



54.

EL LiDAR COMO HERRAMIENTA PARA
UN ACERCAMIENTO A LA GESTIÓN
DE LOS RECURSOS NATURALES MAYAS
(AGUA Y SUELOS): EL CASO DE NAACHTUN,
PETÉN, GUATEMALA

*Cyril Castanet, Philippe Nondedeo, Eva Lemonnier, Louise Purdue, Antoine Dorison,
Jean-François Cuenot, Juliette Pageau, Julien Hiquet, Dominique Michelet, Johann Begel,
Carlos Morales-Aguilar y Lilian Garrido*

XXXII SIMPOSIO DE INVESTIGACIONES
ARQUEOLÓGICAS EN GUATEMALA

MUSEO NACIONAL DE ARQUEOLOGÍA Y ETNOLOGÍA
23 AL 27 DE JULIO DE 2018

EDITORES
BÁRBARA ARROYO
LUIS MÉNDEZ SALINAS
GLORIA AJÚ ÁLVAREZ

REFERENCIA:

Castanet, Cyril; Philippe Nondedeo, Eva Lemonnier, Louise Purdue, Antoine Dorison, Jean-François Cuenot, Juliette Pageau, Julien Hiquet, Dominique Michelet, Johann Begel, Carlos Morales-Aguilar y Lilian Garrido
2019 El LiDAR como herramienta para un acercamiento a la gestión de los recursos naturales Mayas (agua y suelos): el caso de Naachtun, Petén, Guatemala. En *XXXII Simposio de Investigaciones Arqueológicas en Guatemala*, 2018 (editado por B. Arroyo, L. Méndez Salinas y G. Ajú Álvarez), pp. 665-677. Museo Nacional de Arqueología y Etnología, Guatemala.

EL LiDAR COMO HERRAMIENTA PARA UN ACERCAMIENTO A LA GESTIÓN DE LOS RECURSOS NATURALES MAYAS (AGUA Y SUELOS): EL CASO DE NAACHTUN, PETÉN, GUATEMALA

Cyril Castanet
Philippe Nondedeo
Eva Lemonnier
Louise Purdue
Antoine Dorison
Jean-François Cuenot
Juliette Pageau
Julien Hiquet
Dominique Michelet
Johann Begel
Carlos Morales-Aguilar
Lilian Garrido

PALABRAS CLAVE

Naachtun, Análisis espacial, LiDAR, manejo de los recursos, agua, suelo, agricultura, Preclásico, Clásico.

ABSTRACT

The processing and analysis of the data produced by LiDAR technology (Pacunam LiDAR Initiative) represents an unprecedented contribution to the study of water and soil resources management in a 135.29 km² sector covering parts of the hinterland of Naachtun, a regional capital of the classical period, north of the Petén (Guatemala). The different models extracted from LiDAR dataset allow us to observe, detect and interpret the current micro-relief in a natural, tropical and closed environment. This micro-relief results from the combination of human occupation as well as resource management (hydraulic, agricultural, forestry) at the scale of Naachtun territory. During the Preclassic and the Classic Periods, the hydro-system was highly managed in the upper and lower areas of the city of Naachtun (more than 70 reservoirs were recorded, a network of canals, dikes,...). Almost all of the empty spaces, with no visible traces of occupation on the surface, were exploited for agricultural purposes, both in upland and lowland areas (altos and bajos). In the uplands, more than 18500 agricultural terraces, representing a cumulative length of circa 510 km, were identified. In low-lying areas, more than 5000 linear elements (canal type) were detected, corresponding to a cumulated length of more than 300 km. Both features (terraces and canals) reflect intensive agricultural planning and development. These results raise questions about existing models regarding the organization of ancient Maya agriculture, especially the infield-outfield system, which might not have existed during all periods and throughout all the Maya territory. Moreover, this data indisputably underline the strong impact that Mayan populations had on their natural environment, an aspect that may have increased the sensitivity and vulnerability of the environment and socio-environmental interactions to societal and/or climate changes during the Preclassic and Classic periods.

INTRODUCCIÓN

Bajo iniciativa de la Fundación PACUNAM se ha realizado una cobertura LiDAR (*Light Detection and Ranging*) en julio del 2016 en Naachtun y en sus alrededores, sobre una superficie de 135.29 km². El modelo en elevación obtenido (DEM) tiene una resolución horizontal de 1 m y una resolución vertical de solamente algunos decímetros (Figura 1).

Gracias a este modelo, el equipo del Proyecto Naachtun (Proyecto Petén-Norte NAACHTUN (2010-2018) – Anatomía de una capital regional Maya en el periodo Clásico (Dir. P. Nondédéo y L. Garrido), y de proyectos paleo-ambientales asociados (HydroAgro, Proyecto HYDROAGRO – Dinámica cruzada de las sociedades y de los medios ambientes en las Tierras Bajas Mayas; co-evolución, crisis y resiliencias en Naachtun (Guatemala) (2014-2016) (Coord. E. Lemonnier y C. Castanet), y Payama (Proyecto PAYAMA – Paisajes agrarios de ayer y de hoy en las tierras Mayas (2017-2018) (Coord. A. Garnier y E. Lemonnier), ha podido reforzar y complementar su estudio iniciado en 2012 sobre dos recursos naturales, el agua y el suelo, que fueron la base de la subsistencia de las poblaciones Mayas durante los periodos Preclásico y Clásico en el hinterland de Naachtun (Castanet *et al.* 2015, Nondédéo *et al.* 2013, 2014, 2015, 2016, 2017). La ciudad de Naachtun es el único centro urbano de gran dimensión en esta poligonal, aparte del centro secundario y preclásico de Kunal. Capital regional del Periodo Clásico, está conformada por un epicentro de 33 ha y una zona residencial de 150 ha que podría haber albergado entre 1800 y 2900 habitantes en el momento de su apogeo durante el Clásico Tardío (Hiquet *en prep*). En el marco del estudio de las interacciones socio-medioambientales, la evolución del manejo de los recursos a disposición debe ser analizada no sólo a escala local del sitio, sino también a escala del hinterland de Naachtun. Los depósitos sedimentarios naturales y antrópicos junto con el micro-relieve del paisaje son los principales testigos de los acondicionamientos pasados que reflejan una gestión de los recursos. En las tierras bajas Mayas, el bosque tropical cerrado constituye siempre un limitante mayor al estudio riguroso y sistemático de este manejo de los recursos a escala del territorio bajo control de cada ciudad, dificultando los trabajos de micro-topografía de gran magnitud (Chase *et al.* 2010). La naturaleza, los usos, la distribución espacial, las evoluciones temporales, los retos y la gestión de estos recursos ha llevado las poblaciones mayas a poner en marcha ciertas medidas tanto

estructurales como no estructurales tales como acondicionamientos hidráulicos y agrarios (Dunning 1996, Scarborough *et al.* 2012, Lemonnier y Vannièrre 2013). Dichas medidas fueron particularmente morfogenas en el paisaje. Se trata por ejemplo de obras de gestión de los riegos relacionados con la escasez y/o el exceso de agua cuyos usos eran tanto domésticos como agrarios (Beach *et al.* 2009). Se trata también de obras vinculadas con la gestión de la erosión y de la hidromorfía de los suelos (Dunning y Beach 1994, Beach *et al.* 2006). Los resultados preliminares de los análisis LiDAR nos llevan a las preguntas siguientes: A nivel metodológico: ¿Cómo hemos tratado, interpretado, gestionado y comprobado los datos altimétricos procedentes de la tecnología LiDAR? A nivel fundamental: ¿Qué nos aporta la tecnología LiDAR: en relación con el conocimiento de los acondicionamientos hidráulicos y agrarios constitutivos de los hidro-sistema y agro-sistema en el territorio de Naachtun – y más allá con la comprensión del manejo de los recursos en agua y en suelo por las poblaciones Mayas del Preclásico y del Clásico?

MATERIALES Y MÉTODOS

Un primer paso en el análisis consistió en la realización de tratamientos del DEM con vistas a favorecer la observación, detección e interpretación del micro relieve que resulta de los acondicionamientos hidráulicos y agrarios, así como permitir un análisis espacial sistemático de la integralidad de la zona cubierta. Una segunda serie de operaciones se centró en la modelización de los flujos hidrológicos a partir de la data LiDAR con el objetivo de circunscribir las cuencas topográficas e hidráulicas temporales potenciales. Una tercera serie de operaciones consistió en averiguar en campo las interpretaciones hechas a partir de la imagen LiDAR. Los métodos de adquisición y de tratamiento inicial de la data LiDAR fueron realizados por NCALM (*National Center for Airborne Laser Mapping*), de la Universidad de Houston. Para la poligonal de Naachtun, la densidad promedia de puntos que alcanzaron el suelo es de 1,48 retornos/m². Esta densidad varía espacialmente según las formaciones vegetales presentes y la naturaleza del canope. Considerando la diversidad de las especificidades geométricas de los objetos bajo estudio, hemos realizado una serie de visualizaciones a partir del modelo en elevación (DEM): modelos de sombra sencilla (*HillshadeModel*), multi-sombras (*MDOW Multi-Directional Oblique Weighting*), pendientes, de aperturas positivas y negativas (*Topographic openness*), y de

relieve local (*Local Relief Model*, LRM, Hesse 2010). Además, se hicieron combinaciones de tratamientos según los objetos por buscar: *Red Relief Image Model* (RRIM, Inomata *et al.* 2017), aperturas positivas y negativas superpuestas a multi-sombras (Estrada-Belli, en el marco del PLI), aperturas positivas y negativas superpuestas a pendientes (Dorison en Nondédéo y Dorison 2017) (Figura 2). Se generaron también mapas con curvas de nivel y perfiles topográficos, así como mediciones geométricas manuales y automatizadas. Toda la zona ha sido analizada según un modelo clásico de tipo “expert”, beneficiándose del conocimiento de los acondicionamientos hidráulicos y agrarios ya descritos previamente en Naachtun o ya conocidos en la zona Maya. Un análisis estadístico ha sido realizado a partir de los datos vectorizados y de las tablas asociadas. Los softwares utilizados fueron: ArcGIS (ESRI), SAGA GIS, RVT, QGIS, Excel (Microsoft). La modelización de los arroyos temporales y de las cuencas hidrográficas fue realizada con ArcGIS. Una primera fase de interpretación de la imagen LiDAR se hizo considerando los resultados de los trabajos de campo de las temporadas 2013-2016, previos a la adquisición LiDAR, mientras que una segunda fase de verificaciones en campo de las nuevas interpretaciones y de los nuevos datos LiDAR (en planimetría, estratigrafía, pedología y biogeografía) ha sido realizada durante las temporadas 2017 y 2018 y seguirá en los próximos años.

RESULTADOS

A escala de todo el territorio de la poligonal de Naachtun, los recursos hidráulicos y pedológicos que permitieron la subsistencia de la población durante el Preclásico y el Clásico se reparten en seis principales cuencas topográficas. Las mismas están drenadas por arroyos temporales que dependen del clima tropical seco y húmedo que caracteriza la región. La erosión del subsuelo kárstico ha modelado un paisaje de mesetas en el cual se distinguen zonas altas (*uplands*), planas y bajas (bajos o *wetlands*). El nivel freático subterráneo no constituye en sí para esta región una reserva o un recurso explotable para las poblaciones, dada su gran profundidad.

ACONDICIONAMIENTOS HIDRÁULICOS Y MANEJO DEL AGUA

En la poligonal de Naachtun, todos los sectores del hidro-sistema fueron objeto de acondicionamientos hi-

dráulicos, tanto en zonas altas como en bajos (Castanet 2016a, 2018a, 2018b). Reservorios de grandes dimensiones, 71 en total, fueron identificados con uso doméstico, agrario o mixto (Figura 3). Se encuentran en contexto urbano, peri-urbano o rural. La mayor parte de estos reservorios, 67, ha sido creada *ex nihilo* (Figura 4). Algunos resultan del acondicionamiento de cavales pre-existentes (cuatro). En un radio de 1 km alrededor de los Grupos A, B y C del epicentro de Naachtun hemos identificado 14 aguadas, 11 de las cuales fueron construidas *ex nihilo* mientras que las demás resultan del acondicionamiento de cavales pre-existentes. La densidad de este tipo de reservorio en el hinterland de Naachtun es de uno por 0.51 km². Trabajos de modelización junto con trabajos geo-arqueológicos de campo permitieron proponer capacidades de almacenamiento por aguada y para el total de los reservorios identificados en este territorio. Un total de 250 depresiones cerradas adicionales, de diferentes dimensiones, han sido identificadas. Algunas de ellas bien pueden haber sido utilizadas para fines domésticos. En los bajos, 68 de ellas fueron interpretadas como reservorios con fines agrícolas. Por otra parte, en los humedales, tres tipos de canales, de anchura, longitud y profundidad variables y formando una red hidráulica han sido observados en la poligonal de Naachtun (Figura 5): canales y fosos de tipo 1 muy angostos (1 a 4 m) y poco profundos (inferior a 15 cm); de tipo 2, relativamente estrechos (5-7 m de ancho) y profundos (70-80 cm); de tipo 3, relativamente anchos (20-40 m) con fondo plano y poco profundos (30-40 cm). Estos canales parecen haber desempeñado varias funciones: aducción de agua y/o drenaje y/o almacenamiento de agua, en un entorno marcado por fuertes contrastes anuales según las temporadas de lluvia y de sequía. Los fosos y canales de tipo 1 son de mucho los más numerosos y constituyen buena parte de los *wetlands features*. En las zonas altas, algunos arroyos fueron canalizados (Purdue en Castanet y Purdue 2013). Algunos diques fueron identificados. Permitieron almacenar agua (papel de reservorio), favorecer el cruce a pie de zonas húmedas y potencialmente asegurar una protección frente al riesgo de erosión. Varias de estas estructuras identificadas por medio del LiDAR fueron verificadas en campo: en particular cuatro aguadas (dos creadas *ex nihilo* y otras dos resultando de la transformación de un cival, Castanet 2017) y diez canales del tipo 1 (Castanet 2018). Todos dieron resultados positivos y permitieron precisar tanto su función como su cronología.

ACONDICIONAMIENTOS CON FINES AGRÍCOLAS Y MANEJO DE LOS SUELOS

La casi totalidad de los suelos y de los espacios vacíos del territorio de Naachtun fueron objeto de acondicionamientos con fines agrícolas, tanto en los altos (Dorison en Nondédéo y Dorison 2017) como en los bajos (Castanet 2018a, 2018b).

En zonas altas, más de 18,500 terrazas, que totalizan un largo cumulativo de 510 km, han sido documentadas (Figura 6). Corresponden a seis principales tipos que, según la nomenclatura de Whitmore y Turner (2001), corresponden a “*sloping-field terraces*”, *contour terraces* o *bench terraces*, *valley-floor terraces*, *footslopes terraces*, *box-terraces* y *cross-channel terraces* (Figura 7). Si la función de estas terrazas ha sido de optimizar el manejo del agua (Donkin 1979), permitieron también la prevención de la erosión mecánica de los suelos y/o la constitución de suelos más gruesos. Junto con estas terrazas, numerosas estructuras lineales, similares a muros, han sido identificadas y tienen verosímilmente funciones agrícolas. También, otros muros, tipo camellones, delimitan pequeñas parcelas de entre 30 y 70 m² de superficie cuya función agrícola parece ser obvia dada su asociación sistemática con sistemas de terrazas. A nivel cronológico, las terrazas preclásicas parecen ser las que modificaron profundamente el paisaje generando efectos de gradas. Las que están asociadas con asentamientos del Clásico parecen haber impactado menos el relieve natural.

En la casi totalidad de las zonas bajas y planicies aluviales, cuales fueran los contextos geomorfológicos, hidrológicos, pedológicos y ecológicos presentes, fueron descubiertos y descritos numerosos “*wetlands features*”. Se trata generalmente de formas lineales donde alternan pequeñas ondulaciones y surcos (Figura 8). Las crestas son interpretadas como campos de cultivo mientras que los surcos son fosos o canales. Junto con ellas se encuentran también reservorios acondicionados (Figura 9). Se trata también de formas puntuales. En total se han identificado más de 5000 elementos lineales, alcanzado 60 m de largo en promedio pero totalizando una longitud cumulada superior a los 300 km. La superficie total de los bajos que tienen estos campos drenados (y probablemente levemente elevados) es de 31.5 km², o sea el 22.5% de la superficie total de la poligonal de Naachtun (Figura 10). Nueve zonas húmedas (de una superficie individual superior a 1.4 km²) totalizan una superficie acumulada de 24.8 km². Tres bajos de una superficie individual superior a 3.5 km² totalizan

14 km² de superficie cumulada. Se trata del bajo Iknal (6.94 km²), del bajo Infierno (3.56 km²) y del bajo Sur (3.51 km²). Al identificar estos rasgos en los bajos es toda la red hidráulica (foso y canales) junto con los espacios cultivados (campos unitarios o compuestos según diversas morfologías agrarias) que están apareciendo reflejando los sistemas de intensificación agrícola concebidos por la población de Naachtun. Si ninguna casa ha sido claramente observada en las zonas cultivadas de dichos bajos, en cambio son numerosas a orillas de estos bajos. Estos acondicionamientos parecen haber necesitado la manipulación de un volumen colosal de sedimento aluvial, del orden de varios cientos de miles hasta un millón de m³ de arcilla. Ilustran un palimpsesto de redes hidráulicas y de campos de cultivo establecidas durante el Preclásico y el Clásico. En las zonas de bajos, los hidro-sistemas y agro-sistemas han interactuado de manera estrecha dada la interdependencia de los acondicionamientos para el agua y los suelos. Estudiamos pues un objeto complejo: el hidro-agro-sistema, un sistema socio-ambiental al interfaz entre naturaleza/cultura y agua/suelos. La repartición espacial de las estructuras agrarias, hidráulicas y residenciales sugiere que dicho hidro-agro-sistema, fue co-construido por los Mayas y por el medio ambiente durante el Preclásico y el Clásico en el territorio de Naachtun.

Varias estructuras agrarias detectadas en la imagen LiDAR fueron objeto de verificaciones en campo: cinco ventanas en lo que se refiere a los “*wetlands features*” en 2018, y otras cinco en lo que concierne a las terrazas (Purdue en Castanet y Purdue 2013, Purdue 2014, Castanet 2016b, Lemonnier 2017). Todas estas operaciones confirmaron el carácter antrópico de estas estructuras lineales y permitirán pronto precisar su naturaleza y su función así como la cronología de las dinámicas socio-ambientales.

DISCUSIÓN

En lo que se refiere al manejo del agua, con fines domésticos o agrarios, los resultados preliminares indican que las poblaciones Mayas disponían no sólo de un gran conocimiento de las dinámicas hidrológicas e hidro-sedimentarias en las cuencas topográficas del territorio de Naachtun sino también de varias técnicas de manejo del agua tanto en contextos bien drenados (zonas altas) y en zonas húmedas (bajos) como en contextos urbano, peri-urbano y rural. Durante el Preclásico y el Clásico, los Mayas fueron capaces de transformar profundamente el hidro-sistema de las mesetas del Petén con el fin

de controlar almacenamientos y flujos de este recurso. Reservorios fueron estratégicamente localizados en el hidro-sistema (muchas veces en la confluencia de arroyos o en el seno de depresiones cerradas), mientras que el manejo hidráulico en grande de los bajos se ilustra por la edificación de esta red de fosos y canales, con fines agrarios, que permitieron la construcción de campos ligeramente elevados. El curso de algunos arroyos temporales fue también desviado o modificado, hasta bloqueado por sistemas de diques. La planificación y la construcción de estos acondicionamientos, su densidad y distribución en el espacio, o el tipo de manejo de estos recursos según el periodo considerado, sea a título individual o de manera colectiva, bajo un control centralizado o no, están aún en proceso de análisis.

En lo que se refiere al manejo de los suelos con fines agrícolas, estos resultados revelan las medidas emprendidas por los Mayas para controlar las fluctuaciones temporales e interanuales de las reservas hídricas de los suelos, así como los procesos de erosión. Para este fin, elaboraron varias técnicas que les permitieron cultivar considerando la diversidad de los entornos locales a su disposición. En las zonas altas, varios tipos de terrazas y otros arreglos con fines agrícolas fueron edificados de manera adaptada a los contextos topográficos e hidrosedimentarios. En los bajos, fueron emprendidos trabajos hidráulicos de drenajes, rectificación y de sobreelevación de los campos de cultivo. Durante el Preclásico y el Clásico, la complejidad del sistema agrario de los Mayas de Naachtun descansaba pues en la aplicación de diferentes técnicas de puesta en valor de los suelos y de su manejo. Eso permitió una agricultura intensiva no sólo en las zonas altas de colinas sino también en la totalidad de las zonas de bajos. La dinámica de los parcelarios, los tipos de cultígenos utilizados (Testé, en prep.) y el uso del bosque en general (Dussol 2017) están en proceso de análisis. De una manera general, estos resultados nos llevan a preguntarnos sobre antiguas teorías acerca de la organización agraria entre los Mayas, en particular sobre el sistema *infield-outfield* (Killion 1992, Dunning *et al.* 1999), el cual podría no haber sido aplicado a todos los periodos o en todas las regiones si nos referimos aquí a la cantidad y densidad de unidades habitacionales, a la superficie de los campos de cultivo y a su distribución en el hinterland de Naachtun.

En lo que se refiere al estudio de las interacciones socio-ambientales, cabe destacar que los Mayas optimizaron de manera insospechada las potencialidades de su entorno natural en relación con los recursos y los

riesgos naturales. Las poblaciones tuvieron un impacto muy fuerte sobre su entorno, y la cantidad de acondicionamientos hidráulicos y agrícolas es conforme a la densidad de las unidades habitacionales detectadas y a las inferencias paleo-demográficas. Este control es susceptible de haber acentuado la sensibilidad y la vulnerabilidad del medio ambiente y de las interacciones socio-ambientales frente a cambios de la sociedad y/o a cambios climáticos intervenidos durante el Preclásico y el Clásico. Esta sensibilidad mayor ha posiblemente favorecido la génesis de crisis ambientales y/o socio-ambientales en el territorio de Naachtun. Finalmente, esta diversidad de acondicionamientos, heredados del Preclásico y del Clásico, constituye un legado para el entorno natural actual de bosque en Petén, acondicionamientos que controlan aún hoy en día las dinámicas hidrológicas, pedológicas y ecológicas.

CONCLUSIÓN Y PERSPECTIVAS

La utilización de la tecnología LiDAR constituye un aporte sin precedente para el estudio de los recursos en agua y en suelos en el territorio de Naachtun ya que permite observar estructuras hidráulicas y agrarias a varias escalas de análisis sin enfrentarnos al problema de detección en los bosques cerrados. Los modelos elaborados a partir del LiDAR nos permitieron observar e interpretar micro-relieves que resultan de los acondicionamientos pasados. La primera fase de verificaciones en campo fue positiva, y los resultados revelan a grandes rasgos la naturaleza, densidad y distribución espacial de las estructuras detectadas, a veces insospechadas como en el caso de los bajos, el todo desde una perspectiva local hasta una escala micro-regional. Los datos obtenidos revelan en definitiva el negativo de territorios fósiles cuyos acondicionamientos hidráulicos y agrarios realizados durante el Preclásico y el Clásico contribuyeron a la subsistencia de una población que transformó radical- y durablemente su entorno local y los paisajes asociados. Mucho queda aún por hacer dado que las resoluciones vertical y horizontal de nuestra cobertura no nos permiten identificar de manera satisfactoria todos los micro-relieves testigos de antiguos acondicionamientos. Además, algunos acondicionamientos, difíciles de detectar, impactaron de manera muy leve el paisaje. Sin hablar de las medidas no estructurales elaboradas por los Mayas y que no dejan huellas y que participaron también del manejo de los recursos. Sin embargo, estos hallazgos fundamentales permiten renovar nuestro cuestionamiento. Por primera vez, gracias al

estudio de la imagen LiDAR complementada por los registros sedimentarios, las condiciones *sine qua non* se ven reunidas para llevar a cabo un análisis sistemático y multi-escalar de los recursos en agua y en suelo en un territorio profundamente transformado y densamente poblado como es el territorio de Naachtun.

AGRADECIMIENTOS

La cobertura LiDAR fue fundada por la Fundación PACUNAM, mientras que parte del procesamiento de los datos fue financiado por el LabEx DynamiTe (Université de Paris 1 Panthéon-Sorbonne), el Ministerio francés de Relaciones Exteriores, el CNRS y la Fundación Cino del Duca. El proyecto Naachtun recibe financiamientos adicionales de la compañía Perenco y el apoyo del CEMCA-Guatemala. Los autores agradecen también a los estudiantes de la Escuela Superior de geómetras y topógrafos del CNAM.

REFERENCIAS

- BEACH, T.; N. Dunning, S. Luzzadder-Beach, D.E. Cook y J. Lohse
2006 Impacts of the ancient Maya on soils and soil erosion in the central Maya Lowlands, *Catena* 65: 166-178.
- BEACH, Tim; Sheryl Luzzadder-Beach, Nicholas Dunning, John Jones, Jon Lohse, Tom Guderjan, Steve Bozarth, Sarah Millsbaugh y Tripti Bhattacharya
2009 A review of human and natural changes in Maya Lowland wetlands over the Holocene. *Quaternary Science Reviews* 28: 1710-1724.
- CASTANET, C. y L. Purdue
2013 Operación IV.6 y IV.7: Estudios paleo-ambientales y geo-arqueológicos. En Nondédéo P. *et al.*, *Proyecto Petén-Norte Naachtun 2010-2014: Informe de La Temporada de Campo 2013* pp. 551-564. CNRS-CEMCA, Presentado al Instituto de Antropología e Historia de Guatemala (IDAEH), Guatemala.
- CASTANET, C.; L. Purdue, E. Lemonnier y P. Nondédéo
2015 Dynamiques croisées des milieux et des sociétés dans les basses terres tropicales mayas: hydrosystème et agrosystème à Naachtun (Guatemala). *Les Nouvelles de l'Archéologie* 142:32-37, <https://journals.openedition.org/nda/3275>
- CASTANET, C.
2016a Operación I.5: Análisis preliminar del modelo digital de terreno LiDAR con fines ambientales y paleo-ambientales: Naachtun y sus alrededores. En Nondédéo P. *et al.*, *Proyecto Petén-Norte Naachtun 2015-2018: Informe de la Temporada de Campo 2016*, pp.60-82. CNRS-CEMCA, Presentado al Instituto de Antropología e Historia de Guatemala (IDAEH), Guatemala.
- 2016b Operación IV.6: Estudios del medio ambiente: Hidrología y sedimentología. En Nondédéo P. *et al.*, *Proyecto Petén-Norte Naachtun 2015-2018: Informe de la Temporada de Campo 2016*, pp.343-396. CNRS-CEMCA, Presentado al Instituto de Antropología e Historia de Guatemala (IDAEH), Guatemala.
- 2017 Operación IV.6a: estudios del medio ambiente: el agua en Naachtun y en sus alrededores. Evolución del recurso, de sus usos y de su gestión a partir de los casos de las aguadas de los bajos norte (el infierno) y sur. En Nondédéo P. *et al.*, *Proyecto Petén-Norte Naachtun 2015-2018: Informe de La Temporada de Campo 2017*, pp. 299-330. CNRS-CEMCA, Presentado al Instituto de Antropología e Historia de Guatemala (IDAEH), Guatemala.
- 2018a Apports de l'analyse du MNT LiDAR [Pacunam LiDAR Initiative (PLI)] à l'étude des zones humides du territoire de Naachtun et de ses alentours: cadres géomorphologiques et hydrographiques / réservoirs (aguadas), canaux et digues / systèmes hydrauliques et morphologies agraires associées. *Rapport interne au projet Petén-Norte Naachtun 2015-2018*, 74 p.
- 2018b Atlas of wetlands (Project Petén - Norte Naachtun): geomorphology and hydrography / reservoirs, canals and dikes / wetland features (hydraulic system & agrarian morphologies) Scale: 1:8000. 150 maps. *Report of the Petén-Norte Naachtun 2015-2018*, 150 p.
- CHASE, A. F.; D. Z. Chase y J. F. Weishampel
2010 Lasers in the jungle. *Archaeology* 63:27-29.
- DONKIN, R. A.
1979 *Agricultural Terracing in the Aboriginal New World*, University of Arizona Press, Tucson
- DUNNING, N. P. y T. Beach.
1994 Soil Erosion, Slope Management, and Ancient Terracing in the Maya Lowlands, *Latin American Antiquity* 5:51-69
- DUNNING, N. P.
1996 A Reexamination of Regional Variability in the

- Prehistoric Agricultural Landscape. En *The Managed Mosaic: Ancient Maya Agriculture and Resource* (editado por S. L. Fedick), pp.53-68. Universidad de Utah.
- DUNNING, N. P.; V. Scarborough, F. Valdez y S. Luz-zadder-Beach
 1999 Temple, Mountains, Sacred Lakes and Fertile Fields: Ancient Maya Landscapes in Northwestern Belize. *Antiquity* 73:650-660.
- DUSSOL, L.
 2017 *Feux et forêts mayas. Usages et gestion des combustibles ligneux dans les Basses Terres centrales mayas à la période Classique : le cas du site de Naachtun, Petén, Guatemala, approche anthracologique*. Tesis doctoral, Universidad de París 1 Panthéon-Sorbonne, Paris.
- HESSE, R.
 2010 LiDAR-derived local relief models (LRM) a new tool for archaeological prospection. *Archaeological Prospection* 17:67-72.
- HICQUET, J.
 e.p. *Essor monumental et dynamiques des populations : le cas de la cité maya de Naachtun (Guatemala) au Classique ancien (250-600 apr.J.-C.)*. Tesis doctoral, Universidad de Paris 1 Panthéon Sorbonne.
- INOMATA, T.; F. Pinzón, J.-L. Ranchos, T. Haraguchi, H. Nasu, J.-C. Fernandez-Diaz, K. Aoyama y H. Yonenobu
 2017 Archaeological application of airborne lidar with object-based vegetation classification and visualization techniques at the lowland Maya site of ceibal, Guatemala. *Remote Sensing* 9: 563.
- KILLION, T. W.
 1992 *Gardens of Prehistory. The archaeology of settlement agriculture in Greater Mesoamerica*, Tuscaloosa, University of Alabama Press;
- LEMONNIER, E. y B. Vannière
 2013 Agrarian Features, Farmsteads, and Homessteads in the Río Bec Nuclear Zone, Mexico. *Ancient Mesoamerica* 24:397-413.
- LEMONNIER, E.
 2017 Operación IV.7bis: Agricultura y subsistencia. En Nondédéo P. *et al.*, *Proyecto Petén-Norte Naachtun 2015-2018: Informe de La Temporada de Campo 2017*, pp.357-368. CNRS-CEMCA, Presentado al Instituto de Antropología e Historia de Guatemala (IDAEH), Guatemala.
- NONDÉDÉO, P. y A. Dorison
 2017 Operación I.5: Análisis preliminar de la imagen LiDAR. En Nondédéo P. *et al.*, *Proyecto Petén-Norte Naachtun 2015-2018: Informe de La Temporada de Campo 2017*, pp.15-25. CNRS-CEMCA, Presentado al Instituto de Antropología e Historia de Guatemala (IDAEH), Guatemala.
- NONDÉDÉO, P. *et al.* (eds.)
 2013 *Proyecto Petén-Norte Naachtun 2015-2018: Informe de La Temporada de Campo 2013*. CNRS-CEMCA, Presentado al Instituto de Antropología e Historia de Guatemala (IDAEH), Guatemala, 614 p.
 2014 *Proyecto Petén-Norte Naachtun 2015-2018: Informe de La Temporada de Campo 2014*. CNRS-CEMCA, Presentado al Instituto de Antropología e Historia de Guatemala (IDAEH), Guatemala, 691 p.
 2015 *Proyecto Petén-Norte Naachtun 2015-2018: Informe de La Temporada de Campo 2015*. CNRS-CEMCA, Presentado al Instituto de Antropología e Historia de Guatemala (IDAEH), Guatemala, 658 p.
 2016 *Proyecto Petén-Norte Naachtun 2015-2018: Informe de La Temporada de Campo 2016*. CNRS-CEMCA, Presentado al Instituto de Antropología e Historia de Guatemala (IDAEH), Guatemala, 593 p.
 2017 *Proyecto Petén-Norte Naachtun 2015-2018: Informe de La Temporada de Campo 2017*. CNRS-CEMCA, Presentado al Instituto de Antropología e Historia de Guatemala (IDAEH), Guatemala, 504 p.
- PURDUE, L.
 2014 Operación IV.6 y IV.7: Agricultura y subsistencia. En Nondédéo P. *et al.*, *Proyecto Petén-Norte Naachtun 2010-2014: Informe de La Temporada de Campo 2014* pp. 579-591. CNRS-CEMCA, Presentado al Instituto de Antropología e Historia de Guatemala (IDAEH), Guatemala.
- TESTÉ, M.
 e.p. *Reconstitution des paléo-environnements et des interactions Homme-milieux à l'Holocène récent dans les basses terres tropicales mayas*. Tesis doctoral, Universidad de Paris 1 Panthéon Sorbonne.
- SCARBOROUGH V.; N. Dunning, K. Tankersley, C. Carr, E. Weaver, L. Grazioso, B. Lane, J. Jones, P. Buttles, F. Valdez y D. Lentz

2012 Water and sustainable land use at the ancient tropical city of Tikal, Guatemala. En *PNAS* July 31, 2012 vol. 109 no. 31 12408-12413. www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1202881109.

WHITMORE, T. M. y B. L. Turner II

2001 *Cultivated Landscapes of Middle America on the Eve of Conquest*, Oxford University Press, Oxford.

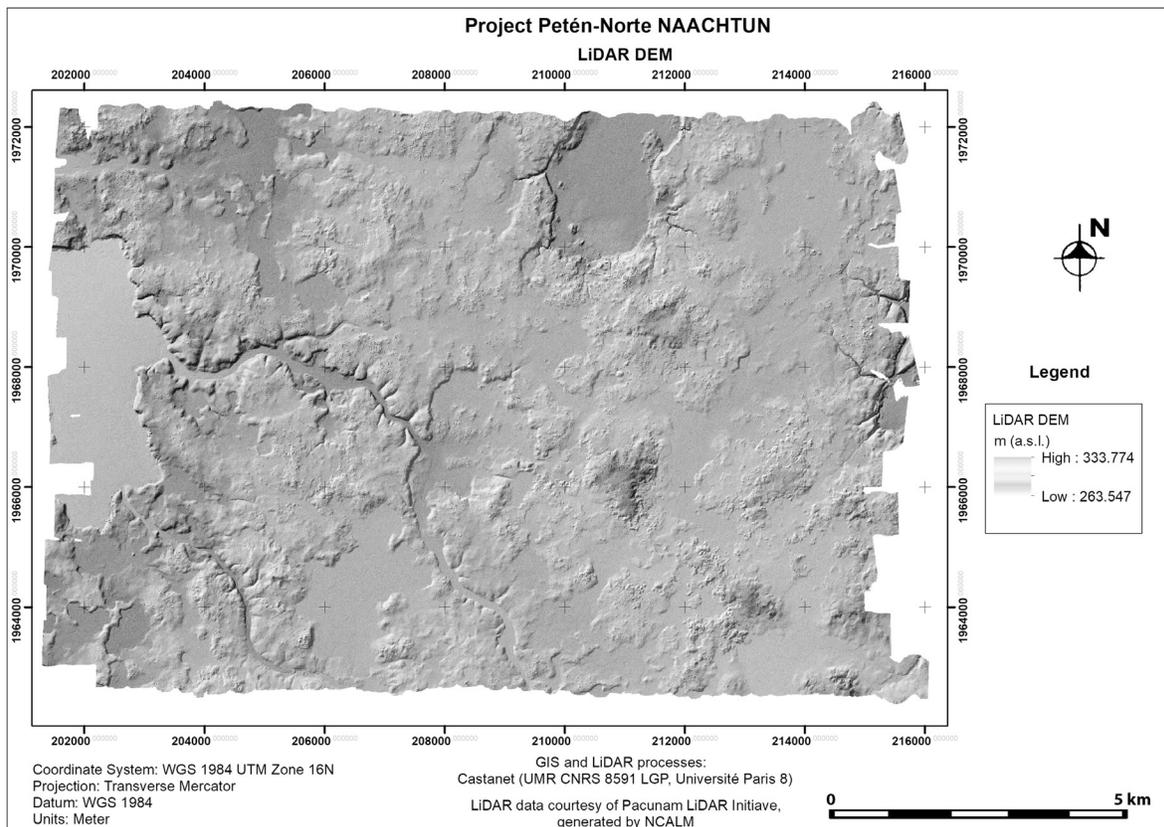


Fig.1. Modelo de elevación (DEM) LiDAR (Light Detection and Ranging) del sector de Naachtun realizado bajo iniciativa de Pacunam. Adquisición: julio del 2016; área: 135,29 km²; resolución horizontal: 1 m.; resolución vertical: algunos decímetros. C. Castanet.

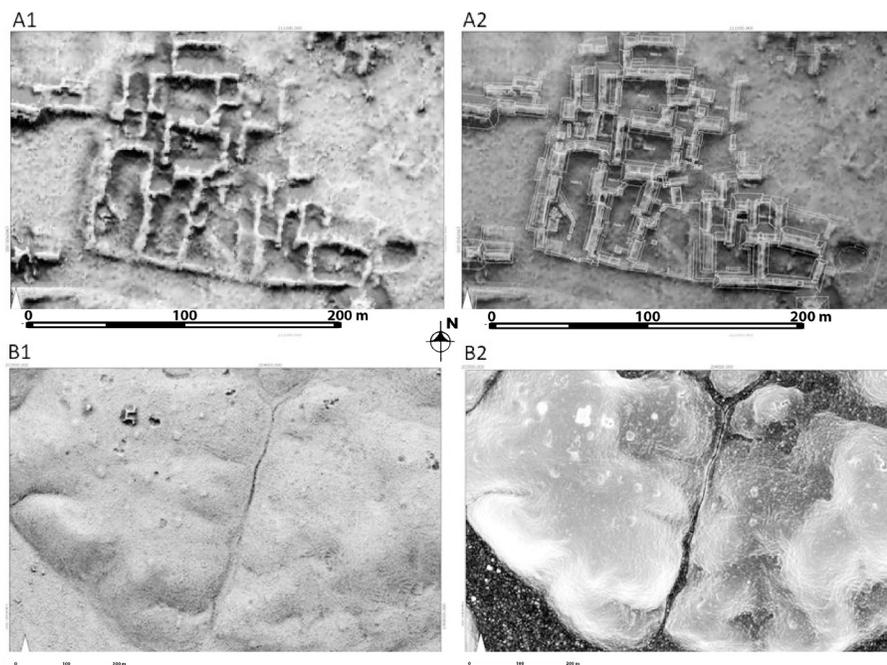


Fig.2. Ejemplo de combinación de tratamientos hechos a partir del DEM, destinados a favorecer la observación, la detección y la interpretación del micro-relieve resultando de los acondicionamientos hidráulicos y agrícolas. A: tratamiento con apertura positiva y negativa superpuesto a modelo de multi-sombras; B: Tratamiento de tipo apertura positiva y negativa superpuesto a modelo de pendientes (Dorison in Nondédéo et Dorison 2017). A. Dorison.

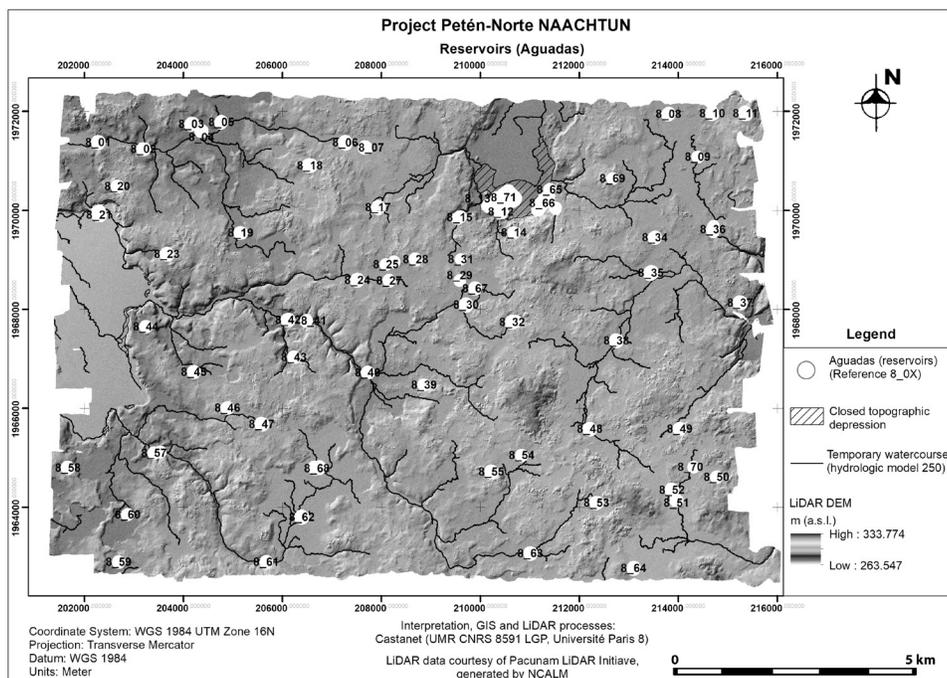


Fig.3. Localización de los 71 reservorios de agua (aguadas), de grandes dimensiones, de uso doméstico, agrario o mixto, en contextos urbano, peri-urbano o rural en la poligonal de Naachtun. © C. Castanet.

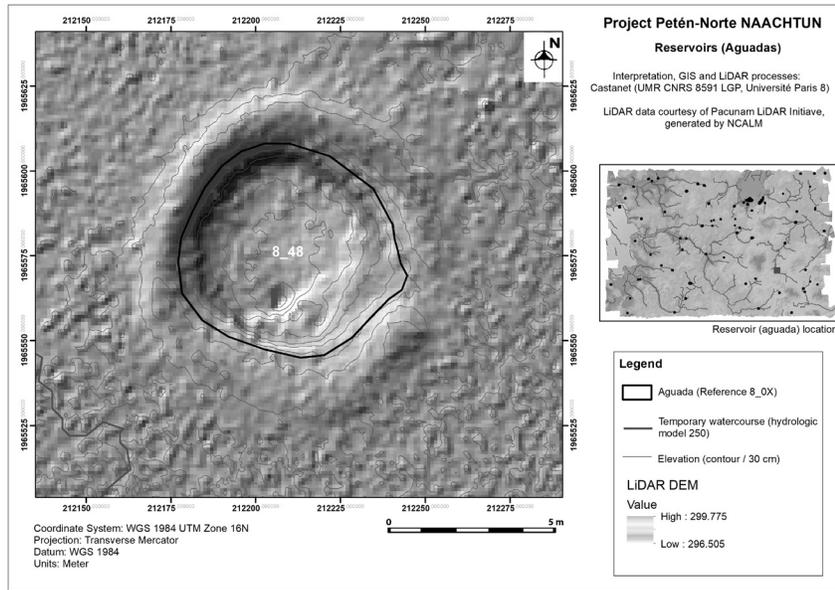


Fig.4. Micro-topografía (LiDAR) de una aguada creada ex-nihilo en un bajo del sector de Naachtun, a proximidad de un arroyo temporal. Esta obra hidráulica de fondo plano está rodeada por una especie de camellón circular provisto de una apertura que permite un abastecimiento desde el bajo y el arroyo temporal C. Castanet.

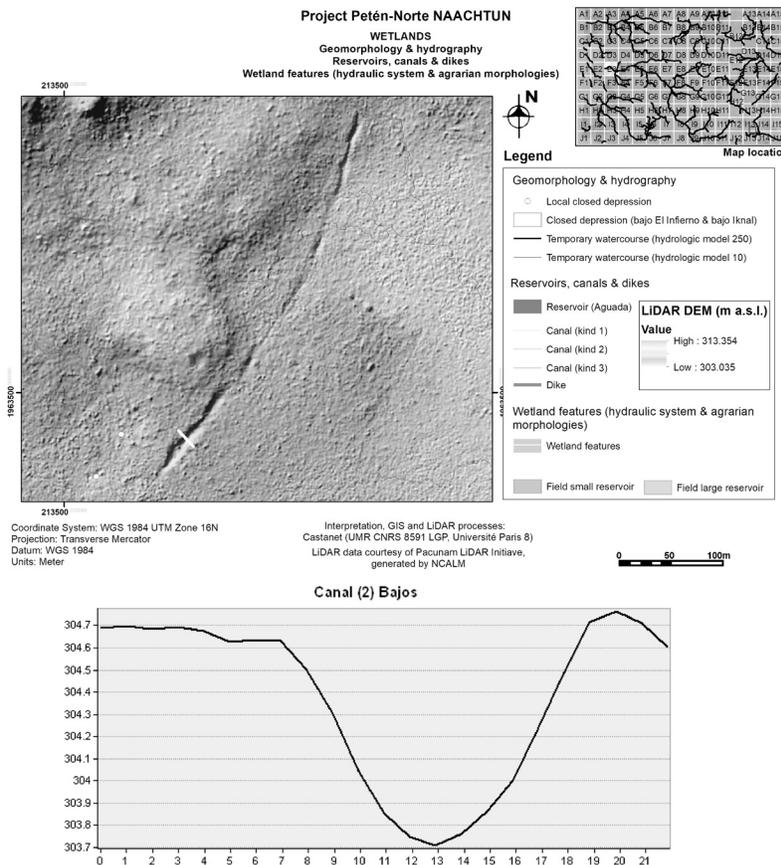


Fig.5. Micro-topografía (LiDAR) de un canal excavado en un bajo situado al sureste de Naachtun. Largo: 430 m; ancho: de 10 a 12 m; profundidad: hasta 1 m. A: Vista en planta; B: Perfil topográfico C. Castanet.

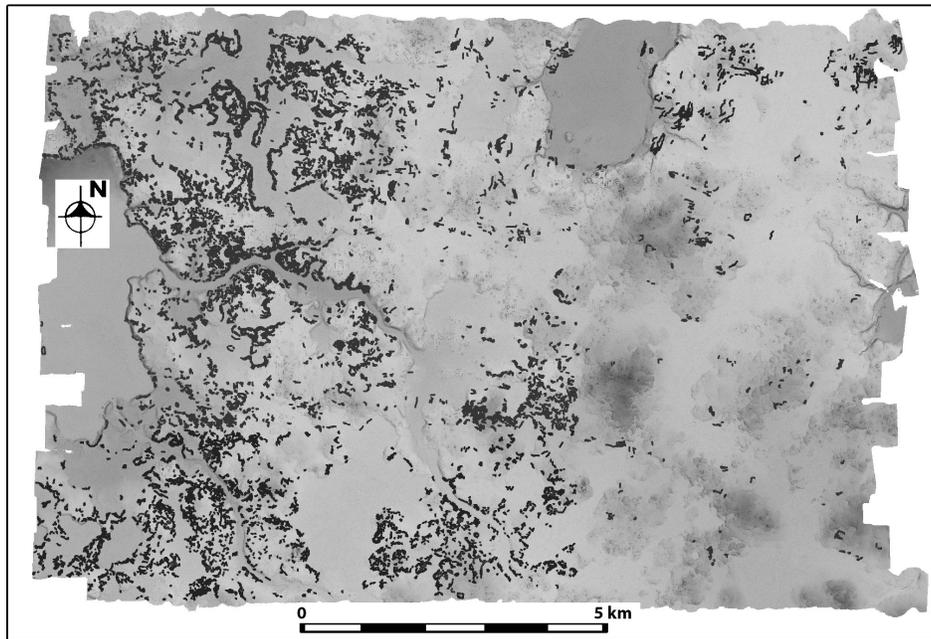


Fig.6. Localización de las 18 500 terrazas agrícolas construidas en zonas altas de colinas (montañas / uplands) en la poligonal de Naachtun. Largo cumulativo de estas terrazas: superior a 510 km. En azul: las terrazas; fondo: MNT LiDAR. Philippe Nondédéo.

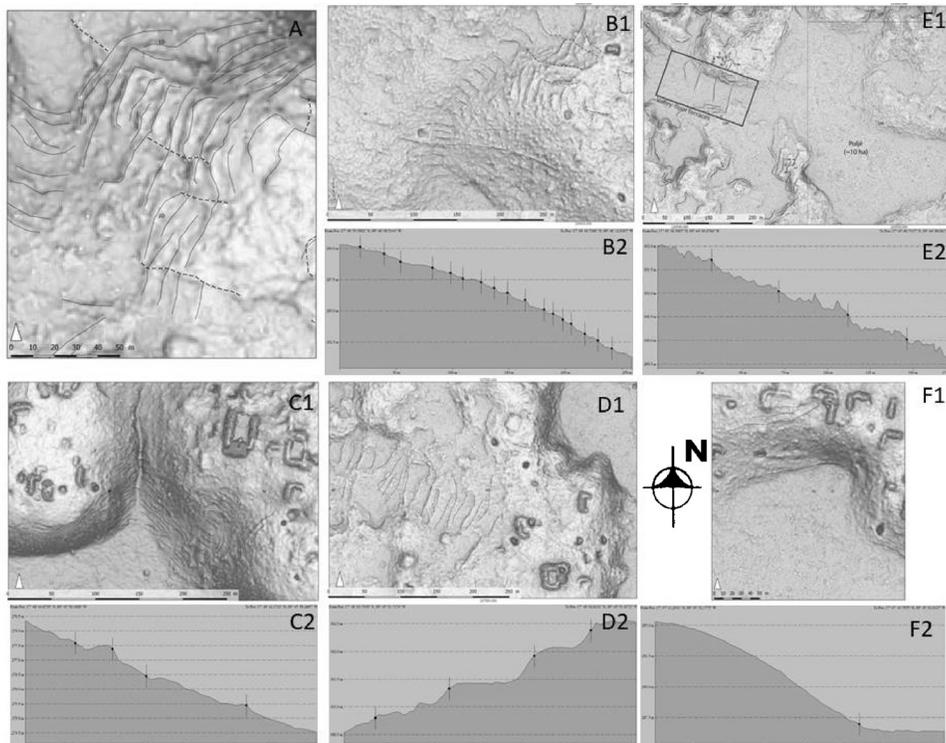


Fig.7. Ejemplo de terrazas agrícolas instaladas en zonas altas. A: Ejemplo de terrazas en cajas (“box terraces”); B 1 y 2: Ejemplo de terrazas que cruzan los arroyos, (cross-channel terraces); C 1 y 2: Ejemplo de terrazas sobre pendientes (“sloping-field terraces”); D 1 y 2: Ejemplo de terrazas de contorno (“contour or bench terraces”). A. Dorison.

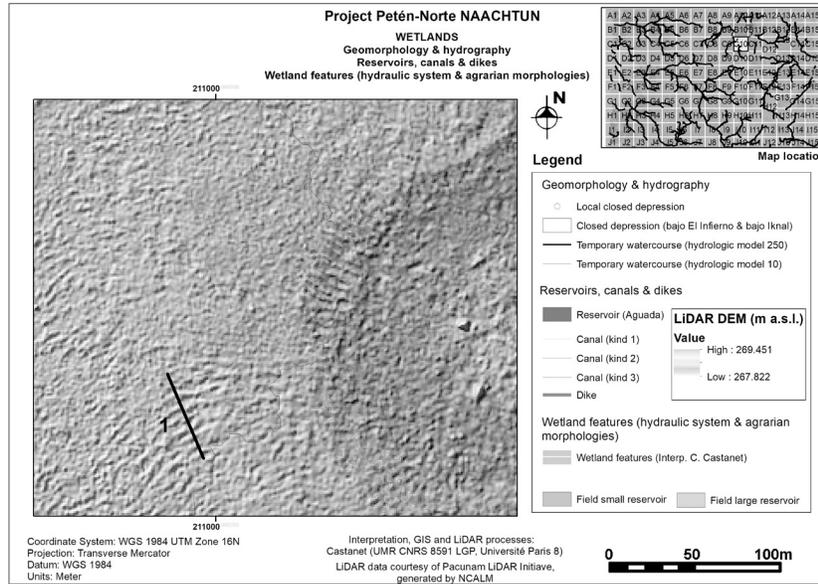


Fig.8. Micro-topografía de canales y foso (wetland features) construidos en el bajo El Infierno, al norte de Naachtun. Formas lineales en crestas (interpretadas como campo de cultivo) y surcos (interpretados como fosos y canales). C. Castanet.

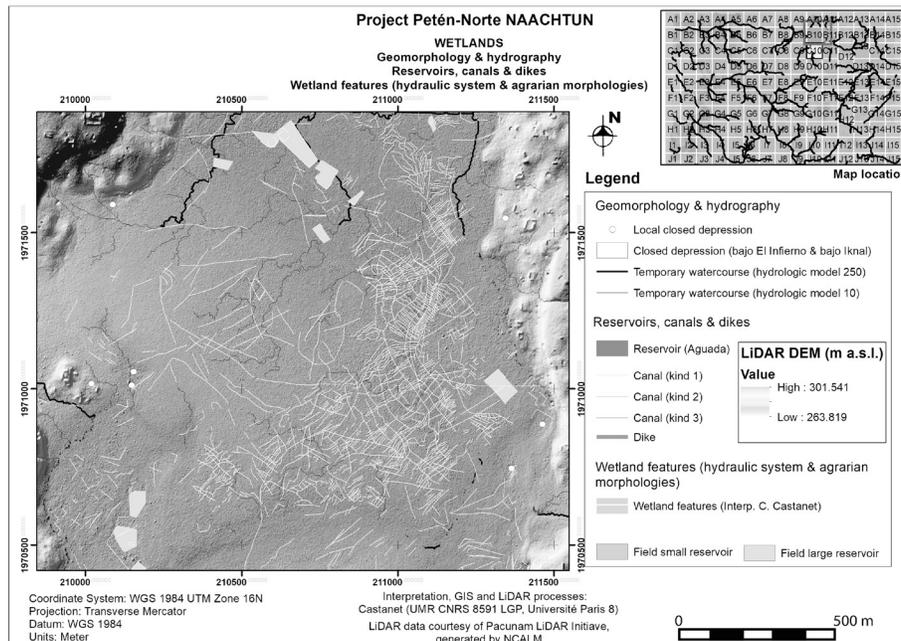


Fig.9. Canales y fosos (Wetland features) formando una red hidráulica así como morfologías agrarias en el bajo El Infierno, al norte de Naachtun. Atlas of the wetlands (Project Petén - Norte Naachtun): geomorphology and hydrography / reservoirs, canals and dikes / wetland features (hydraulic system & agrarian morphologies) (Castanet 2018b).

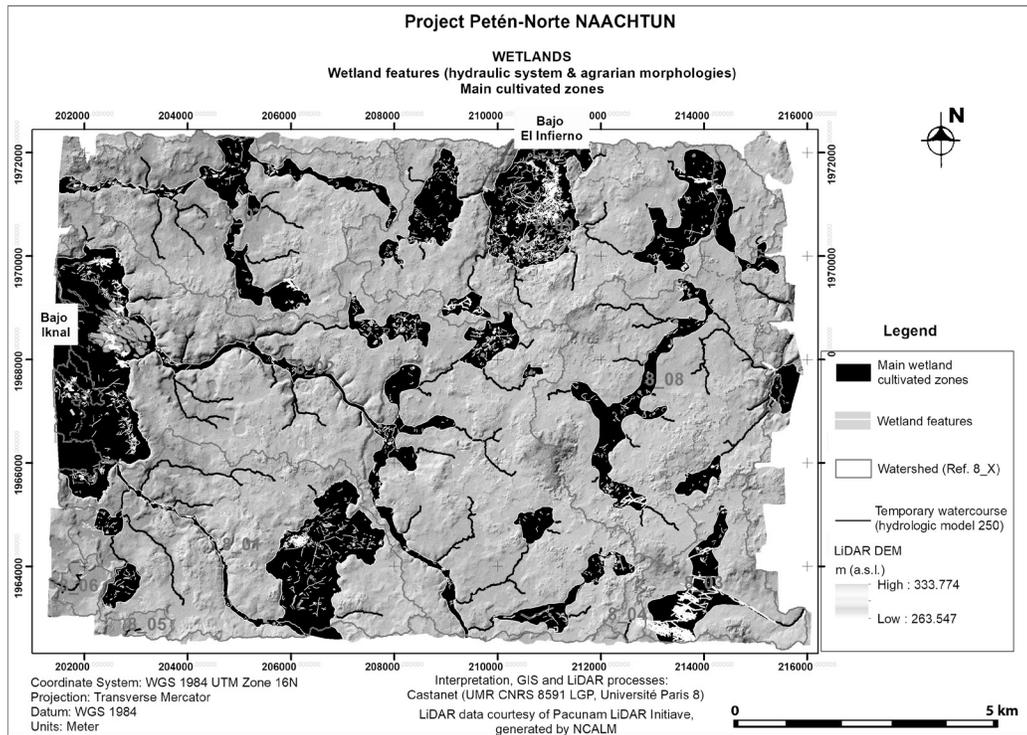


Fig.10. Distribución espacial des Canales y fosos (wetland features) en el seno de la poligonal de Naachtun. La superficie total de las zonas húmedas que presentan este sistema hidráulico asociado con estas morfologías destinadas a una agricultura intensiva es de 31.5 km², lo que representa el 22.5 % de la superficie total de la cobertura LiDAR de Naachtun. © C. Castanet.