciprocidad (Giovannetti, 2015; Raffino *et al.*, 2015).

Otro componente para destacar es la presencia del *Qhapaq Ñan* o Camino del Inka. Este camino recorría el sitio en sentido noreste-suroeste, conectando varias *kanchas*, y formaba parte del conocido "Camino de la Sierra" que articulaba diferentes



Figura 1. Plano del sitio inka El Shincal de Quimivil (Londres, Catamarca, NOA).

valles del NOA, centro-oeste argentino y Chile (Moralejo, 2011).

Todos estos elementos de carácter humano y no humano conformaban una red de marcadores espaciales que respondían a un modelo social del paisaje cuyas características condujeron a considerar a El Shincal de Quimivil como un “Nuevo Cusco”, a modo de réplica simbólica de la capital del Tawantinsuyu (Raffino, 1991; Farrington, 1999).

## METODOLOGÍA

La metodología de trabajo consistió en una serie de pasos realizados en el sitio y en el gabinete, que implicaron la utilización e integración de diferentes técnicas de estudio y herramientas de cálculo y análisis. A continuación, detallaremos cada una de ellas.

### Relevamiento con LiDAR aéreo

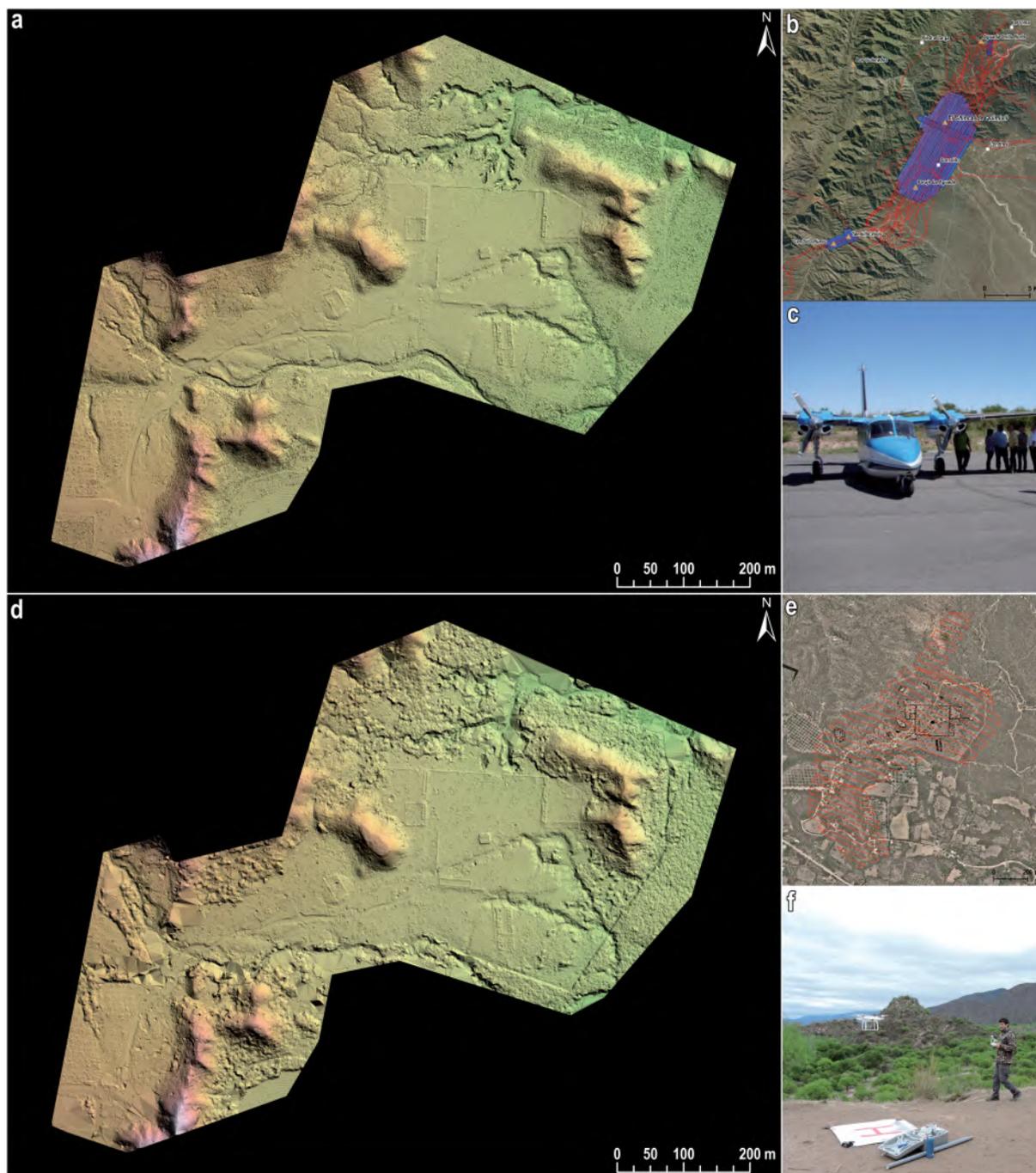
El LiDAR es un sensor activo de escaneo láser que permite determinar las coordenadas espaciales

(o la posición) de puntos reflejados sobre diferentes elementos del paisaje, con muy alta resolución y precisión (Vosselman y Maas, 2010; Arranz Justel, 2013). Los sistemas LiDAR pueden diferenciarse, según la plataforma donde se monten, como aéreos o terrestres. Para el área de estudio de El Shincal de Quimivil se utilizaron uno aerotransportado y otro fijo terrestre. A los fines del presente artículo solamente nos referiremos al LiDAR aéreo, siguiendo un flujo de trabajo de campo y gabinete que venimos desarrollando y experimentando en estos años: adquisición, ajuste metodológico, visualización y clasificación de la nube de puntos LiDAR y generación de un MDT (Moralejo et al., 2018).

El sistema LiDAR aéreo utilizado estaba conformado por un sensor Leica ALS 80 – frecuencia de emisión de pulsos láser de 1 Mhz y frecuencia de barrido de 200 Hz–, un receptor GNSS geodésico, una unidad de medición inercial (IMU) y una cámara fotogramétrica multispectral. Todo este sistema se encontraba montado en un avión Aerocomander 500S. Asimismo, el vuelo contó con el apoyo terrestre de estaciones GPS geodésicas de doble frecuencia que operaban sobre

puntos de la red POSGAR 07. Estas estaciones se distribuyeron de tal manera que, durante la inicialización del IMU, la distancia al avión fuera menor a los 10 km y posteriormente no superara los 50 km. El relevamiento fue realizado en noviembre de 2016 en el marco de un convenio de colaboración científica y tecnológica, y cubrió una superficie total de 5600 ha en tres horas de vuelo con una altura media de 1000 m (Figura 2) (Moralejo *et al.*, 2018).

Una vez obtenidos e integrados todos los puntos, fue necesario ajustar los desplazamientos entre las nubes de puntos LiDAR correspondientes a diferentes líneas de vuelo parcialmente superpuestas entre sí. Las diferencias de altura fueron minimizadas a partir de un ajuste de mínimos cuadrados que incluyó transformaciones de similitud afectadas a cada trayectoria de vuelo. Se obtuvo así una nube matemáticamente ajustada con un ruido típico de 5 cm. El resultado fue un conjunto de puntos en



**Figura 2.** (a) MDT obtenido del vuelo LiDAR; (b) ruta de vuelo; (c) avión Aerocomander 500S perteneciente a Consultar Consultores Argentinos Asociados SA; (d) MDT obtenido mediante SfM-MVS; (e) ruta del VANT; (f) VANT DJI Phantom 4 pro perteneciente a la Facultad de Ciencias Naturales y Museo de la Universidad Nacional de La Plata.

3D con una densidad de 18 pts/m<sup>2</sup>, con un *Root-mean-square error* (RMSE) de 7 cm en la componente vertical y de hasta 12 cm en las componentes horizontales. Finalmente, los puntos de control GPS fueron utilizados para ajustar espacialmente la nube LiDAR a POSGAR07. En consecuencia, las alturas consideradas en el modelo de terreno fueron alturas geodésicas POSGAR07.

En estas condiciones se procedió a visualizar y clasificar los puntos con el *software* Quick Terrain Modeler (QTM), que permitió discriminar, mediante algoritmos estándar, los puntos correspondientes a vegetación alta, media y baja, suelo y eventuales construcciones. Finalmente, seleccionamos aquellos puntos correspondientes al suelo (*ground*) y generamos un MDT con una resolución espacial de 14 cm (Figura 2-a).

### **Relevamiento con VANT y SfM-MVS**

El uso adecuado de la técnica *structure from motion multi-view stereo* permite obtener modelos tridimensionales de alta resolución de forma rápida y a bajo costo (Carrivick et al., 2016). Los algoritmos surgen de avances en ciencias de visión por computador y fotogrametría tradicional que fueron desarrollados en las últimas décadas. Principalmente se utiliza *Scale-Invariant Feature Transform* (SIFT) (Lowe, 2004) para la construcción de una nube abierta con puntos localizados tridimensionalmente. A partir de estos puntos, es posible obtener los parámetros intrínsecos (distancia focal, deformación de la lente, etc.) y extrínsecos (posición y orientación) de la cámara en cada una de las imágenes (Carrivick et al., 2016). Posteriormente, se utiliza un algoritmo que permite densificar esta nube de puntos a una nube densa, usualmente con millones de puntos (Furukawa y Ponce, 2007).

El primer paso en el flujo de trabajo es la adquisición de las fotografías para construir el modelo virtual. Las fotografías se tomaron en un único día en octubre de 2019, mediante un vehículo aéreo no tripulado (VANT) marca DJI Phantom 4 pro. La unidad cuenta con una cámara de 20 Mpx con sensor de 1" CMOS *global shutter*. A fin de optimizar el tiempo de vuelo, se generó un polígono con límites del área a relevar en Google Earth y se importó la aplicación Pix4D capture. En esa plataforma se configuraron las líneas de vuelo garantizando un solapamiento de 70% sobre la línea de vuelo y

un 60% con la línea contigua. La superficie total relevada fue de 30 ha, con una altura de vuelo de 80 m. El ángulo de la toma fue de 90°. Para la cobertura total del área se realizaron tres vuelos, en los que se obtuvieron 1052 fotografías.

Para el escalado, georreferenciación y validación del modelo se colocaron 30 marcadores sobre el área a relevar. Se usaron los mismos puntos de control utilizados para la georreferenciación del LiDAR y se sumaron otros obtenidos a partir de mediciones realizadas con una estación total Kolida KTS 440. En consecuencia, las alturas geodésicas también fueron referidas a POSGAR07.

Para procesar las imágenes y calcular el modelo virtual se utilizó el *software* AgiSoft PhotoScan Professional. Se obtuvo una nube de 120 millones de puntos, una ortofoto con una resolución espacial de 2 cm y un modelo de elevación de la superficie con una resolución espacial de 11 cm.

Para la georreferenciación y validación se tomaron 15 puntos de control y 15 *check points*, respectivamente, manteniendo una distribución homogénea de ellos. Para establecer la distribución de ambos conjuntos de puntos, se siguieron las recomendaciones de Sanz-Ablanedo et al. (2018), ubicándolos no solo en la periferia sino también en el centro del área a relevar. También se ajustó la cantidad de puntos de control y *check points* para el área de estudio. Naturalmente, los puntos utilizados para la validación no participaron del proceso de ajuste del modelo. La ubicación de los marcadores fue realizada manualmente sobre las fotografías. El RMSE de los puntos de control fue de 12 cm y el de los *check points* fue de 16 cm.

Una vez obtenida la nube de puntos generada mediante SfM-MVS, se procedió a clasificar y obtener los puntos correspondientes al suelo (*ground*) con el *software* QTM y así poder generar el MDT con una resolución espacial de 11 cm (Figura 2-d).

### **Análisis de visibilidad y movilidad con ambos MDT**

Una vez obtenidos los MDT de cada relevamiento, se procedió a realizar los análisis de visibilidad y movilidad en diferentes sectores del sitio arqueológico. Por lo general, para ambos análisis se pueden considerar distintos parámetros, como topografía, vegetación y estructuras habitacionales,

entre otros, cuya selección y/o combinación dependen del objetivo propuesto. Cuanta más importancia les demos a estos factores, más nos aproximaremos a la representación de la realidad espacial del lugar, por lo que siempre es recomendable –independientemente del análisis que se realice– hablar de modelos teóricos o potenciales. En nuestro caso se utilizó, tal como el producto MDT lo indica, la topografía como parámetro de cuantificación. Esta posee un rol clave en la configuración del paisaje y, por ende, en los resultados de los estudios de visibilidad y accesibilidad.

Antes de realizar los análisis, se procedió a unificar la resolución espacial de ambos MDT para poder realizar las comparaciones. Para ello se remuestreó la resolución espacial del MDT SfM-MVS, que pasó de 11 cm a 14 cm.

Luego, para llevar a cabo ambos análisis se utilizaron diferentes herramientas de cálculo espacial del *software* SIG ESRI ArcMap. Los sectores seleccionados corresponden a lugares donde se detectaron las mayores discrepancias en los MDT: *kancha* “Casa del Curaca”, *kancha* “y”, *kancha* “5f” y Cerro Aterrizado Oriental.

En el caso de la visibilidad, se generó una cuenca visual simple binaria desde un punto de observador colocado dentro de cada uno de los sectores mencionados. A cada punto se consideró una altura (*offset A*) de 1,64 m y un radio de visión que alcanzó la totalidad de la extensión del MDT. Esto último se mantuvo dentro de los parámetros de visión considerados para otros trabajos (Moralejo y Gobbo, 2015, 2017; Moralejo *et al.*, 2020). El resultado de este análisis muestra la superficie de un territorio que es visible, o no visible, desde un punto de observación específico (Wheatley y Gillings, 2000). Es decir, permite obtener una nueva cobertura ráster con dos valores (binaria): celdas con valor 1 (visibles) y celdas con valor 0 (no visibles).

En cuanto a la movilidad, se evaluó la accesibilidad (o conectividad) entre los mismos puntos mencionados anteriormente y se calculó el camino óptimo (o de menor coste) en sentido N-S y W-E, es decir entre la *kancha* “y” y la *kancha* “5f”, y entre la *kancha* “Casa del Curaca” y el Cerro Aterrizado Oriental, respectivamente.

Las herramientas SIG utilizadas para el cálculo de movilidad fueron: *Path Distance* y *Cost Paths* (Chang, 2018; Esri ArcGIS Desktop, 2019). La primera permite calcular el costo acumulado de manera

anisotrópica desde los puntos de origen, teniendo en cuenta la dirección del movimiento al introducir el factor vertical. Con la segunda, es posible generar el camino óptimo desde dichos puntos hacia los de destino. Vale resaltar que, al momento de realizar el camino óptimo, se introdujo el plano del sitio como barrera (plano del sitio como *No Data*), de modo que estuviera contemplada la configuración arquitectónica en el desplazamiento.

Una vez realizados ambos análisis sobre cada MDT, fue necesario evaluar la potencialidad de las similitudes y diferencias mediante test estadísticos. Para la visibilidad se utilizó el coeficiente de concordancia simple (*Simple Matching Coefficient* - SMC), que es una medida de similaridad empleada en distribuciones binarias donde son igual de importantes las coincidencias en uno y otro valor (“lo no visible” = 0; “lo visible” = 1) (Amat Rodrigo, 2018). Para la movilidad, se cuantificó la diferencia entre los caminos predictivos generados teniendo en cuenta la distancia planimétrica y altimétrica entre ambos modelos de MDT. Para ello, los caminos se transformaron en una nube de puntos tridimensional que pudo ser comparada mediante la herramienta *cloud to cloud* desde el *software* Cloud Compare.

## RESULTADOS

Como ya hemos mencionado, las nubes de puntos obtenidas con LiDAR y SfM-MVS fueron clasificadas con el *software* QTM. Este programa toma en cuenta toda la nube de puntos y la clasifica según algoritmos propios para discriminar los diferentes tipos de vegetación (baja, media, alta), el suelo (*ground*) y las construcciones arquitectónicas. En el caso de la nube LiDAR, los puntos correspondientes al suelo permitieron generar el MDT. En cuanto a la nube de puntos SfM-MVS, esta, a diferencia de la nube LiDAR, no posee puntos por debajo de la vegetación, por lo que le es más difícil diferenciarla y clasificarla; es por ello que en los lugares donde hay mayor densidad arbórea, el *software* la toma como suelo en lugar de vegetación (Figura 3). Esta primera instancia ya permite vislumbrar un elemento a considerar en una posterior toma de decisiones.

Una vez obtenidos los MDT mediante LiDAR y SfM-MVS, con un RMSE de la altura de 10 cm y 16 cm respectivamente, se procedió a su comparación mediante una sustracción ráster (Figura 3-a). Al considerar la diferencia vertical entre ambos MDT

registrada en cada pixel (en sentido LiDAR-VANT) en los sectores sin vegetación, se obtiene una media de -0,85 m con un desvío estándar de 1,57 m. Por lo tanto, en términos absolutos, el MDT LiDAR se encuentra en promedio por debajo del MDT SfM-MVS. La diferencia registrada entre ambos productos no es obviamente homogénea y dependerá fundamentalmente de la presencia de vegetación, de su densidad y de su altura.

Se puede observar que los valores menores a 1 m en la vertical (gama del amarillo de la Figura 3-a, cuyo rango oscila entre -1 m y 1 m) se encuentran principalmente en el área central y suroeste del sector estudiado, y corresponden a zonas prácticamente libres de vegetación o donde esta es muy escasa. Es solo en estos sectores donde el MDT del VANT representa mejor el terreno y se vuelve comparable al obtenido a partir de LiDAR.

Las mayores diferencias se concentran hacia las márgenes del área de estudio y corresponden a zonas de abundante vegetación. Los valores con diferencias negativas (gama del azul en la Figura 3-a) alcanzan hasta -13 m; mientras que los valores con diferencias positivas (gama del rojo en la Figura 3-a) alcanzan hasta 15 m. Estas diferencias positivas se deben a la ausencia de información del MDT del VANT producto de la falta de solapamiento entre las líneas de vuelo, y a que se observan en zonas acotadas de las márgenes del sector oeste (sobre una de las estribaciones de la sierra del Shincal próxima a la Casa del Curaca) y noreste de la figura 3-a. Por otro lado, esta diferencia también responde a la presencia de vegetación, que alcanza alturas de 10 a 15 m en las zonas de cárcavas localizadas en la margen del sector norte de la figura mencionada.

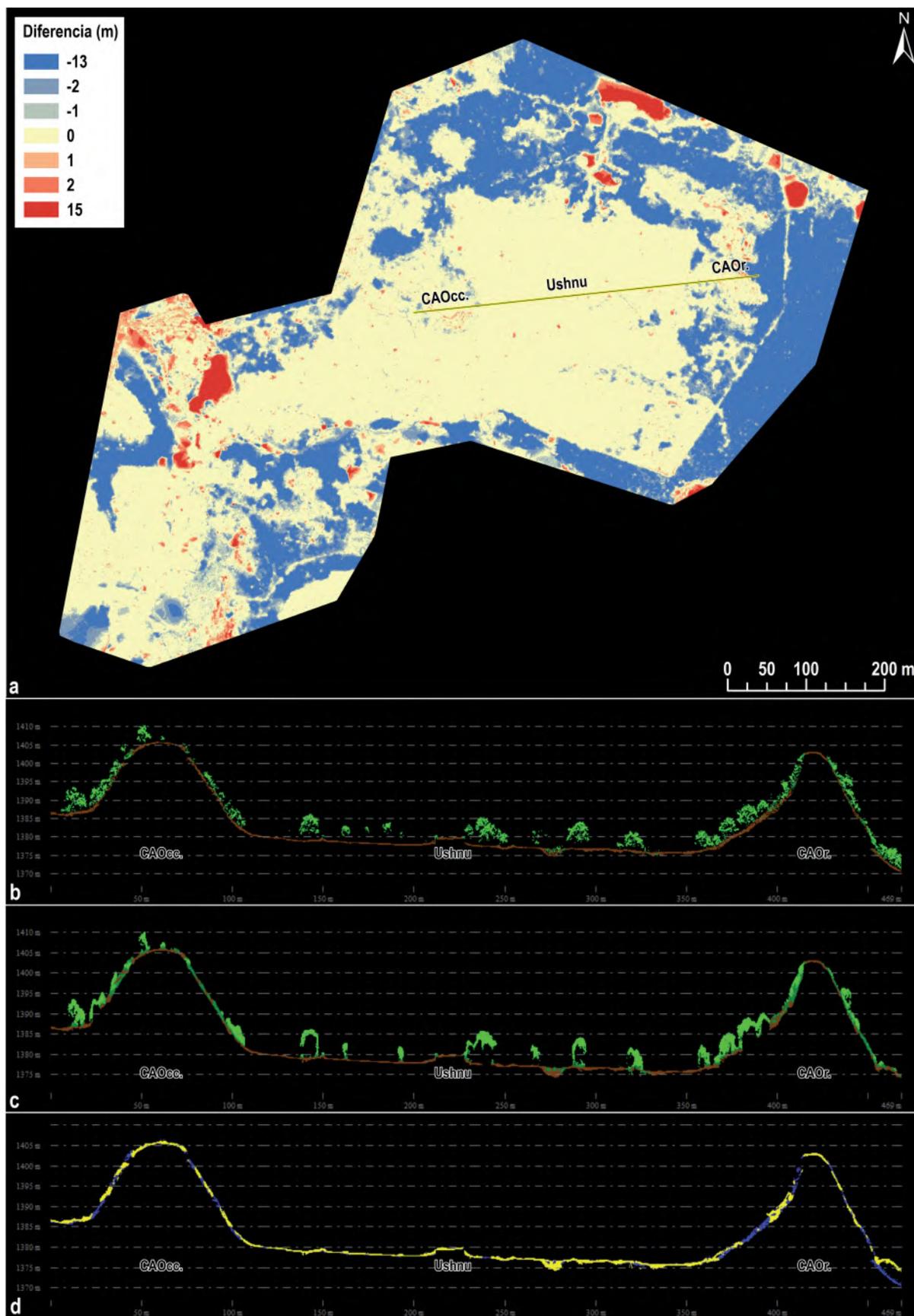
La tarea siguiente fue analizar el efecto de las diferencias entre ambos MDT al momento de realizar los estudios arqueológicos del paisaje. De ahí la importancia de comparar con cálculos de visibilidad y movilidad mediante las diversas herramientas SIG.

Los resultados de las cuencas visuales simples realizadas desde los cuatro puntos de observación (*kancha* Casa del Curaca, *kancha* "5f", *kancha* "y" y Cerro Aterrazado Oriental) ponen de manifiesto las diferencias entre ambos MDT, principalmente localizadas en aquellos sectores donde se registra la mayor presencia de vegetación (gama del azul y del rojo en la Figura 3-a, como se mencionó anteriormente) (Figura 4). Desde la *kancha* Casa del Curaca, la visibilidad se concentra hacia el sector occidental del sitio, teniendo en cuenta

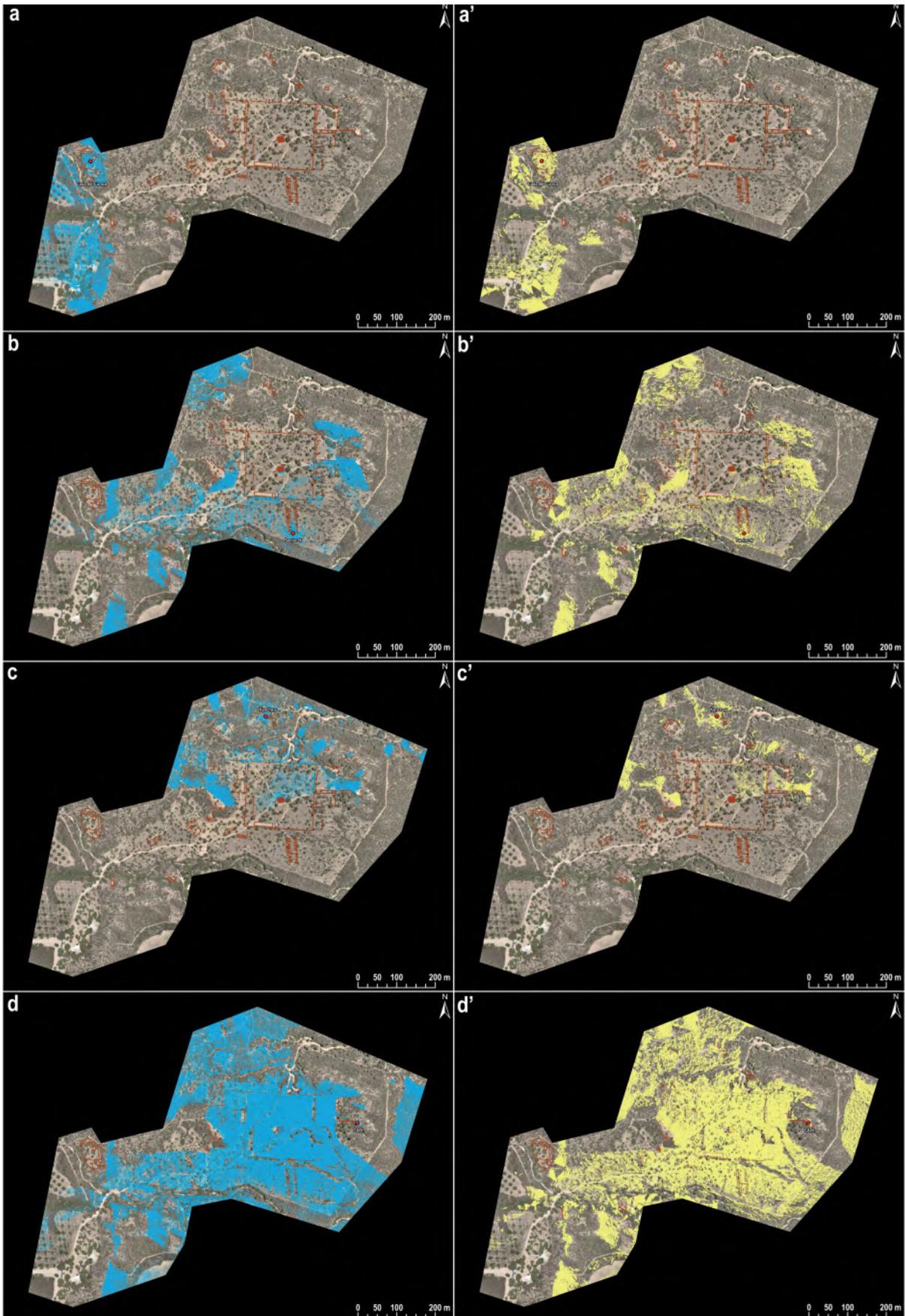
su ubicación sobre la ladera oeste de una de las estribaciones de la serranía del Shincal y que actuaría como una barrera natural. En relación con ello, queremos destacar que en el MDT SfM-MVS se observa un sector visible hacia el oriente de la *kancha*, lo cual difiere de lo registrado en el MDT LiDAR (Figura 4-a). Desde la *kancha* "5f", la cuenca visual se distribuye de manera heterogénea hacia los cuatro puntos cardinales del sitio (Figura 4-b). Algo distinto se observa en la *kancha* "y", donde la visibilidad se distribuye de modo heterogéneo hacia el norte del eje imaginario que conforman los cerros aterrazados y la plaza. Asimismo, se puede ver una superficie mayor de la plaza con el MDT LiDAR (Figura 4-c). Por último, desde el punto observador colocado en la cima del Cerro Aterrazado Oriental se logra la mayor visibilidad del sitio, lo que era de esperar teniendo en cuenta su altura (Figura 4-d). En los cuatro casos, la mayor superficie visible se registró en el MDT LiDAR, lo cual se debe a la potencialidad de esta tecnología durante el registro de campo para luego poder categorizar y filtrar los puntos que representan la vegetación.

Ante este primer análisis comparativo, fue necesario someter estos resultados a un test estadístico para determinar el grado de significancia de las diferencias observadas. Mediante el coeficiente de concordancia simple, o *Simple Matching Coefficient* (SMC), se pudo determinar la similitud de las cuencas visuales. Se trata de una medida empleada en distribuciones binarias –como en el caso de las cuencas visuales– que tiene en cuenta las coincidencias en ambos valores: valor 0 para "lo no visible" y valor 1 para "lo visible". Al mismo tiempo, este índice también se puede expresar usando la distancia de concordancia simple (*Simple Matching Distance* - SMD), que se calcula restándole a 1 el SMC. Los resultados de este test arrojan que, a mayor cercanía con el valor 1, existe mayor similitud. Eso muestra un alto grado de similaridad entre los valores visibles y los no visibles de ambos MDT, lo que indica que no existe una diferencia significativa entre ellos (Tabla 1).

Ahora, si bien en términos generales podríamos decir que no existen diferencias significativas en las cuencas visuales generadas con ambos MDT, al momento de profundizar en la lectura de cada ráster vemos que existen zonas visibles que no coinciden con lo que realmente se ve en el sitio. Eso sucede, como mencionamos más arriba, con la visibilidad desde la Casa del Curaca (Figura 4-a): en la cuenca del MDT SfM-MVS se marca como visible



**Figura 3.** (a) Trazo del perfil desde el Cerro Aterrazado Occidental (CAOcc.) al Cerro Aterrazado Oriental (CAOr.) y diferencias entre los dos MDT; (b) Perfil de la nube de puntos LiDAR clasificada; (c) Perfil de la nube de puntos SfM-MVS clasificada; (d) Perfiles solo con los puntos *ground* de la nube LiDAR (azul) y SfM-MVS (amarillo).



**Figura 4.** Resultados de los análisis de visibilidad efectuados: (a) *kancha* Casa del Curaca; (b) *kancha* "5f"; (c) *kancha* "y"; (d) Cerro Aterrazado Oriental. Izquierda: celdas visibles en color azul generadas sobre el MDT LiDAR. Derecha: celdas visibles en color amarillo generadas sobre el MDT SfM-MVS.

Kancha "y"	SMC= 0,9454	SMD= 0,0546
Sector "5f"	SMC= 0,8976	SMD= 0,1024
Kancha Casa del Curaca	SMC= 0,9487	SMD= 0,0513
Cerro Aterrazado Oriental (CAOr.)	SMC= 0,7814	SMD= 0,2186

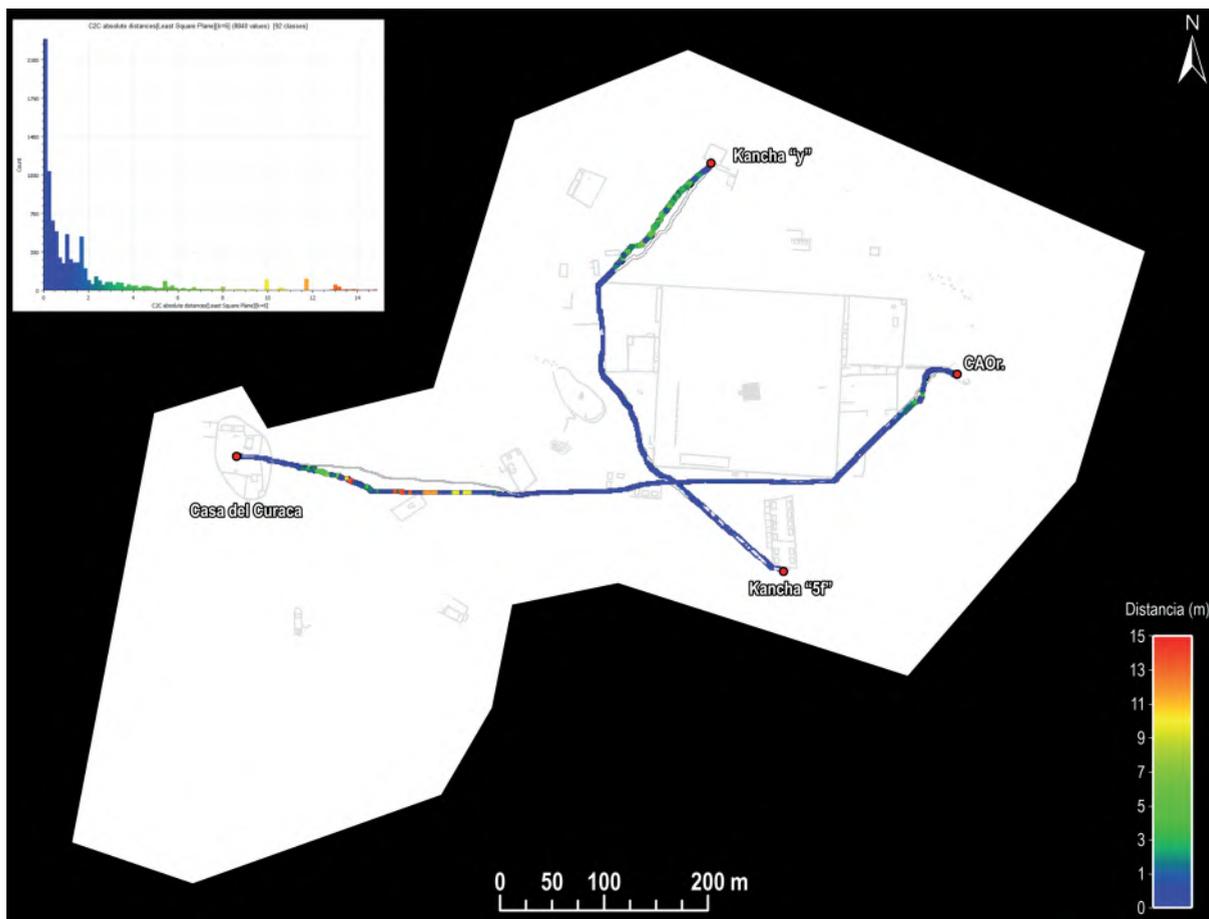
**Tabla 1.** Resultado del test de similaridad entre ambos MDT para las cuatro cuencas visuales realizadas (SMC = *Simple Matching Coefficient*; SMD = *Simple Matching Distance*).

un sector hacia el sureste que, en realidad, no es correcto. Esa diferencia, tal como explicaremos en el siguiente acápite de discusiones, se debe a un error del MDT SfM-MVS justo sobre una colina que actúa como barrera natural de aislamiento de la Casa del Curaca.

En cuanto a los resultados del análisis de movilidad basado en el cálculo de caminos óptimos entre diferentes estructuras del sitio, podemos decir que existe semejanza entre las trazas generadas. Se observan leves diferencias en el sector occidental del desplazamiento entre la *kancha* Casa del Curaca y el Cerro Aterrazado Oriental y en el sector septentrional del desplazamiento entre la *kancha* "y"

y la *kancha* "5f" (Figura 5). En ambos casos, las diferencias coinciden con la presencia de vegetación (gama del azul en la Figura 3-a).

Con el propósito de verificar la diferencia entre los caminos óptimos generados, se cuantificó la distancia planimétrica y altimétrica cuando se utilizan ambos MDT. Para ello se realizó una extracción de puntos sobre las líneas de los caminos a una distancia de 0,15 m. De cada uno de estos puntos se extrajo la altura del correspondiente MDT. Estos archivos de puntos fueron comparados con la herramienta *cloud to cloud* del Cloud Compare, mediante la cual se pueden analizar espacialmente las nubes tridimensionales de puntos (Figura 5) y las diferencias que registra la distancia real (*i.e.*, en las tres dimensiones) entre los puntos. En la Figura 5 se puede observar que la línea de puntos blanca representa el camino óptimo sobre el MDT del LiDAR. Esta línea de puntos ha sido tomada como referencia. Los caminos óptimos generados sobre el MDT SfM-MVS se representan con una escala de colores que considera la distancia tridimensional entre las trazas. El promedio de las diferencias



**Figura 5.** Caminos óptimos generados. La línea blanca indica la traza del camino correspondiente al MDT LiDAR. La línea de diferentes colores indica el camino correspondiente al MDT SfM-MVS y su distancia 3D respecto del anterior.

entre los caminos óptimos realizados entre la *kancha* Casa del Curaca y el Cerro Aterrazado Oriental y entre la *kancha* “y” y la *kancha* “5f” arrojan un valor de 1,6 m y un desvío estándar de 2,58 m. El 90% de los puntos de los caminos sobre el MDT SfM-MVS se encuentran a una distancia inferior a 4,27 m con respecto al camino óptimo realizado sobre el MDT LiDAR. Todo ello indica que no se observan diferencias significativas en los trazados resultantes de ambos modelos.

## DISCUSIONES

La fotogrametría SfM-MVS es una metodología atractiva para generar modelos topográficos debido a que contempla requisitos menos estrictos que la fotogrametría tradicional y, a su vez, presenta un alto nivel de automatización de la solución geométrica y obtención de los parámetros intrínsecos de la cámara. La facilidad de ejecución y procesado, sumada a los bajos costos, permiten realizar modelos de elevación digitales con una alta resolución espacial (Fonstad et al., 2013). Esta técnica se ha consolidado como adecuada tanto para relevamientos topográficos (Mancini et al., 2013; Carrivick et al., 2016; Guardo et al., 2021) como para el registro específico de sitios arqueológicos (Verhoeven et al., 2012; De Reu et al., 2013; Green et al., 2014; Hatzopoulos et al., 2017; Vilbig et al., 2020; García Lerena y López, 2021) y, en determinadas condiciones, los resultados son comparables a los obtenidos mediante LiDAR a nivel submétrico (Fonstad et al., 2013; Green et al., 2014; Hatzopoulos et al., 2017). A fin de obtener modelos comparables entre ambas técnicas, es imprescindible que el modelo fotogramétrico esté georreferenciado con puntos de control o con un GNSS diferencial integrado y validado con puntos de chequeo (Bilmes et al., 2019).

Por otro lado, la tecnología LiDAR ha demostrado ser una técnica de teledetección revolucionaria empleada desde hace varios años para la creación de modelos de elevación con muy alta resolución horizontal y vertical (Chase et al., 2012; Olaya, 2020). Gracias a la emisión de millones de haces de luz láser, es capaz de detectar la topografía y las estructuras arqueológicas (caminos antiguos, terrazas agrícolas, acueductos, recintos habitacionales, entre otros) que están cubiertas y ocultas por la vegetación, como así también proporcionar información sobre la posición de la copa de los árboles (Briese, 2006; Doneus et al., 2008; Vosselman y

Maas, 2010; Arranz Justel, 2013; Doneus y Golden et al., 2016; von Schwerin, et al., 2016; Tapete et al., 2017). Mediante esta técnica se pueden registrar elementos del paisaje que no resultaría posible identificar con otras tecnologías, como por ejemplo la fotografía (Bewley et al., 2005; Devereux et al., 2005; Chase et al., 2012; De Feo et al., 2013; Kokalj y Hesse, 2017). En este sentido, se ha comprobado que, para áreas con vegetación frondosa –como en la península de Yucatán y Honduras, en Mesoamérica, la Amazonia ecuatoriana y boliviana, e incluso en nuestra área de estudio en la serranía del Shincal del centro-oeste catamarqueño, entre otras–, los datos LiDAR fueron altamente reveladores, ya que permitieron detectar varias construcciones ocultas por la vegetación (Prümers, 2014; Moralejo et al., 2018; Iriarte et al., 2020).

Como se puede apreciar en este artículo, ambas metodologías permiten generar un MDT y obtener resultados satisfactorios, dependiendo siempre de la presencia de vegetación y de la escala de análisis.

Al analizar la distribución de las diferencias entre los MDT, puede observarse que existe una correlación entre las zonas con valores negativos y la vegetación alta y tupida (Figura 3-a, color azul). Cuando en el modelo de superficie del VANT los puntos correspondientes a la vegetación son correctamente clasificados y filtrados en el cálculo del MDT, se obtiene una mejor representación del terreno, aunque con resolución muy variada.

El MDT obtenido por LiDAR se ajusta a la realidad a nivel de pocos centímetros, mientras que el MDT obtenido por SfM-MVS posee diferencias significativas en aquellos puntos donde hay vegetación. Esto se debe a que el filtrado de la vegetación es sustancialmente más eficiente en los relevamientos con LiDAR (Fonstad et al., 2013) y a que en esas zonas la luz láser alcanza la superficie del terreno y los puntos *ground* son registrados. Por otro lado, los cambios en la cobertura vegetal entre las diferentes fechas de relevamiento entre el registro con LiDAR y con SfM-MVS podrían explicar parcialmente las diferencias entre ambos MDT. Asimismo, en los relevamientos con SfM-MVS, los errores del modelo se incrementan en zonas vegetadas por el propio movimiento de la vegetación entre los fotogramas adquiridos por el VANT (Micheletti et al., 2015).

En los relevamientos con LiDAR, los pulsos láser son capaces de pasar a través de los intersticios de la vegetación, con lo cual se logra obtener puntos del terreno ubicados por debajo. En

los relevamientos fotogramétricos, si la vegetación es densa, no es posible obtener datos del terreno en estas áreas (Anders *et al.*, 2019). Una forma de identificar los distintos tipos de vegetación y así poder mejorar los modelos digitales de elevación obtenidos sería complementar el relevamiento con vuelos oblicuos (Zhou y Zhang, 2020). Estos vuelos permiten tener otra perspectiva del paisaje y, quizás, llegar al terreno de una forma más eficiente que mediante una fotografía nadir.

Existen diversas estrategias para generar la clasificación de las nubes de puntos obtenidas por SfM-MVS. Algunas de estas se focalizan en los contrastes topográficos, mientras que otras, por los valores en la reflectancia de la superficie. Específicamente para clasificar la vegetación, se utilizan índices de vegetación, tanto en el espectro visible como en el infrarrojo cercano (Anders *et al.*, 2019). Si la zona es densamente vegetada y ningún punto del sustrato es relevado, los puntos clasificados como vegetación serán removidos y la superficie topográfica será interpolada de los puntos remanentes de los alrededores. Esto último se puede observar hacia las márgenes del área de estudio (Figura 2), donde existe una densa vegetación. Esta densidad responde a que son zonas donde la vegetación no ha sido raleada durante las tareas de revalorización patrimonial del sitio. En este sentido, se espera que en estos contextos, la diferencia entre los MDT LiDAR y MDT SfM-MVS sea mayor (véase Figura 3-a, valores negativos en color azul localizados en las márgenes del área de estudio). Fonstad *et al.* (2013) mencionan diferencias en los modelos del terreno relevados con LiDAR y SfM-MVS similares a los registrados en este trabajo. Sin duda, la manera de minimizar estas diferencias es a través de una correcta clasificación de la vegetación y considerando que, en esas zonas, el MDT SfM-MVS será el resultado de una interpolación de puntos de terreno del entorno, con los errores correspondientes.

Por otro lado, en la Figura 3-a también se puede apreciar que hay pocos sectores hacia el occidente y al oriente del área de estudio donde la diferencia entre los modelos fue mayor (valores positivos indicados en color rojo), que coinciden con las zonas de menor solapamiento de las imágenes para la generación del MDT SfM-MVS. Estos sectores representan resaltos topográficos, por lo tanto, al mantener la altura de vuelo constante en el VANT respecto de la altura de despegue, el área relevada por cada fotograma es menor, lo que conlleva a obtener menor cantidad de puntos por superficie

y, por lo tanto, producir zonas con mayor incertidumbre y error.

Numerosos trabajos han utilizado diferentes modelos de elevación digital y con diferente tipo de resolución para generar cuencas visuales (Wheatley y Gillings, 2000; Llobera, 2003; Moralejo y Gobbo, 2015, 2017; Fábrega Álvarez, 2017; Wynveldt *et al.*, 2018; Fábrega Álvarez y Parcerou Oubiña, 2019; Moralejo *et al.*, 2020, entre otros) y caminos óptimos (De Feo y Gobbo, 2006; Fábrega Álvarez, 2016; Moralejo *et al.*, 2020; Mignone, 2021, entre otros). En todos los casos, se deja entrever que el tamaño del pixel es uno de los factores determinantes en el resultado, dependiendo siempre de la escala de trabajo, local o regional, que amerite la problemática de estudio.

Ahora, la pregunta es ¿cómo impactan las diferencias entre los MDT generados con LiDAR y SfM-MVS en los estudios espaciales de visibilidad y movilidad? Su análisis detallado permite concluir que, en algunos casos, provocan un impacto no deseado en la comprensión del paisaje pretérito. Es por ello que nos interesa resaltar determinadas situaciones –como la presencia de vegetación densa en el terreno y la existencia de zonas de menor solapamiento de imágenes capturadas por el VANT– que han provocado diferencias para nosotros importantes en estos análisis espaciales.

Una de ellas corresponde a los sectores de abundante vegetación (véase Figura 3-a, valores negativos de color azul) que se encuentran, como ya mencionamos más arriba, mayormente localizados en las zonas periféricas del área de estudio. En ellos se identificaron las mayores diferencias en los análisis de movilidad: segmento oeste del desplazamiento entre la *kancha* Casa del Curaca y el Cerro Aterrazado Oriental y segmento norte del desplazamiento entre las *kanchas* “y” y “5f”. Asimismo, esta vegetación también provocó diferencias en las cuencas visuales de los cuatro puntos. Eso puede observarse, por ejemplo, en la visibilidad desde la *kancha* “y”, desde la cual se puede ver una superficie mayor de la plaza con el MDT del LiDAR (Figura 4-c). En términos generales, las cuencas visuales del MDT SfM-MVS alcanzan una superficie menor que las generadas con el LiDAR.

Otra situación fue la cuenca visual obtenida desde el punto observador de la *kancha* Casa del Curaca, donde se detectó que la “ausencia” de un cerro que actúa como barrera visual provocó que la visibilidad del MDT SfM-MVS fuera más amplia

y, por lo tanto, no ajustada a la realidad. Esta situación podría salvarse a futuro aumentando el solapamiento en dichos sectores, modificando la altura del vuelo y/o agregando líneas de vuelo para hacer fotografías oblicuas. Esto último también lo manifiestan James *et al.* (2017) y Barba *et al.* (2019) cuando hacen una comparación entre modelos generados por fotografías solo verticales y modelos generados por fotografías verticales y oblicuas.

Como podemos notar, independientemente de lo que señalen los test estadísticos realizados, existen diferencias que es necesario identificar para no caer en errores de interpretación. En nuestro caso, pudimos dar cuenta de ello a través de la comparación entre dos MDT generados con tecnologías de distinta técnica y calidad pero, en los casos en que solo se usen datos SfM-MVS, deben tomarse precauciones. Si bien hay una gran producción de artículos que comparan los resultados de relevamientos topográficos de alta resolución con LiDAR y SfM-MVS, este trabajo se constituye como innovador respecto de la comparación de los análisis espaciales de visibilidad y movilidad relacionados con el comportamiento humano. Todo indica que hay que tener mucho cuidado con la metodología utilizada y la toma de decisiones al realizar este tipo de cálculos. Ello también implica ser conscientes del error que estamos dispuestos a aceptar.

Por otro lado, cabe destacar que esta comparación de técnicas resulta válida para topografías similares como nuestro caso de estudio en El Shincal de Quimivil, y que no es necesariamente extrapolable para aquellos lugares con mayor vegetación.

## CONCLUSIONES

En este artículo hemos explorado el uso, los límites y las potencialidades que ofrecen dos metodologías diferentes para el estudio de la espacialidad andina en un sitio incaico del Noroeste argentino. Para ello, además de comparar y analizar las diferencias topográficas de los resultados obtenidos, nos centramos en los aportes de cada técnica en función de resolver problemáticas arqueológicas vinculadas con el comportamiento humano. De este modo, hemos elegido trabajar con visibilidad y movilidad, sabiendo que constituyen aspectos de gran relevancia para estudiar los paisajes del pasado y que, en el caso de El Shincal de Quimivil, se vienen explorando hace un tiempo con resultados satisfactorios.

Para llevar a cabo estos análisis fue necesario contar con datos y herramientas SIG adecuadas, que permitieron profundizar en la asociación entre diversos elementos del paisaje. Siempre teniendo en cuenta que se trata de aspectos que están sujetos a múltiples variables físicas y culturales, que a veces carecen de registro arqueológico o que son difíciles de cuantificar.

Ambas tecnologías se basan en la teledetección o detección remota, razón por la cual resultan beneficiosas para la arqueología, ya que permiten potenciar la exploración y el estudio arqueológico de cualquier sitio de una forma no invasiva ni destructiva (Vilbig *et al.*, 2020). Asimismo, su uso facilita la virtualización del patrimonio cultural y natural en pos de su conservación y difusión (Chase *et al.*, 2012; Moralejo *et al.*, 2018).

La popularización del uso de la fotogrametría SfM-MVS mediante VANT produjo la democratización de los relevamientos topográficos de alta resolución (Westoby *et al.*, 2012). Sin embargo, es importante conocer las limitaciones del método para obtener resultados válidos. El error intrínseco que se registró en el modelado no es un parámetro certero para establecer la precisión del modelo (Sanz-Ablanedo *et al.*, 2018) y es necesario obtener validaciones externas para cuantificar los errores (Bilmes *et al.*, 2019). Al comparar los resultados con otras tecnologías de relevamiento como LiDAR, fue posible determinar las limitaciones de la técnica. En este trabajo se comprobó que los modelos del terreno generados con SfM-MVS presentan mayores errores en zonas densamente vegetadas. También cabe resaltar que, ante diferencias topográficas abruptas, es necesario establecer una altura de vuelo dinámica, con el fin de que la altura relativa a la superficie se mantenga constante.

Una de las potencialidades del VANT es que, al haberse realizado con una altura de vuelo menor a la del LiDAR, permitió generar una ortofoto con una resolución mayor. A ello debemos sumar los bajos costos, la rapidez logística y su facilidad operativa (recuperación y procesamiento de datos) al momento de realizar el relevamiento. En relación con esto, si bien el LiDAR utilizado en El Shincal de Quimivil poseía una cámara fotogramétrica multiespectral, no siempre es un componente con el que los datos LiDAR puedan contar. De modo que la fotogrametría SfM-MVS realizada con VANT se vuelve beneficiosa para generar ortomosaicos de color verdadero (Vilbig *et al.*, 2020).

Una alternativa virtuosa de combinar ambas técnicas es contar con el mosaico fotogramétrico del VANT y el MDT del LiDAR.

En cuanto a las potencialidades que ambas metodologías nos brindan ante determinadas problemáticas antropológicas como la visibilidad y movilidad, podemos decir que su uso es satisfactorio e incluso complementario. En este sentido, destacamos la elección de estos análisis espaciales para examinar la utilización de dos MDT generados a partir de distintas metodologías. Se trata de análisis muy utilizados en los estudios sobre espacialidad andina y que directamente remiten a prácticas intrínsecas propias de la vida cotidiana. Con ambos MDT se puede lograr una aproximación relativa al espacio-paisaje del pasado, pero sin olvidar que es importante y necesario reconocer aquellas situaciones particulares en que la diferencia es notoria, lo cual puede generar interpretaciones erróneas. Ejemplo de ello fue la cuenca visual obtenida desde la *kancha* “y” y la *kancha* Casa del Curaca y el desplazamiento en determinados sectores dentro del sitio. En este sentido, la presencia de vegetación densa es clave, ya que provoca que la nube del VANT no la discrimine y la considere como parte del terreno, lo que, *a posteriori*, generaría nuevas barreras que afectan los análisis espaciales.

Quizás una de las claves sea poder decidir el uso que les daremos a estas tecnologías de acuerdo con la particularidad del terreno. Cuando se pretenda trabajar en áreas con vegetación baja o ausente, se puede considerar el uso de modelos de elevación digital obtenidos por SfM-MVS en lugar de LiDAR.

Sin duda alguna, el LiDAR ha demostrado ser una tecnología eficiente para los estudios arqueológicos. En cuanto al SfM-MVS, será importante ajustar determinadas cuestiones como la altura y los vuelos oblicuos. Por supuesto, siempre atendiendo a la escala de nuestro trabajo y al reconocimiento del error que estamos dispuestos a aceptar.

### Agradecimientos

A la UNLP y al CONICET, por el financiamiento de las investigaciones. A la cátedra de Levantamiento Geológico (FCNyM, UNLP), por el préstamo del VANT. Al Dr. Facundo De Martino, por su colaboración en el campo durante la etapa de relevamiento con el vehículo aéreo. Al Dr. Iván Pérez, por sus consejos al momento de elegir

los test estadísticos. A la Dirección Provincial de Antropología de Catamarca, por los permisos de investigación en el sitio. A la comunidad y Municipalidad de Londres por su apoyo constante en estos años de trabajo. A quienes evaluaron el manuscrito, por sus valiosas sugerencias.

### REFERENCIAS CITADAS

- Acuto, F. A. (2012). Landscapes of Inequality, Spectacle and Control: Inka Social Order in Provincial Contexts. *Revista Chilena de Antropología*, 25, 9-64.
- Amat Rodrigo, J. (2018). *Sistemas de recomendación con R*. <https://bit.ly/3FPV2RQ>
- Anders, N., Valente, J., Masselink, R. y Keesstra, S. (2019). Comparing Filtering Techniques for Removing Vegetation from UAV-Based Photogrammetric Point Clouds. *Drones*, 3(3), 61.
- Arranz Justel, J. J. (2013). *Diseño, optimización y análisis de sistemas basados en técnicas láser, para el modelado geométrico, registro y documentación, aplicados a entidades de interés patrimonial* [Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid].
- Barba, S., Barbarella, M., Di Benedetto, A., Fiani, M. y Limongiello, M. (2019). Quality assessment of UAV photogrammetric archaeological survey. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W9, 93-100. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W9-93-2019>
- Bewley, R., Crutchley, S. y Shell, C. (2005). New light on an ancient landscape: Lidar survey in the Stonehenge World Heritage Site. *Antiquity*, 79(305), 636-647.
- Bilmes, A., D'Elia, L., Lopez, L., Richiano, S., Varela, A., Alvarez, M. del P., Bucher, J., Eymard, I., Muravchik, M., Franzese, J. y Ariztegui, D. (2019). Digital outcrop modelling using “structure-from-motion” photogrammetry: Acquisition strategies, validation and interpretations to different sedimentary environments. *Journal of South American Earth Science*, 96, 102325. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102325>
- Carrivick J. L., Smith M. W. y Quincey, J. D. (2016). *Structure from Motion in the geo*. Wiley Blackwell.

- Chang, Kang-tsung (2018). *Introduction to geographic information systems*. McGraw-Hill Education.
- Chase, A. F., Chase, D. Z., Fisher, C., Leisz, S. y Weishampel, J. (2012). Geospatial revolution and remote sensing LiDAR in Mesoamerican archaeology. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(32), 12.916-12.921.
- Corrado, G., Giovannetti, M., Balbi, N., Loperfido, M. y Fasciglione, I. (2019). Simetría y configuración espacial de la ritualidad inka: el Complejo 19 de El Shincal de Quimivil como caso de estudio. *Catamarca-Argentina. Haucaypata*, 8, 133-143.
- Couso, M. G., Moralejo, R. A., Giovannetti, M. A., del Papa, L. M., Páez, M. C., Gianelli, J., Giambelluca, L. R., Arnosio, M. y Raffino, R. A. (2011). Análisis de la variabilidad material del Recinto 1-Kancha II: aportes para una comprensión de la política incaica en El Shincal de Quimivil. *Arqueología*, 17, 35-55.
- De Feo, M. E. y Gobbo, D. (2006). Diseño de un modelo predictivo para la localización de tramos de vialidad incaica mediante la utilización de SIG. En A. Pifferetti y R. Bolmaro (Eds.). *Primer Congreso Argentino de Arqueometría: metodologías científicas aplicadas al estudio de los bienes culturales* (pp. 421-428). Humanidades y Artes Ediciones.
- De Feo, M. E., Gobbo, D. y Moralejo, R. A. (2013). Hacer arqueología desde las alturas. *Revista Museo*, 26, 23-30.
- De Reu, J., Plets, G., Verhoeven, G., De Smedt, P., Bats, M., Cherretté, B., De Maeyer, W., Deconynck, J., Herremans, D., Laloo, P., Van Meirvenne, M. y De Clercq, W. (2013). Towards a three-dimensional cost-effective registration of the archaeological heritage. *Journal of Archaeological Science*, 40(2), 1108-1121. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2012.08.040>
- Devereux, B., Amable, G., Crow, P. y Cliff, A. (2005). The potential of airborne lidar for detection of archaeological features under woodland canopies. *Antiquity*, 79(305), 648-660. <https://doi.org/10.1017/S0003598X00114589>
- Doneus, M. y Briese, C. (2006). Digital terrain modeling for archaeological interpretation within forested areas using full-waveform laser scanning. En M. Ioannides, D. Arnold, F. Niccolucci y K. Mania (Eds.). *Proceedings of the 7th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage* (pp. 155-162). Eurographics Association.
- Doneus, M., Briese, C., Fera, M. y Janner, M. (2008). Archaeological prospection of forested areas using full-waveform airborne laser scanning. *Journal of Archaeological Science*, 35(4), 882-893.
- Esri ArcGIS Desktop (2019). *Cómo funcionan las herramientas de distancia de ruta*. ArcMap Website: <https://bit.ly/3sWy8Ru>
- Fábrega Álvarez, P. (2016). Un alto en el camino. Notas acerca del uso de SIG en los análisis de movilidad en arqueología. En M. del C. Mínguez García y E. Capdevila Montes (Eds.). *Manual de Tecnologías de la Información Geográfica aplicadas a la Arqueología* (pp. 159-182). Comunidad de Madrid, Museo Arqueológico Regional.
- Fábrega Álvarez, P. (2017). *Recorriendo y observando paisajes digitales. Una aproximación al análisis arqueológico con Tecnologías de la Información Geográfica (TIG)* [Tesis doctoral, Programa de Arqueología Espacial, Universidad de Jaén, Departamento de Patrimonio Histórico]. <https://core.ac.uk/reader/286605430>
- Fábrega Álvarez, P. y Parcero Oubiña, C. (2019). Now you see me. An assessment of the visual recognition and control of individuals in archaeological landscapes. *Journal of Archaeological Science*, 104, 56-74.
- Farrington, I. S. (1999). El Shincal: un Cusco del Kollasuyu. En C. Diez Marín (Ed.). *Actas del XII Congreso Nacional de Arqueología Argentina*, t. I (pp. 53-62). Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata.
- Fonstad, M. A., Dietrich, J. T., Courville, B. C., Jensen, J. L. y Carbonneau, P. E. (2013). Topographic structure from motion: A new development in photogrammetric measurement. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38, 421-430. <https://doi.org/10.1002/esp.3366>
- Furukawa y. y Ponce, J. (2007). Accurate, dense, and robust multi-view stereopsis. *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1-8. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2007.383246>
- García Lerena, M. S. y López, L. (2021). Relevamiento del patrimonio histórico rural mediante fotogrametría (SfM-MVS) en la región pampeana argentina. "Primera Estancia" de Magdalena (Buenos Aires, Argentina). *Arqueología*, 27(2), 169-181.

- Giovannetti, M. A. (2015). *Agricultura, regadío y molienda en una capital Inkaica. Los sitios El Shincal y Los Colorados, Noroeste Argentino*. British Archaeological Reports, South American Archaeology Series, Archaeopress.
- Golden, Ch., Murtha, T., Cook, B., Shaffer, D. S., Schroder, W., Hermit, E. J., Alcover Firpi, O. y Scherer, A. K. (2016). Reanalyzing environmental lidar data for archaeology: Mesoamerican applications and implications. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 9, 293-308.
- Green, S., Bevan, A. y Shapland, M. (2014). A comparative assessment of structure from motion methods for archaeological research. *Journal of Archaeological Science*, 46, 173-181. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2014.02.030>
- Guardo, N. A., López, L. y Bilmes, A. (2021). Relevamiento topográfico de alta resolución: comparación de modelos del terreno mediante Estación Total y fotogrametría SfM-MVS. Aplicación en una cantera de suelos seleccionados, La Plata, Buenos Aires. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 78(4).
- Hatzopoulos, J. N., Stefanakis, D., Georgopoulos, A., Tapinaki, S., Pantelis, V. y Liritzis, I. (2017). Use of various surveying technologies to 3D digital mapping and modelling of cultural heritage structures for maintenance and restoration purposes: The Tholos in Delphi, Greece. *Mediterranean Archaeology and Archaeometry*, 17(3), 311-336. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1048937>
- Iriarte, J., Robinson, M., de Souza, J., Damasceno, A., da Silva, F., Nakahara, E., Ranzi, A. y Aragao, L. (2020). Geometry by Design: Contribution of Lidar to the Understanding of Settlement Patterns of the Mound Villages in SW Amazonia. *Journal of Computer Applications in Archaeology*, 3(1), 151-169. <http://doi.org/10.5334/jcaa.45>
- James, M. R., Robson, S. y Smith, M. W. (2017). 3-D uncertainty-based topographic change detection with structure-from-motion photogrammetry: precision maps for ground control and directly georeferenced surveys. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(12), 1769-1788. <https://doi.org/10.1002/esp.4125>
- Kokalj, Ž. y Hesse, R. (2017) *Airborne laser scanning raster data visualisation: A Guide to Good Practice*. Serie Prostor, kraj, čas 14. Institute of Anthropological and Spatial Studies ZRC SAZU, Založba ZRC. <https://bit.ly/3DXzC3X>
- Kosiba, S. (2017). Caminando el Cusco: mapas, movimiento y memoria social en el corazón del Imperio Inca. En S. Chacaltana, E. Arkush y G. Marccone (Eds.). *Nuevas tendencias en el estudio de los caminos* (pp. 192-221). Ministerio de Cultura de Perú, Proyecto Qhapaq Ñan-Sede Nacional; Gráfica Industrial R&S.
- Llobera, M. (2003). Extending GIS-based visual analysis: the concept of visualsapes. *International Journal of Geographical Information Science*, 17(1), 25-48.
- Lowe, D. G. (2004). Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International Journal of Computer Vision*, 60, 91-110.
- Mancini, F., Dubbini, M., Gattelli, M., Stecchi, F., Fabbri, S. y Gabbianelli, G. (2013). Using unmanned aerial vehicles (UAV) for high-resolution reconstruction of topography: The structure from motion approach on coastal environments. *Remote Sens*, 5, 6880-6898.
- Micheletti, N., Chandler, J. H. y Lane, S. N. (2015). Investigating the geomorphological potential of freely available and accessible structure-from-motion photogrammetry using a smartphone. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40, 473-486. <https://doi.org/10.1002/esp.3648>
- Mignone, P. (2021). Evaluación crítica de la eficacia del camino de menor coste para el estudio predictivo del Qhapaq Ñan. *Chungara*, 53(1), 5-20.
- Moralejo, R. A. (2011). *Los Inkas al sur del Valle de Hualfín: organización del espacio desde una perspectiva paisajística* [Tesis doctoral, Universidad Nacional de La Plata]. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/5242>
- Moralejo, R. A. (2013). La Piedra Hincada de El Shincal de Quimivil. *Comechingonia*, 17(2), 295-301.
- Moralejo, R. A. y Gobbo, D. (2015). El Qhapaq Ñan como espacio de poder de la política incaica. *Estudios Atacameños*, 50, 131-150.
- Moralejo, R. A. y Gobbo, D. (2017). Desde el camino: los SIG y El Shincal de Quimivil (Londres, Catamarca, Noroeste argentino). En S. Chacaltana, E. Arkush y G. Marccone (Eds.). *Nuevas tendencias en el estudio de los caminos* (pp. 322-345). Ministerio de Cultura de Perú, Proyecto Qhapaq Ñan-Sede Nacional; Gráfica Industrial R&S.

- Moralejo, R. A., Gobbo, D., Del Cogliano, D. y Pinto, L. (2018). Aplicación de tecnología LiDAR en El Shincal de Quimivil, Londres, Catamarca. *Arqueología*, 24(3), 165-184. <https://doi.org/10.34096/arqueologia.t24.n3.5386>
- Moralejo, R. A., Gobbo, D. y Couso, M. G. (2020). Evaluación del paisaje visual a través del movimiento: el caso del sitio inca El Shincal de Quimivil (Londres, Catamarca, Argentina). *Comechingonia*, 24(3), 27-54. <https://doi.org/10.37603/2250.7728.v24.n3.31090>
- Murrieta-Flores, P. A. (2010). Traveling in a Prehistoric Landscape: Exploring the Influences that Shaped Human Movement. En B. Frischer, J. W. Crawford y D. Koller (Eds.). *Making History Interactive. Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA)* (pp. 249-267). Archaeopress.
- Olaya, V. (2020). *Sistemas de Información Geográfica*. <http://volaya.github.io/libro-sig/>
- Parcero-Oubiña, C. (2021). Habelos, hainos. Detección remota de indicios arqueológicos mediante fotografía aérea e Lidar en castros de Galicia. *Cuadernos de Estudios Gallegos*, 68(134), 15-45. <https://doi.org/10.3989/ceg.2021.134.01>
- Prümers, H. (2014). Sitios prehispánicos con zanjas en Bella Vista, Provincia Iténez, Bolivia. En S. Rostain (Ed.). *Amazonía. Memorias de las Conferencias Magistrales del 3er Encuentro Internacional de Arqueología Amazónica* (pp. 73-89). Ministerio Coordinador de Conocimiento y Talento Humano e IKIAM, Secretaría Nacional de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación, Tercer Encuentro Internacional de Arqueología Amazónica. Ekseption Publicidad.
- Raffino, R. A. (1991). *Poblaciones indígenas en Argentina. Urbanismo y proceso social precolombino*. Tipográfica Editora Argentina.
- Raffino, R. A. (Ed.) (2004). *El Shincal de Quimivil*. Sarquís.
- Raffino, R. A., Iácona, L. A., Moralejo, R. A., Gobbo, D. y Couso, M. G. (Eds.) (2015). *Una Capital Inka al Sur del Kollasuyu: El Shincal de Quimivil*. Fundación de Historia Natural Félix de Azara.
- Richards-Rissetto, H. y Landau, K. (2014). Movement as a means of social (re)production: Using GIS to measure social integration across urban landscapes. *Journal of Archaeological Science*, 41, 365-375.
- Sanz-Ablanedo, E., Chandler, J. H., Rodríguez-Pérez, J. R. y Ordóñez, C. (2018). Accuracy of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and SfM photogrammetry survey as a function of the number and location of ground control points used. *Remote Sensing*, 10(10), 1606. <https://doi.org/10.3390/rs10101606>
- Tapete, D., Banks, V., Jones, L., Kirkham, M. y Garton, D. (2017). Contextualising archaeological models with geological, airborne and terrestrial LiDAR data: The Ice Age landscape in Farndon Fields, Nottinghamshire, UK. *Journal of Archaeological Science*, 81, 31-48.
- Verhoeven, G., Doneus, M., Briese, C. y Vermeulen, F. (2012). Mapping by matching: A computer vision-based approach to fast and accurate georeferencing of archaeological aerial photographs. *Journal of Archaeological Science*, 39(7), 2060-2070.
- Vilbig J. M., Sagan, V. y Bodine, C. (2020). Archaeological surveying with airborne LiDAR and UAV photogrammetry: A comparative analysis at Cahokia Mounds. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 33. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2020.102509>
- Vitry, C. (2000). *Aportes para el estudio de caminos incaicos. Tramos Morohuasi - Incahuasi*. Salta, Argentina. Gofica.
- von Schwerin, J., Richards-Rissetto, H., Remondino, F., Spera, M. G., Auer, M., Billen, N., Loos, L., Stelson, L. y Reindel, M. (2016). Airborne LiDAR acquisition, post-processing and accuracy-checking for a 3D WebGIS of Copan, Honduras. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 5, 85-104.
- Vosselman, G. y Maas, H. G. (2010). *Airborne and terrestrial laser scanning*. Whittles P; CRC Press.
- Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J. y Reynolds, J. M. (2012). "Structure-from-Motion" photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300-314.
- Wheatley, D. y Gillings, M. (2000). Vision, perception and GIS: developing enriched approaches to the study of archaeological visibility. En G. R. Lock (Ed.). *Beyond the Map: archaeology and spatial technologies* (pp. 1-27). IOS Press.
- Wynveldt, F., Sallés, J. M. y López, L. (2018). Defensibility Analysis with Geographical Information Systems in a Pukara in the Hualfín

- Valley, Argentina. En A. Álvarez Larrain y C. Greco (Eds.). *Political Landscapes of the Late Intermediate Period in the Southern Andes. The Pukaras and Their Hinterlands* (pp. 11-34). The Latin American Studies Book Series. Springer International Publishing AG. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-76729-1\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-76729-1_2)
- Zamora Merchán, M. (2006). Visibilidad y SIG en arqueología: Mucho más que cerros y unos. En I. Grau Mira (Ed.). *La Aplicación de los SIG en la Arqueología del Paisaje* (pp. 41-54). Publicaciones de la Universidad de Alicante.
- Zhou, X. y Zhang, X. (2020). Individual tree parameters estimation for plantation forests based on UAV oblique photography. *IEEE Access*, 8, 96184-96198. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2994911>

