



Caracterización de los agroecosistemas de palmera datilera en marruecos mediante técnicas de teledetección

Caractérisation des agro-écosystèmes des palmiers dattiers du maroc avec des techniques de télédétection

PROYECTO PALMERA PROJET PALMERA

2011 - 2014

UE
FEDER



Investimos en su futuro

PROGRAMA
Cooperación
Transfronteriza
España-Fronteras Alimentarias

*Caracterización de los agroecosistemas de palmera
datilera en marruecos mediante técnicas de teledetección*

PROYECTO PALMERA 2011 - 2014

*Caractérisation des agro-écosystèmes des palmiers
dattiers du maroc avec des techniques de télédétection*

PROJET PALMERA 2011 - 2014

Proyecto cofinanciado mediante recursos del Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) articulados a través del Programa de Cooperación Transfronteriza España - Fronteras Exteriores (POCTEFEX)

SOCIOS DEL PROYECTO PALMERA:

Entidades Canarias:

Gestión del Medio Rural de Canarias, SAU (GMR Canarias)

Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Aguas. Gobierno de Canarias.

Universidad de La Laguna (ULL)

Entidades del Reino de Marruecos:

Consejo Regional de Souss Massa Draa (CRSMD)

Agencia Nacional para el Desarrollo de los Oasis y del Argán (ANDZOA)

Oficina Regional de Desarrollo Agropecuario en Ouarzazate (ORMVAO)

Universidad Ibn Zohr de Agadir

Instituto Nacional de Investigación Agronómica (INRA)

Instituto Agronómico y Veterinario Hassan II (IAV HASSAN II)

Oficina Nacional de Seguridad Sanitaria de los Alimentos (ONSSA)

Esta publicación ha sido editada por

Gestión del Medio Rural de Canarias, SAU

Área de Agricultura – División de Proyectos

Febrero 2014

© del texto: los autores

© de las ilustraciones: los autores

© de la edición: GMR Canarias

**CARACTERIZACIÓN DE LOS AGROECOSISTEMAS DE PALMERA DATILERA
EN MARRUECOS MEDIANTE TECNICAS DE TELEDETECCION.
PROYECTO PALMERA-POCTEFEX**

**CARACTÉRISATION DES AGRO-ÉCOSYSTÈMES DES PALMIERS DATTIERS DU
MAROC AVEC DES TECHNIQUES DE TÉLÉDÉTECTION.
PROJET PALMERA-POCTEFEX**

Mauricio Labrador, José Astero Guerra, Xiomara Rodríguez

GMR Canarias

Manuel Arbelo, Laia Núñez, Alejandro Lorenzo, Pedro A. Hernández,

Alfonso Alonso, Manuel Torres

Universidad de La Laguna

Soufiane Idbraim, Driss Mammass, Mould Oudra

Universidad Ibn Zohr de Agadir

Índice - Table de matières

1. Introducción	11
1. Introduction	11
2. Área de estudio: Oasis de Mezguita	17
2. Zone d'étude : Oasis de Mezguita	17
3. Imágenes de satélite: adquisición y pre-procesamiento	20
3. Images satellite : acquisition et traitement	20
4. Campañas experimentales: georreferenciación y radiometría de campo	26
4. Campagnes expérimentales: géoréférencement et spectrométrie de terrain	26
4.1. Adquisición de datos de campo georeferenciados	27
4.1. Acquisition de données de terrain géoréférencées	27
4.2. Radiometría de campo. Espectro-radiómetro y método de medida	29
4.2. Radiométrie de terrain. Le spectromètre et la méthode de mesure	29
5. Cartografiado de palmeras a partir de imágenes de satélite	37
5. Cartographie des palmiers à partir des images satellite	37
5.1. Generación de los conjuntos de entrenamiento y validación	37
5.1. Création des ensembles d'entraînement et de validation	37
5.2. Clasificación	38
5.2. Classification	38
5.3. Análisis de resultados	42
5.3. Évaluation des résultats	42
6. Detección de estado fitosanitario mediante medidas espectrales	49
6. Détection de l'état phytosanitaire par des mesures spectrales	49
6.1. Resultados	51
6.1. Résultats	51
7. Conclusiones	56
7. Conclusions	56
8. Agradecimientos	57
8. Remerciements	57
9. Bibliografía	58
9. Bibliographie	58

1. Introducción

En el sur de Marruecos se encuentra una importante Reserva Mundial de la Biosfera. Este gran espacio, de más de siete millones de hectáreas, desempeña un papel fundamental en la amortiguación del avance del desierto del Sahara. Posee una amplia variedad de áreas bioclimáticas, desde el Mediterráneo húmedo al Sahara más árido. Además, es una zona con una rica biodiversidad y relativamente protegida por la desertificación y el avance de la arena por un eficaz sistema de oasis. Estos oasis constituyen verdaderos agro-ecosistemas donde la palmera datilera (*Phoenix dactylifera*) es la especie representativa. El microclima que se propicia en estas zonas ha dado lugar a una agricultura tradicional denominada "phoenicicole". El phoenicicole consiste en la explotación de la palmera, árboles frutales y los cultivos que bajo ellos se desarrollan, principalmente hortalizas y alfalfa (Keddal, 2006). Estos ecosistemas agrícolas son la columna vertebral de la economía de los habitantes de los oasis que se han asentado en esta región durante casi mil años. Por tanto, su conservación y seguimiento suponen un objetivo primordial, no sólo desde un punto de vista ambiental y paisajístico sino también socioeconómico.

Desafortunadamente, en los últimos años el estado de los palmerales en estos oasis ha sufrido un preocupante deterioro. Esta situación, debida principalmente a un hongo denominado Bayoud (*Fusarium oxysporum Schltl.*), está causando la destrucción de más de dos terceras partes de las palmeras del país. A esta enfermedad, se le suma la presencia endémica de la cochinilla blanca, que provoca un debilitamiento general de la planta, disminuyendo su producción y propiciando el ataque de otras plagas o enfermedades. Unido a estos problemas, no podemos obviar los efectos de las sequías prolongadas que ha padecido la

1. Introduction

Au sud du Maroc, on y trouve une remarquable réserve mondiale de la biosphère. Ce grand espace de plus de sept millions d'hectares, joue un rôle fondamental dans l'atténuation de l'avancée du désert Saharien. La région présente une grande diversité des régions bioclimatiques dès le climat méditerranéen humide jusqu'au plus aride des sahariens. Il s'agit, par ailleurs, d'un territoire présentant une biodiversité riche et relativement protégée de la désertification et de l'avancée du sable par un système d'oasis très efficient. Ces oasis sont de vrais agro-écosystèmes où le palmier dattier (*Phoenix dactylifera L.*) en constitue l'espèce la plus représentative. Ce microclimat favorable a donné lieu à une agriculture traditionnelle appelée «phoenicicole» dans ces régions. La phoeniciculture est une exploitation conjointe du palmier, des arbres fruitiers et des cultures qui se développent au-dessous, essentiellement de légumes et de la luzerne. Ces écosystèmes agricoles constituent la colonne vertébrale de l'économie des habitants des oasis qui habitent la région depuis presque 1 000 ans. Par conséquent, leur conservation et surveillance sont devenues un objectif primordial, pas seulement d'un point de vue environnemental et paysagiste mais aussi de celui socio-économique.

Malheureusement, dernièrement l'état des palmeraies dans ces oasis a subi une dégradation inquiétante. Cette situation, principalement causée par un champignon appelé Bayoud (*Fusarium oxysporum*), est actuellement en voie de détruire plus de deux tiers des palmeraies du pays. Cela s'ajoute à la présence endémique de la cochenille blanche, responsable d'un affaiblissement général des plantes, en réduisant leur production et en favorisant l'attaque des maladies et des ravageurs. Par ailleurs, on ne peut pas ignorer les effets des sécheresses prolongées que la région a subies pendant les dernières années, ainsi que l'abandon progressif de l'entre-

región en los últimos años, así como el paulatino abandono del mantenimiento y conservación de los palmerales por parte de los habitantes de la región, en busca de actividades más rentables.

Es por ello que resulta necesario un control fitosanitario de las palmeras de estos oasis, y más teniendo en cuenta el proceso de desarrollo en el que se encuentran inmersas dos de las principales provincias que forman parte de la Reserva Mundial de la Biosfera de los Oasis del Sur de Marruecos, Ouarzazate y Zagora. En ellas está aumentando considerablemente la movilidad interregional de personas y materiales (incluido material vegetal). Esta situación incrementa el riesgo de aparición de parásitos foráneos potencialmente letales para las palmeras y obliga a tomar medidas urgentes.

Un adecuado plan de gestión y conservación de los palmerales a gran escala ha de apoyarse en una base de datos geográfica actualizada y lo más precisa posible sobre la distribución de las palmeras. Sin embargo, la extensión de estos palmerales, que puede llegar en algunos casos a superar los 100 km de longitud y cubrir una superficie de miles de hectáreas, dificulta la realización de inventarios y el seguimiento de la evolución de estos agro-ecosistemas por medio de campañas de campo. En este sentido, la teledetección, se presenta como una herramienta eficaz para cartografiar los palmerales y detectar sus posibles enfermedades.

La teledetección es una técnica que permite medir las propiedades físicas de los objetos situados en la superficie terrestre mediante el uso de sensores que se encuentran a cierta distancia. En el caso más común están ubicados a bordo de plataformas aéreas o espaciales (satélites). Sin embargo, también se considera teledetección, la medida *in situ*, mediante el uso de un radiómetro situado en una plataforma terrestre o en la mano del operador. Estos sensores miden la

tien et la conservation des palmeraies par les habitants, qui finalement ont préféré rechercher des activités plus rentables.

C'est pour cette raison qu'il est nécessaire un système de surveillance phytosanitaire des palmiers sur ces oasis, spécialement lorsqu'on considère le processus de développement ou se trouvent deux des provinces principales qui font partie de la Réserve Mondiale de la Biosphère des Oasis de Sud du Maroc : Ouarzazate et Zagora. Actuellement, on remarque une mobilité inter-régionale croissante de personnes et matériaux (matériel végétal inclus). Cette situation fait augmenter le risque d'apparition de parasites exogènes potentiellement létaux pour les palmiers, et cela appelle à la mise en œuvre de mesures urgentes.

Un plan de gestion approprié pour la conservation des palmeraies à grande échelle doit s'appuyer sur une base de données géographiques actualisée et le plus précise possible quant à la localisation des palmiers. Cependant, l'extension de ces palmeraies, qui peut dépasser dans des cas les 100 km de longueur et les milliers d'hectares de superficie dans quelques cas, rend difficile la réalisation d'inventaires et la surveillance de l'évolution de ces agro-écosystèmes au moyen des campagnes sur le terrain.

La télédétection se présente, dans ce sens, comme un outil efficace pour mapper les palmeraies et pour détecter leurs possibles maladies. La télédétection est une technique qui aide à mesurer les propriétés physiques des objets placés sur la surface de la Terre grâce à des capteurs qui se trouvent à une certaine distance. Ceux-ci, dans le cas le plus commun, sont situés sur des plateformes aériennes ou spatiales (satellites). Pourtant, la prise de mesures sur le terrain prises à l'aide d'un radiomètre, qu'il soit placé sur une plateforme terrestre ou dans la main de l'opérateur, est aussi considérée de la télédétection. Ces capteurs mesurent la lumière

energía reflejada por el Sol en diferentes partes del espectro electromagnético (desde el azul [0,35 µm] al infrarrojo de onda corta [2,5 µm]), pudiendo así distinguir unos objetos de otros de acuerdo a sus características y composición, ya que cada uno tiene una respuesta diferente que lo caracteriza denominada firma espectral (Figura 1). Así, la firma espectral de la vegetación sana, por ejemplo, refleja mucha radiación solar en el infrarrojo próximo (~ 800 nm) y poca en el rojo (~ 650 nm). Pero cuando esa misma vegetación se ve afectada por alguna enfermedad o sufre estrés hídrico, la cantidad de energía que detectaría el sensor disminuiría considerablemente en el infrarrojo próximo y por el contrario aumentaría en el rojo. Igualmente, la teledetección nos permite distinguir fácilmente aquello que es vegetación de lo que no lo es, como por ejemplo suelo (Figura 1).

solaire reflétée dans les différentes régions du spectre électromagnétique (du bleu [0,35 µm] à l'infrarouge d'onde courte [2,5 µm]), ce qui permet de distinguer un objet d'un autre selon leurs différentes propriétés et composition, puisque chacun aura sa propre réponse caractéristique nommée signature spectrale (Figure 1). Ainsi, la signature spectrale de la végétation saine reflète beaucoup de radiation solaire, par exemple, dans l'infrarouge prochain (~800 nm) et très peu dans le rouge (~650 nm). Pourtant, dans le cas d'une végétation affectée par une maladie ou par du stress hydrique, la quantité d'énergie détectée par le capteur se réduit remarquablement de l'infrarouge prochain, et par contre elle augmente dans le rouge. Similairement, la télédétection nous permet de discerner facilement ce qui est végétation de ce qui ne l'est pas, comme par exemple le sol (Figure 1).

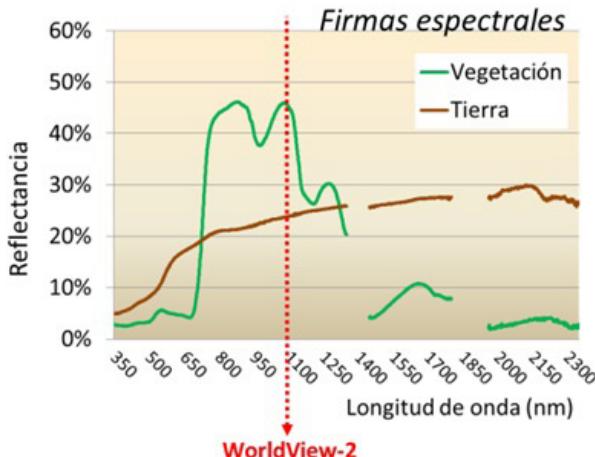


Figura 1. Ejemplos de firmas espectrales de superficies naturales con marca de longitud de final del sensor del satélite WorldView-2

La teledetección desde satélite ha sido utilizada con éxito durante muchos años para el cartografiado de la superficie ter-

Figure 1. Exemples de signatures spectrales de surfaces naturelles, où la limite de longueur d'onde de WorldView-2 est marquée

La télédétection satellitaire a été utilisée avec succès pendant plusieurs années pour mapper la surface terrestre, au niveau

rrestre, tanto a nivel global, con sensores que captan imágenes con una resolución espacial del orden de cientos de metros a kilómetros, como a nivel local, con instrumentos que permiten detectar objetos tan pequeños como 0,5 - 2 m.

Hasta la fecha no existen publicaciones específicas sobre el uso de la teledetección para el cartografiado de palmeras datileras en Marruecos. Sin embargo, algunos autores han demostrado el potencial de las imágenes de satélite en otras regiones del mundo, no sólo en la identificación de palmeras, sino también en la detección de síntomas de plagas o enfermedades. Muchos de estos trabajos se han realizado con imágenes de la península de Arabia y Malasia entre otros lugares. Saif Uddin et al., (2009) hicieron un cartografiado de palmeras datileras en zonas urbanas y agrícolas de Kuwait. Utilizaron imágenes fusionadas del sensor panchromático y multispectral del Quickbird con una resolución de 60 cm. Si bien muestran resultados con exactitudes de la clasificación que superan el 96%, debemos destacar que su estudio se ciñe a zonas con ejemplares cuyo diámetro de copa debe superar los 3 m, y lo que es más importante, la distancia entre palmeras debe ser superior a 3 – 8 m. Trabajos similares han sido llevados a cabo en Malasia, en este caso con el objetivo de detectar y contar palmeras aceiteras en plantaciones de esta especie (Helmi Z. M. Shafri et al., 2011). Los autores usaron datos de un sensor aerotransportado con una resolución espacial de 1 m y 20 bandas espectrales en el mejor de los casos. Obtuvieron exactitudes superiores al 90%, pero siempre en los casos que no existía solapamiento de copas entre palmeras. Otro interesante trabajo a destacar, aunque no específicamente dedicado a la clasificación de palmeras, es el de Ruiliang Pu y Shawn Landry (2014). En él se hace un análisis comparativo entre imágenes del satélite IKONOS y el WorldView-2 para cartografiar distintas espe-

global, avec des capteurs qui capturent des images à une résolution spatiale de quelques centaines de mètres jusqu'à des kilomètres ; au niveau local, avec des instruments qui permettent de détecter des objets si petits que 0,5 – 2 m.

À ce jour, aucun document spécifique par rapport à l'usage de la télédétection pour mapper les palmiers dattiers à Maroc n'a été publié. Cependant, quelques auteurs ont démontré le potentiel des images satellite dans d'autres régions du monde, pas seulement pour identifier les palmiers, mais aussi pour détecter des symptômes des maladies ou ravageurs. Saif Uddin et al. (2009) ont mappé les palmiers dattiers dans des zones urbaines et agricoles de Kuwait. Ils ont utilisé le capteur panchromatique et multispectral de Quickbird à une résolution de 60 cm. Même si leurs résultats montrent un niveau d'exactitude de 96%, on doit remarquer que leur étude se limite à des zones où se trouvent des palmiers à couronnes de 3 m de diamètre ou plus, et encore plus important, la distance entre eux devait être supérieure à 3 – 8 m. Des études similaires ont été menées en Malaisie, et dans ce cas le but était de détecter et compter les palmiers à huile des plantations (Helmi Z. M. Shafri et al., 2011). Les auteurs ont utilisé de données d'un capteur aéroporté à une résolution spatiale d'1 m et 20 bandes spectrales, au mieux. Ils ont obtenu des niveaux d'exactitude supérieurs à 90%, mais toujours où il n'y avait pas de chevauchement des couronnes des palmiers. Un autre travail à remarquer, bien qu'il ne soit pas spécifiquement consacré à la classification des palmiers, est celui de Ruiliang Pu et Shawn Landry (2014). Ils ont fait une analyse comparative entre les images IKONOS et WorldView-2 pour mapper de différentes espèces d'arbres dans un environnement urbain de Tampa (Floride, États-Unis). On remarque leurs résultats pour la catégorie palmier (toutes

cies de árboles en un entorno urbano de Tampa (Florida, EEUU). Destacamos sus resultados para la clase palmera (todas las especies existentes en el área de estudio), con apenas un 40% de acierto. Intentan explicarlo debido al diámetro pequeño de los ejemplares (< 3m) y al efecto de mezcla que se produce con el suelo bajo los ejemplares y en el entorno próximo. Podríamos seguir citando otros estudios, todos ellos con buenos resultados siempre que se consideren grandes palmeras y distantes unas de otras.

Con respecto a la detección de posibles enfermedades, cabe destacar el estudio realizado en Indonesia por Santoso et al (2011) usando imágenes del sensor de muy alta resolución espacial QuickBird. Ellos realizaron el cartografiado e identificación de la enfermedad producida por el hongo *Ganoderma boninense* Pat. en la raíz de las palmeras de aceite de una plantación del norte de Sumatra. Demos traron que es posible realizar una detección temprana y encontrar los patrones de expansión de la enfermedad. Y por último, debemos hacer una reseña al estudio realizado por Amira Hassan (2010) mediante teledetección cercana, esto es, el uso de un espectro-radiómetro para detectar palmeras canarias afectadas por el picudo rojo (*Rhynchophorus ferrugineus* Oliv.) en Bari (Italia). La autora encontró respuestas espectrales diferentes entre ejemplares sanos e infectados, pero sólo cuando la enfermedad ya había afectado drásticamente a la planta. También indica la necesidad de detectar el sexo de las palmeras, especialmente cuando los frutos están presentes en las palmeras hembras, ya que en estos casos, las firmas espectrales se pueden llegar a confundir con elementos enfermos. Es un estudio preliminar, pero estos resultados y los del trabajo de Santoso et al (2011) nos indican que es posible derivar índices espectrales que permitan distinguir ejemplares saludables de los enfermos.

les espèces existantes dans la zone d'étude), où le pourcentage de réussite n'était que 40%. Ils ont essayé de le raisonner en remarquant que les diamètres des exemplaires étaient petits (< 3 m) et la présence d'un effet de mélange avec les surfaces au-dessous et autour des exemplaires. On pourrait citer encore plus d'études, tous avec de bons résultats, à condition que les palmiers soient grands et à une certaine distance les uns des autres.

En ce qui concerne à la détection d'éventuelles maladies, il convient de signaler l'étude réalisée en Indonésie par Santoso et al. (2011), en utilisant les images du capteur de très haute résolution spatiale QuickBird. Ils ont mappé et identifié la maladie causée par le champignon *Ganoderma boninense* dans les racines des palmiers à l'huile d'une plantation du nord de Sumatra. Puis, ils ont démontré qu'il est possible réaliser une détection précoce et une estimation des patrons d'expansion de la maladie. Finalement, on peu également faire référence à l'étude réalisée par Amina Hassan (2010) avec de la télédétection proximale, c'est-à-dire, l'utilisation d'un spectromètre pour la détection des palmiers canariens touchés par le charançon rouge (*Rhynchophorus ferrugineus* Oliv.) à Bari (Italie). L'auteur a trouvé des réponses spectrales différentes entre les exemplaires sains et ceux infectés, mais seulement lorsque la maladie avait déjà gravement touché la plante. L'auteur signale ainsi le besoin de déterminer le genre des palmiers, particulièrement quand les fruits sont présents sur les femelles, puisque dans ce cas-là, les signatures spectrales peuvent être confondues avec des exemplaires malades. C'est une étude préliminaire, mais ces résultats et ceux du travail de Santoso et al. (2011) nous montrent qu'il est possible dériver des indices spectraux qui permettent la distinction d'exemplaires sains et de ceux malades.

Las características de los oasis del sur de Marruecos, donde coexisten cultivos herbáceos, frutales y palmeras datileras, son muy diferentes a las zonas de estudio de los trabajos previamente relatados. Sin embargo, los buenos resultados de casi todos esos casos, nos conducen a plantear, en el marco del Proyecto PALMERA del Programa POCTEFEX (Programa de Cooperación Transfronteriza España-Fronteras Exteriores) y financiado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional, un análisis de viabilidad con imágenes de satélite de muy alta resolución espacial con estos dos objetivos fundamentales:

1. Cartografiar palmerales en una zona de estudio piloto, diferenciando palmeras de los demás elementos y usos del suelo que las rodean.
2. Identificar, por medio de medidas desde espectro-radiómetro o satélite, síntomas de plagas y/o enfermedades en las palmeras de la zona de estudio.

En los siguientes apartados se describirá, en primer lugar, la zona donde se realizó el estudio. A continuación se detallarán las características de las imágenes de satélite utilizadas y el trabajo de campo realizado en Marruecos: tanto la localización de parcelas representativas y homogéneas de los tipos y usos de suelo, como las medidas radiométricas que nos ayudan a interpretar más eficazmente la radiación medida desde satélite. Posteriormente se describirán las metodologías usadas para la clasificación digital de las imágenes de satélite y la detección de síntomas de enfermedades, mostrando algunos resultados destacados. Finalmente se presentan las principales conclusiones.

Les caractéristiques des oasis du sud du Maroc, où les cultures herbacées, les arbres fruitiers et les palmiers datiers coexistent, sont très différentes aux zones d'étude des travaux décrits ci-dessus. Cependant, les bons résultats de la majorité des cas nous conduisent à envisager, dans le cadre du Projet PALMERA du Programme POCTEFEX (Programme de Coopération Transfrontalière entre l'Espagne et les Frontières Extérieures), financé par les Fonds Européens de Développement Régionale, une analyse de viabilité avec des images satellite de très haute résolution spatiale pour:

1. Mapper les palmeraies dans une région pilote, en différenciant les palmiers de tous les autres éléments et utilisations du sol qui les entourent.
2. Identifier des symptômes de maladies et/ou ravageurs aux palmiers de la région d'étude, à l'aide de mesures prises sur le terrain ou par satellite.

Dans les chapitres suivants on va décrire, d'abord, la région d'étude. Ensuite, on expliquera en détail les caractéristiques des images de satellite utilisées et le travail sur le terrain réalisé à Maroc pour:
a) localiser des parcelles représentatives et homogènes des différentes utilisations du sol, et b) prendre des mesures radiométriques qui nous aident à interpréter plus efficacement la radiation détectée au satellite. Puis on va décrire les méthodes appliquées dans la classification digitale des images satellite et la détection de symptômes des maladies, en montrant les résultats principaux, ainsi que nos conclusions finales.

2. Área de estudio: Oasis de Mezguita

El área de estudio, con una extensión aproximada de 4400 ha, está situada en el Oasis de Mezguita ($30,67^{\circ}$ Latitud Norte - $6,39^{\circ}$ Longitud Oeste) en la provincia de Zagora (Marruecos) (Figura 2). Este es uno de los seis oasis que se extienden a lo largo del curso medio del Drâa, río que fluye desde la cordillera del Atlas hacia el interior del desierto y que proporciona el agua que hace posible su desarrollo. La altitud media es de 900 m sobre el nivel del mar.



Figura 2. Ubicación geográfica del Oasis de Mezguita en la región Souss-Massa-Drâa

Con respecto a la climatología, y de acuerdo con la clasificación de Köppen y Geiger (Peel et al., 2007), el clima de Mezguita se considera como desértico cálido (BWh). La lluvia es prácticamente inexistente. En julio, la temperatura media es de $31,9^{\circ}\text{C}$, pudiendo alcanzar valores superiores a 45°C . Sin embargo, durante los meses de invierno, se pueden registrar temperaturas próximas a los 10°C

2. Zone d'étude : Oasis de Mezguita

La région d'étude a une superficie d'environ 4 400 ha et elle est située dans l'Oasis de Mezguita ($30,67^{\circ}$ de latitude N, $6,39^{\circ}$ de longitude O) dans la province de Zagora (Maroc) (Figure 2). Celui-ci est un des six oasis qui s'étendent le long du cours moyen du Drâa, qui est le fleuve qui coule dès la cordillère de l'Atlas jusqu'à l'intérieur du désert et qui fournit l'eau qui fait possible leur développement. L'altitude moyenne est 900 m au-dessus du niveau de la mer.

Figure 2. Situation géographique de l'Oasis de Mezguita de la région Souss-Massa-Drâa

En ce qui concerne à la climatologie et selon la classification de Köppen et Geiger (Peel et al., 2007), le climat de Mezguita est considéré désertique chaud (BWh). La pluie et pratiquement inexistante. Au mois de juillet, la température moyenne est de $31,9^{\circ}\text{C}$, est elle peut atteindre des valeurs supérieures à 45°C . Toutefois, pendant les mois d'hiver on peut enregistrer des températures de presque 10°C , à cause de

debido a la altitud. La precipitación anual acumulada apenas alcanza los 100 mm. En julio, el mes más seco, es de 1 mm, mientras que el mes con el mayor índice de precipitaciones es noviembre, con un promedio de 21 mm. (Fuente: <http://www.cgms-maroc.ma/cgms-map/>).

La población cercana más importante es Agdz, con unos 10.000 habitantes en 2013. Toda la zona se caracteriza por el predominio de la pequeña propiedad. Alrededor del 86% de las explotaciones tienen una superficie inferior a 2 ha y sólo el 5,3% superior a las 5 ha. Este oasis es un ejemplo representativo de agro-ecosistema con alto valor social, económico y ambiental, y sirve de sustento a la inmensa mayoría de familias de la zona.

En el Oasis de Mezguita, las palmeras datileras se distribuyen de forma irregular. Suelen ocupar los márgenes de las huertas, aunque en algunos casos las cubren en su totalidad, formando una cubierta vegetal bastante densa. Coexisten con otros cultivos en tres pisos de vegetación: palmeras, árboles frutales y cultivos herbáceos. Entre estos últimos, predominan diferentes cereales (trigo, cebada y maíz), alfalfa (cultivada para la alimentación del ganado) y henna, además de diferentes legumbres y hortalizas para consumo humano. En cuanto a los árboles frutales, predominan los granados, almendros, higueras y olivos. Los cultivos se desarrollan en régimen de regadío, para lo cual los agricultores necesitan bombear el agua del subsuelo o derivar por inundación parte del caudal de río. En cuanto a la vegetación natural, se pueden encontrar abundantes ejemplares de Taraje (*Tamarix aphylla*) y cañaverales. (Figuras 3 a 7).

l'altitude. Les précipitations annuelles cumulées atteignent à peine les 100 mm. En juillet, qui est le mois le plus sec, elle est d'1 mm, alors que le mois avec l'indice de précipitations le plus élevé est novembre, avec une moyenne de 21 mm (source: <http://www.cgms-maroc.ma/cgms-map/>).

La ville la plus proche du site est Agdz, avec 10 000 habitants environ en 2013. Toute la zone est caractérisée par prédominance des petites propriétés agricoles. Quelque 86% des exploitations ont une superficie inférieure à 2 ha et seulement dans un 5,3% elle est supérieure à 5 ha. Cet oasis est un exemple représentatif d'agro-écosystème de haute valeur sociale, économique et environnementale, en tant qu'il soutient la majorité des familles de la région.

Dans l'oasis de Mezguita, les palmiers datiers se distribuent de manière irrégulière. Souvent ils occupent les marges des potagers, que parfois ils couvrent totalement, en constituant une couverture végétale assez dense. Ils coexistent avec d'autres cultures dans trois strates de végétation: des palmiers, des arbres fruitiers et des cultures herbacées. Entre ces derniers, on trouve principalement des céréales (le blé, l'orge et le maïs), de la luzerne (cultivée pour la nourriture du bétail) et du henné, ainsi que des légumes verts et secs pour la consommation humaine. En ce qui concerne les arbres fruitiers, le grenadier, l'amandier, le figuier et l'olivier sont les arbres majoritaires. Les cultures se développent en régime d'irrigation, ce qui rend nécessaire de pomper l'eau du sous-sol ou de détourner partiellement l'eau du fleuve pour un système d'arrosage par inondation. Finalement, la végétation naturelle de la région consiste en des exemplaires abondants de tamaris (*Tamarix aphylla*) et des roselières (Figure 3, 4, 5, 6 et 7).



Figura 3. Palmeral de Mezguita

Figure 3. L'oasis de Mezguita



Figura 4. Cultivos de cereal (izquierda) y alfalfa (derecha) bajo palmeral



Figure 4. Cultures des céréales (gauche) et luzerne (droit)



Figura 5: Ejemplares de *Tamarix aphylla*

Figura 6: Árboles frutales (granados)



Figure 5. Exemplaires de *Tamarix aphylla*

Figure 6. Arbres fruitiers (grenadier)



Figura 7: Palmera afectada por Bayoud

Figure 7. Palmier affectée par Bayoud

3. Imágenes de satélite: adquisición y pre-procesamiento

Las imágenes usadas en este trabajo han sido tomadas por el satélite de teledetección WorldView-2 (WV-2) (Figura 8). Es un satélite comercial norteamericano, operado por *DigitalGlobe*, lanzado el 8 de octubre de 2009 y que orbita a 770 km de altura.

Después de un estudio exhaustivo de todos los satélites disponibles en el mercado, en el que se tuvieron en cuenta las principales características de las imágenes que suministran, esto es, resolución espacial, número de bandas espectrales y periodo de revisita principalmente (Labrador et al., 2012), se optó por el WV-2. Sus 8 bandas espectrales (Figura 9) con una resolución nominal de 1,84 m/píxel y el sensor pancromático a 0,46 m/píxel, lo convierten en el mejor satélite disponible en las fechas del estudio y de acuerdo a la fragmentada y variada cobertura del terreno en el Oasis de Mezguita.

3. Images satellite : acquisition et traitement

Les images utilisées dans ce travail ont été fournies par le satellite de télédétection WorldView-2 (WV-2) (Figure 8). C'est un satellite commercial, opéré par *DigitalGlobe*, qui orbite depuis le 8 octobre 2009 à 770 km d'altitude.

Après une étude exhaustive de tous les satellites disponibles au marché, où les principales caractéristiques des images qu'ils fournissent ont été prises en considération, c'est-à-dire, la résolution spatiale, le nombre de bandes spectrales et la fréquence de revisite (Labrador et al., 2012), nous avons choisi le satellite WV-2. Avec ses 8 bandes spectrales (Figure 9), avec une résolution nominale de 1,84 m/pixel, et son capteur panchromatique à 0,46 m/pixel, il est devenu le meilleur satellite disponible dans la région et les dates de l'étude, bien adapté à la couverture fragmentée et diversifiée du territoire dans l'Oasis de Mezguita.



Figura 8. Imagen artística del satélite WorldView-2

Figure 8. Image artistique du satellite WorldView-2

Otra particularidad que hace único a este vehículo espacial es su capacidad de tomar imágenes con un ángulo de visión de hasta 45° con respecto a la vertical. Lo que le permite cubrir cualquier punto en una franja de 1.355 km bajo la línea de paso del satélite. Además, durante una sola pasada, puede captar una superficie contigua de 96 x 110 km, a pesar de que su ancho de barrido es de sólo 16,4 km. En la Tabla 1 se muestran las principales características del sensor a bordo del WV-2.

Une autre particularité qui rend unique ce satellite est sa capacité de prendre des images sous un angle de vision de 45° maximum par rapport à la verticale. Cela lui permet de couvrir tout point situé dans une bande de 1.355 km au-dessous de la ligne de passage du satellite. En outre, dans un seul passage, il peut enregistrer une superficie de 96 x 110 km, malgré que son balayage ait une largeur de seulement 16,4 km. Les caractéristiques du capteur à bord du WV-2 sont précisées dans le Tableau 1.

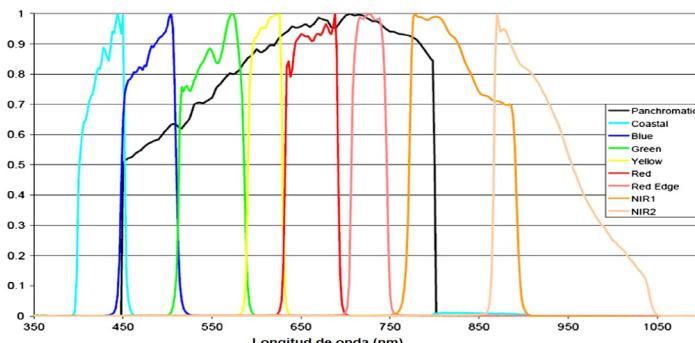


Figura 9. Funciones de respuesta relativa (0 a 1) de las ocho bandas espectrales y la pancromática del WorldView-2

Figure 9. Fonctions de réponse relative (0 à 1) des huit bandes spectrales et de la bande panchromatique de WV-2

Tabla 1. Modos de imagen del satélite WorldView-2 con sus correspondientes intervalos espectrales y resolución espacial. Debido a que el gobierno norteamericano no permite la comercialización a las resoluciones espaciales que se muestran, esta se degrada a 0,5* y 2,0** metros en la entrega de las imágenes para su uso comercial.

Modo imagen Mode d'image	Pancromático (Pan) Panchromatique (Pan)	Multiespectral (MS) Multispectral (MS)
Intervalo espectral Intervalle spectral	450-800 nm	400 - 450 nm (coastal blue) 450 - 510 nm (blue) 510 - 580 nm (green) 585 - 625 nm (yellow) 630 - 690 nm (red) 705 - 745 nm (red edge) 770 - 895 nm (NIR1) 860 - 1040 nm (NIR2)
Resolución espacial Resolution spatial	0.46 m* (0.52 m a 20° de la vertical)	1.8 m** (2.4 m at 20° de la vertical)

Una vez seleccionado el satélite se procedió a la definición de los parámetros básicos que se han de suministrar a la empresa distribuidora para adquirir las imágenes (Labrador et al., 2012). La zona de estudio se definió por un polígono georreferenciado que, en nuestro caso, cubre la casi totalidad del Oasis de Mezquita. A continuación se definió la ventana de adquisición, entendida como el marco temporal en el que la imagen debe ser captada. Estas fechas fueron programadas para que coincidieran, de ser posible, con las campañas experimentales que se describirán en un apartado posterior. Otro parámetro fundamental se refiere al mayor ángulo de adquisición con que se puede tomar la imagen con respecto a la vertical del satélite. A mayor ángulo, menor será el tiempo de revisita del satélite, con lo que aumentan las posibilidades de adquisición exitosa de la imagen.

Tableau 1. Modes d'image du satellite WorldView-2 avec leur intervalles spectrales et résolution spatiale respectifs. Le gouvernement des Etats Unis a interdit la commercialisation des images aux résolutions spatiales montrées, et par conséquent elles se dégradent à 0,5* et 2,0** m pour leur distribution et usage commercial.

Après avoir sélectionné le satellite, les paramètres basiques à fournir à l'entreprise distributrice afin d'acquérir les images ont été définis (Labrador et al., 2012). La zone d'étude a été définie par un polygone géoréférencé, lequel couvre, dans ce cas, presque la totalité de l'Oasis de Mezquita. Ensuite, un cadre temporel a été établi pour l'acquisition des images. Ces intervalles de temps ont été programmés, si possible, simultanément aux campagnes expérimentales, lesquelles seront décrites dans les sections suivantes. Un autre paramètre fondamental fait référence à l'angle vertical maximal d'acquisition des images qui peuvent être prises par le satellite. Plus grand est l'angle, moins temps de revisite à la satellite, ce qui fait augmenter les possibilités de succès dans l'acquisition de l'image. Cependant, un angle grand entraîne une pire résolution spatiale et précision de

Sin embargo, un ángulo grande implica menor resolución espacial y menor precisión de localización. Con respecto a la cobertura nubosa, el porcentaje máximo de nubes en las imágenes WV-2 es por defecto inferior al 15 %.

Las consideraciones anteriores requieren una valoración general que conduza a un compromiso satisfactorio. Sólo en raras ocasiones se consigue obtener una imagen que satisfaga al 100% todos los parámetros predefinidos. Las imágenes finalmente adquiridas y sus parámetros característicos se pueden ver en la Tabla 2.

Tabla 2. Imágenes WV-2 adquiridas y aproximadamente coincidentes en el tiempo con las campañas experimentales.

Fecha programación	Ventana temporal	Fecha de captura	Ángulo de elevación	Cobertura de nubes	Vista rápida
Date programmée	Intervalle temporel	Date de capture	Angle d'élévation	Couverture de nuages	Caption
2 nov 2012	30 dias/ jours	5/11/2012	67,7°	< 1%	
25 mar 2013	30 dias/ jours	18/03/2013	72,2°	0 %	
15 jul 2013	30 dias/ jours	13/07/2013	81,2°	0 %	

Estas imágenes se reciben corregidas radiométricamente y proyectadas al sistema de coordenadas WGS84 UTM-29N. El pre-procesamiento que le aplicamos consistió en la conversión a valores de radiancia espectral en lo alto de la atmósfera utilizando el procedimiento descrito por Updike y Comps (2012). Las imágenes resultantes fueron corre-

localisation. En ce qui concerne à la couverture nuageuse, le pourcentage maximal de nuages dans les images WV-2 est, par défaut, inférieur à 15%.

Les considérations précédentes ont besoin d'une évaluation générale qui conduise à un compromis satisfaisant. Seulement dans des rares occasions, il est possible d'obtenir une image qui remplit le 100% des paramètres prédéfinis. Les images finalement acquises et leurs paramètres caractéristiques sont précisés dans le Tableau 2.

Tableau 2. Images WV-2 acquises et concordantes, approximativement, avec les campagnes expérimentales.

Ces images sont reçues avec la radiométrie déjà corrigée et projetées au système de coordonnées WGS84 UTM-29N. Le traitement des images a consisté, dans ce travail, à convertir les données originales à des unités de radiance TOA (Top-of-Atmosphere) en utilisant la méthode décrite par Updike et Comps (2012). Ensuite, les images ont été traitées avec

gidas atmosféricamente con el método FLAASH (Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes) (Matthew, 2000) para obtener reflectancias a nivel de suelo. Al no disponer de perfiles atmosféricos para los días de adquisición, se utilizó el modelo atmosférico estándar de "Latitudes Medias en Verano (LMV)" y el modelo de aerosoles "Rural". La visibilidad inicial (en km) y los valores de vapor de agua atmosférico ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$) se escalaron en base a las medidas de la estación meteorológica de Agdz para las fechas correspondientes.

Para evitar el procesamiento innecesario de los píxeles que quedaban fuera de la zona de estudio, a uno y otro lado del oasis, se generó una máscara que ocultó estos márgenes. De forma que la aplicación de cualquier procedimiento posterior a las imágenes, sólo se realizó sobre la zona de palmeral y cultivos.

Las palmeras se encuentran normalmente entremezcladas con el resto de cultivos y usos del suelo y dispuestas de forma irregular, por lo que para llevar a cabo el estudio se hace necesario el mayor nivel de detalle posible. Esto se consigue con la imagen pancromática, con un píxel de tal solo 50 cm, pero analizando únicamente esta imagen, perdemos la valiosa información espectral que proporcionan las 8 bandas del satélite WV-2. Es por ello que se optó por realizar un proceso de fusión de la imagen pancromática con la multiespectral. De esta forma, se obtiene una imagen con la resolución espacial más alta que contiene además toda la información espectral. Aparte de la pérdida o posible distorsión de la información espectral que puede producirse en este proceso, otro problema importante es incremento sustancial del "peso" de la imagen, lo que obliga a usar equipos muy potentes que reduzcan el tiempo de procesado. El método usado para realizar la fusión fue desarrollado por el Dr. Yun Zhang de University of New Brunswick (Canada) <http://www.pcigeomatics.com/pdf/>

la méthode FLAASH (Fast Line-of-Sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes) (Matthew, 2000) pour la correction atmosphérique et l'obtention de réflectance au niveau du sol. Étant donné que nous ne disposons pas de profiles atmosphériques pour les jours d'intérêt, nous avons utilisé le modèle atmosphérique standard de « Latitudes moyennes en été » (LMV) et le modèle d'aérosols « Rural ». La visibilité initiale (en km) et les valeurs de vapeur d'eau atmosphérique ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$) se sont adaptés à l'échelle de mesure de la station météorologique d'Agdz aux dates correspondantes.

Afin d'éviter un traitement inutile des pixels situés hors de la zone d'étude, un masque a été généré pour cacher les marges aux deux côtés de l'oasis. Ainsi, tout traitement ultérieur des images a été seulement appliqué sur les zones de palmeraie et cultures.

Normalement, les palmiers se trouvent mêlés au reste de cultures et utilisations du sol, et disposées de façon irrégulière, ce qui rend nécessaire le niveau de détail le plus haut possible. Cela est possible grâce à l'image panchromatique, avec un pixel de 50 cm, mais en même temps on perdrait toute l'information spectrale des 8 bandes du satellite WV-2. C'est pour cette raison que nous avons choisi un processus de fusion des images panchromatique et multiespectrale. Ainsi, on obtient une image qui a, non seulement une résolution spatiale plus haute, mais aussi toute l'information spectrale. En plus de la perte ou possible distorsion de l'information spectrale qui peut se produire au cours de ce processus, il y a encore un autre problème qui se présente : le poids considérable de l'image générée, ce qui oblige à utiliser des équipements très puissants pour réduire la durée du traitement. La méthode de fusion utilisée a été développée par Dr. Yun Zhang de l'Université de New Brunswick (Canada) <http://www.pcigeomatics.com/pdf/>

www.pcigeomatics.com/pdf/GeoInformatics_WorldView-2.pdf. Esta técnica resuelve los dos problemas más importantes en la fusión de imágenes, por un lado la distorsión del color y por otro, la dependencia del operador. Este método realiza un ajuste por mínimos cuadrados, para una mejor representación del color, entre los niveles de gris de la imagen multispectral original, la panchromática y las bandas fusionadas (Figura 10).



A



B



C

Figura 10. Proceso de creación de la imagen fusionada (C), usando la imagen panchromática (A) y la multispectral (B)

Con el fin de que los resultados obtenidos puedan ser usados como una capa más de información geográfica y para facilitar el proceso de clasificación y validación de resultados, se procedió a realizar una ortorectificación de las imágenes usando el mejor modelo digital del terreno (MDT) al que tuvimos acceso, el Global Digital Elevation Model Version 2 (GDEM V2), disponible en <http://gdex.cr.usgs.gov/gdex/> y con una resolución de 30 m. Este proceso no resulta imprescindible para la zona de estudio que nos ocupa debido a lo plano del terreno, con apenas variaciones de centímetros en altura (Figura 11). El resultado final muestra errores de desplazamiento inferiores a 0,5 m.

[Geoinformatics_WorldView-2.pdf](http://www.pcigeomatics.com/pdf/GeoInformatics_WorldView-2.pdf). Cette technique résout les deux problèmes les plus importants dans la fusion d'images: d'un côté la distorsion de la couleur et, d'un autre côté, la dépendance de l'opérateur. Il s'agit d'un ajustement par la méthode des moindres carrés entre les niveaux de gris des images multispectral originale, la panchromatique et les bandes fusionnées, pour améliorer la représentation des couleurs (Figure 10).

Figure 10. Processus de fusion (C) d'images multispectrale (B) et panchromatique (A)

Afin d'obtenir des résultats qui puissent être utilisés comme une couche additionnelle d'information géographique et, en même temps, pour rendre plus facile le processus de classification et validation des résultats, nous avons réalisé une orthorectification des images avec le meilleur Modèle Numérique du Terrain (MNT) disponible: *Global Digital Elevation Model version 2 (GDEM V2)*, accessible sur le site web <http://gdex.cr.usgs.gov/gdex/> avec une résolution de 30 m. Cette phase n'était pas indispensable dans ce cas, à cause des caractéristiques du terrain dans la zone d'étude, qui présente à peine des variations de quelques centimètres d'altitude (Figure 11). Le résultat final a montré erreurs de déplacement inférieures à 0,5 m.

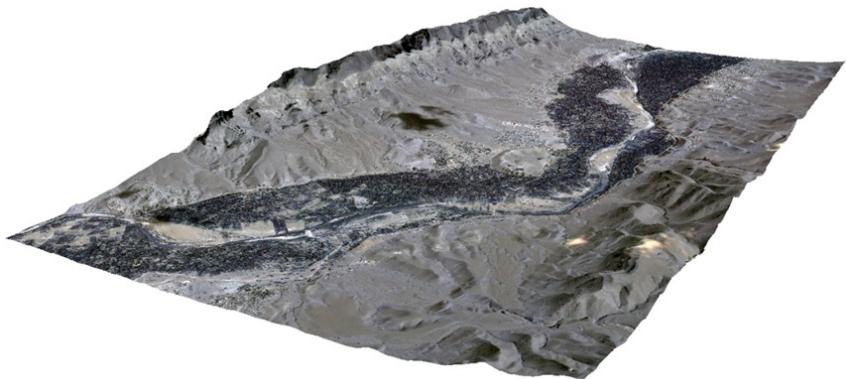


Figura 11. Imagen de la zona de estudio en 3D del satélite WorldView-2 proyectada sobre el MDT

4. Campañas experimentales: georreferenciación y radiometría de campo

El proceso de cartografiado del palmeral se compone de dos fases bien diferenciadas pero conectadas entre sí. La primera consiste en el trabajo de campo, donde se recopila información sobre el terreno de la zona de estudio imprescindible para poder desarrollar la segunda fase, es decir, el proceso de clasificación de las imágenes de satélite y el posterior análisis de fiabilidad de los resultados.

Durante las campañas experimentales se obtuvieron puntos de control y polígonos de parcelas representativas y homogéneas de los tipos y usos de suelo por un lado, y medidas radiométricas que nos ayudan a interpretar más eficazmente la radiación medida desde satélite por otro. Toda esta información ha de estar perfectamente geo-referenciada.

El Palmeral de Mezquita es un agro-ecosistema dinámico, es decir, sus características cambian a lo largo del año y de un año al siguiente. Las palmeras y los árboles frutales son relativamen-

Figure 11. Image 3D du satellite WorldView-2 projetée sur le MNT.

4. Campagnes expérimentales: géoréférencement et spectrométrie de terrain

La procédure pour mapper la palmeraie a deux phases différencierées mais reliées entre elles. La première concerne le travail de terrain de la zone d'étude, indispensable pour la réalisation de la deuxième phase, c'est-à-dire, le processus de la classification des images satellite et l'analyse de faisabilité des résultats qui suivra.

Pendant la réalisation des campagnes expérimentales, nous avons collecté les informations suivantes : des points de contrôle et des polygones de parcelles représentatives et homogènes des différents types de couvertures et utilisations du sol, et des mesures radiométriques qui contribuent à une interprétation plus efficace de l'information fournie par le satellite. Toutes ces données doivent être parfaitement géoréférencées.

La Palmeraie de Mezquita est un agro-écosystème dynamique, c'est-à-dire que ses caractéristiques changent au cours de l'année et d'une année à la suivante. Les palmiers et les arbres fruitiers restent

te estáticos a lo largo del tiempo, pero los cultivos herbáceos son susceptibles de presentar cambios radicales en cortos períodos. Esto implica la necesidad de recopilar información de campo actualizada cada vez que se adquiera una imagen de satélite: información recogida no coincidente con la imagen podría diferenciarse de la realidad analizada. En este sentido, cada adquisición de imagen de satélite fue acompañada de la correspondiente campaña experimental de campo en un plazo de tiempo lo más corto de ser posible.

Una acción previa a las medidas *in situ* en el oasis fue la determinación aproximada de las zonas donde se iba a actuar. Este trabajo consistió en hacer un repaso visual de imágenes satelitales previas de la zona. En esas imágenes se identificaron las zonas más interesantes para muestrear basándonos en la presencia o no de palmeras y en las posibilidades de acceso. En base a este análisis se diseñó el plan de trabajo de cada una de las tres campañas experimentales en noviembre de 2012 y marzo y julio de 2013.

4.1. Adquisición de datos de campo georeferenciados

El trabajo de campo consistió en la georeferenciación de ejemplares de palmeras, árboles, cultivos, suelo, etc., con la ayuda de un dispositivo portátil que dispone de GPS (Global Positioning System) y de imágenes de la zona de estudio. La identificación de puntos de control o polígonos en la imagen resulta una tarea compleja debido a la aglomeración que, a veces, se produce de diferentes ejemplares y la limitada resolución de la imagen. Cada vez que un ejemplar de palmera, o cualquier otro cultivo o uso del suelo, era identificado y fuese posible su ubicación sobre la imagen, se registraba anotando la siguiente información en un formulario desarrollado *ex professo* (Figura 12):

statiques au cours du temps, mais les cultures herbacées sont susceptibles de subir des changements radicaux dans des périodes de temps très courtes. Cela implique la nécessité de collecter des informations de terrain actualisées chaque fois qu'une image satellite soit acquise : l'information collectée de manière non simultanée pourrait s'éloigner de la réalité analysée sur l'image. À cet égard, chaque image de satellite acquise a été accompagnée d'une campagne expérimentale de terrain dans un intervalle de temps si proche que possible.

Un travail préparatoire pour les mesures *in situ* dans l'oasis a été la détermination approximative des zones pour la prise des mesures. Cela a consisté à réaliser une inspection visuelle de la région sur des images satellite précédentes. Dans ces images, les zones les plus intéressantes à échantillonner ont été identifiées, selon la présence ou absence des palmiers et leur accessibilité. Conformément à cette analyse, un plan de travail a été conçu pour chacune de campagnes expérimentales, en novembre 2012 et en mars et juillet 2013.

4.1. Acquisition de données de terrain géoréférencées

Le travail sur le terrain a consisté à géoréférencer des exemplaires de palmiers, arbres, cultures, sol, etc., à l'aide d'un dispositif portable doté de GPS (*Global Positioning System*) et d'images de la zone d'étude. L'identification des points de contrôle ou polygones sur l'image est une tâche complexe à cause de l'agglomération que parfois se produit entre différents exemplaires, ainsi que de la résolution limitée de l'image. Chaque fois qu'un exemplaire de palmier ou d'une autre culture ou utilisation du sol était identifié, et sa localisation sur l'image était possible, on l'enregistrait alors qu'on notait dans un formulaire conçu à cet effet l'information suivante (Figure 12):

- Localización: registro de coordenadas X, Y. En realidad las coordenadas van asociadas al punto marcado sobre la imagen. Las coordenadas no han de ser perfectas, pero sí su ubicación sobre la imagen, que es la que luego servirá de referencia para el análisis del resto de imágenes.
 - Especie: se determinaba mediante un desplegable el tipo de cultivo o uso del suelo identificado.
 - Información sanitaria: en el caso de los ejemplares de palmera se distinguían tres grados de estado sanitario: afectación baja, media o alta.
 - Altura: se calculaba la altura del ejemplar usando un hipsómetro digital.
 - Diámetro: se estimaba el diámetro de la copa en base a una interpretación visual.
 - ID fotografía: se anotaba el código de la fotografía tomada de cada elemento georeferenciado. Esta información es muy útil para resolver dudas y detectar posibles errores cuando se analiza en gabinete el trabajo recogido en campo.
 - Fecha: fecha de recogida del dato.
 - Observaciones: se añadía cualquier información auxiliar que no pudiera recogerse por medio del formulario y que el operario estimase que podía ser de utilidad.
- No para todos los tipos de cultivo o usos del suelo fue necesario llenar todos los campos.
- Durante las tres campañas experimentales se recogieron aproximadamente 1.000 puntos de control o polígonos.
- En la primera campaña, realizada en noviembre de 2012, se recogieron apenas una docena de puntos, centrando más nuestro esfuerzo en la espectro-radio-metría de campo que describimos en el siguiente apartado de este documento.
- Localisation: enregistrement des coordonnées X, Y. Les coordonnées sont, en réalité, associées au point marqué sur l'image. Les coordonnées ne doivent pas être parfaites, par contre la localisation sur l'image si, lorsque celle-ci est une référence pour l'analyse du reste des images.
 - Espèce: elle est déterminée sur un menu déroulant selon le type de culture ou utilisation du sol identifié.
 - Information sanitaire : dans le cas des exemplaires de palmier on distinguait trois états sanitaires : sévérité faible, modérée ou haute des maladies.
 - Hauteur: l'hauteur de l'exemplaire a été calculée en utilisant un hypsomètre digital.
 - Diamètre: le diamètre de la couronne foliaire a été estimé visuellement.
 - ID photographie: on notait le code des photographies prises de chaque élément géoréférencé. Cette information est très utile afin de résoudre des doutes et de détecter les erreurs possibles lorsqu'on analyse les données recueillies sur le terrain.
 - Date: date de récolte des données.
 - Observation : chaque information auxiliaire que ne pouvait pas être enregistrée sur le formulaire et qui était considérée pertinente par l'opérateur était notée dans ce passage.

Dans quelques types de cultures ou utilisations du sol, quelques passages de la description n'étaient.

Au cours des trois campagnes expérimentales nous avons récolté environ 1000 points de contrôle et polygones.

Dans la première campagne, réalisée en novembre 2012, à peine une douzaine de points ont été enregistrées, puisque la plupart des efforts ont été consacrés à la radiométrie de terrain qui sera décrite en détail dans la section suivante.



ESPECIE	SEXO	GRAD AFEC	ENFERMEDAD	PLAGA	ALTURA	PERIM	ID FOT	ORIG	FÉCHA
Phoenix dactylifera	Hembra	Medio		Cochilla	4	6 643	O	NO	16/07/2013
Phoenix dactylifera	Hembra	Medio	Le bayoud	Cochilla	9	7 193	O	NO	16/07/2013
Phoenix dactylifera	Hembra	Medio	Le bayoud	Cochilla	4	5 722	E	NE	17/07/2013
Phoenix dactylifera	Hembra	Medio		Cochilla	4	7 743	O	NE	17/07/2013
Phoenix dactylifera	Hembra	Medio	Le bayoud	Cochilla	10	7 894	O	NE	16/07/2013
Phoenix dactylifera	Hembra	Medio	Le bayoud	Cochilla	8	7 268	O	NE	16/07/2013
Phoenix dactylifera	Hembra	Medio		Cochilla	5	5 239	O	NE	16/07/2013
Phoenix dactylifera	Hembra	Medio	Le bayoud	Cochilla	6	9 296	O	NO	16/07/2013
Phoenix dactylifera	Hembra	Medio		Cochilla	14	6 629	O	NO	16/07/2013
Phoenix dactylifera	Hembra	Bajo		Cochilla	9	5 069	O	NE	16/07/2013

En la segunda experiencia *in situ* (marzo 2013) se registraron puntos de control en forma de grupos repartidos de forma más o menos homogénea por todo el palmeral. En total se adquirieron unos 400 puntos (Figura 13).

En la tercera y última campaña experimental (julio 2013), y de acuerdo a los trabajos de gabinete realizados con las primeras imágenes adquiridas simultáneamente en las campañas anteriores, se decidió centrar los esfuerzos en una zona concreta del palmeral. Se recogieron 500 puntos. Este trabajo se realizó en pleno verano, con temperaturas que superaban los 40 grados a la sombra, lo que dificultó aún más la recogida de información (Figura 14).

4.2. Radiometría de campo. Espectro-radiómetro y método de medida

La radiometría de campo consiste en la medida cuantitativa de la radiancia o reflectancia de un objeto o superficie, natural o no, en condiciones de iluminación solar. La ventaja de este tipo de medidas consiste en que nos permiten realizar un análisis e interpretación más precisa de esos mismos objetos identificados en las imágenes de satélite y por tanto, hacer una generalización de las mismas al resto

Figura 12. Adquisición de datos durante una campaña de campo y detalle del formulario desarrollado

Figure 12. Acquisition de données au cours de la campagne expérimentale, et détail du formulaire rempli

Dans la deuxième expérience *in situ* (mars 2013) nous avons enregistré des points de contrôle par des groupes distribués de façon homogène par toute la palmeraie. Un total de 400 points ont été acquis (Figure 13).

Dans la troisième et dernière campagne expérimentale (juillet 2013), d'après les analyses réalisées sur les premières images acquises simultanément aux campagnes précédentes, nous avons décidé de focaliser les efforts dans une certaine zone à l'intérieur de la palmeraie. Environ 500 points ont été collectés. Ce travail a été réalisé en été, où les températures parfois dépassent les 40°C à l'ombre, ce qui a difficile encore plus la récolte d'information (Figure 14).

4.2. Radiométrie de terrain. Le spectromètre et la méthode de mesure

La radiométrie de terrain consiste à mesurer quantitativement la radiance ou reflectance d'un objet ou surface, naturel ou non, en des conditions d'éclairage solaire. L'avantage de ce type de mesure est qu'il fait possible l'analyse et l'interprétation plus précises des mêmes objets identifiés sur les images satellite et, par conséquent, la généralisation pour le reste des pixels de l'image. La radiomé-



Figura 13. Distribución de los puntos de control en la segunda campaña de campo

Figure 13. Distribution des points de contrôle de la deuxième campagne expérimentale

de pixeles de la imagen. También resulta ser una herramienta imprescindible para determinar cuáles son las longitudes de ondas o combinaciones de las mismas (p. ej. Índices de vegetación) más adecuadas para detectar o diferenciar unos objetos de otros mediante el uso de la teledetección, respondiendo a preguntas como la resoluciónpectral requerida o la mejor

trié est aussi indispensable pour choisir les régions spectrales ou leurs combinaisons (par exemple, des indices de la végétation) les plus appropriées pour détecter ou différencier les objets à l'aide de la télédétection, en répondant des questions comme la résolution spectrale nécessaire ou la saison optimale pour détecter une certaine culture (ASD Tech-

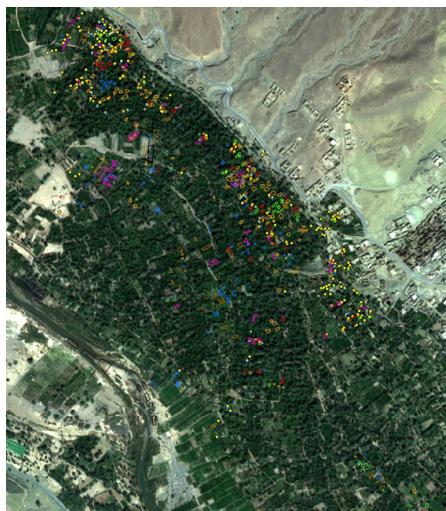


Figura 14. Distribución de los puntos de control en julio de 2013

Figure 14. Distribution des points de contrôle de la troisième campagne expérimentale

época del año para detectar un cultivo (ASD Technical Guide 3rd Ed. Section 12-1). Para realizar estas medidas se utiliza un espectro-radiómetro.

Un espectro-radiómetro es un sensor óptico que capta la radiación incidente en diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético, generando en respuesta señales eléctricas. La radiación es dispersada mediante redes de difracción a distintos detectores fotoeléctricos. Cada uno de ellos mide la energía en intervalos discretos de longitud de onda. El ancho de estos intervalos, o respuesta espectral, condiciona el poder de resolución espectral del sensor. La magnitud de la señal registrada en cada longitud de onda se corresponde con unidades de radiancia ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$).

El instrumento utilizado para la toma de medidas espectrales *in situ* durante la realización de este trabajo fue un espectro-radiómetro ASD FieldSpec 3® (Figura 15). La respuesta espectral del sensor está distribuida entre las regiones de luz visible e infrarrojo cercano (VNIR) y la del infrarrojo de onda corta (SWIR), con un rango espectral desde los 350 nm hasta los 2500 nm. Este sistema está compuesto por tres sensores distintos (VNIR, SWIR1 y SWIR2), cada uno de los cuales está optimizado para sus respectivas regiones del espectro (Tabla 3). Como los tres sensores del espectro-

nical Guide 3rd Ed. Section 12-1). Afin de réaliser ces mesures on utilise un spectromètre de terrain.

Un spectromètre est un capteur optique qui recueille la radiation incidente dans des différentes longueurs d'onde du spectre électromagnétique, en générant des signaux électriques. Le rayonnement est dispersé par les grilles de diffraction jusqu'aux différents détecteurs photoélectriques. Chacun d'eux mesure l'énergie dans des intervalles discrets de longueur d'onde. La largeur des intervalles, ou réponse spectrale, conditionne la puissance de résolution spectrale du capteur. La magnitude du signal enregistré pour chaque longueur d'onde correspond à des unités de radiance ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$).

L'instrument utilisé pour la prise des mesures spectrales *in situ* pendant la réalisation de ce travail est le spectromètre ASD FieldSpec 3® (Figure 15). La réponse spectrale du capteur est distribuée entre la région visible, l'infrarouge prochain (VNIR) et l'infrarouge d'onde courte (SWIR), avec un domaine spectral compris entre 350 nm et 2500 nm. Ce système est composé de trois capteurs différents (VNIR, SWIR1 et SWIR2), chacun d'eux optimisé pour leurs régions spectrales respectives (Tableau 3). Étant donné que tous les trois capteurs du spectro-



Figura 15. Espectro-radiómetro ASD FieldSpec 3® disponible para las medidas de firmas espiractrales

Figure 15. Spectromètre ASD FieldSpec 3® disponible pour les mesures des signatures spectrales

radiómetro se estabilizan térmicamente a ritmos distintos, resulta fundamental esperar al menos 30 minutos antes de comenzar las medidas. La señal medida alcanza estos detectores a través una fibra óptica de 1 m de longitud ensamblada a una empuñadura en forma de pistola y con un campo de visión instantáneo de 25° o 10°. El espectro-radiómetro se controla mediante un computador portátil de forma inalámbrica a través un software de adquisición y análisis de espectros denominado RS3.

Tabla 3. Características de los sensores VNIR, SWIR1 y SWIR2 del ASD.

Sensor - Capteur	VNIR	SWIR1	SWIR2
Rango espectral (nm) Rang spectral (nm)	350 - 1000	1000 - 1800	1800 - 2500
Resolución espectral (nm) Résolution spectrale (nm)	3	10	10
Intervalo de muestreo (nm) Intervalle d'échantillonnage (nm)	1.4	2	2

El método genérico de medida de una firma espectral con el ASD consiste en varios pasos. Primero es necesario ajustar la sensibilidad del instrumento a las condiciones de iluminación ambiental en campo, de forma que las medidas estén optimizadas y no se provoque saturación en las mismas. A continuación, se procede con la medida de un blanco de referencia. En nuestro caso, un *spectralon* de la empresa Labsphere con certificado de calibración. El material de fabricación es politetrafluoroetileno y se caracteriza por reflejar homogéneamente en todas direcciones, aproximadamente el 100% de la luz incidente. Por tanto, la radiación reflejada por este blanco representa una medida indirecta de la radiación solar incidente. Y el último paso supone la medida en sí del elemento que nos interesa. El resultado final es una firma espectral con los valores

mètre stabilisent leur température à une différente vitesse, il est fondamentale d'attendre au moins 30 minutes avant de commencer à mesurer. Le signal mesuré atteint ces détecteurs le long d'une fibre optique d'1 m de longueur attachée à une poignée en forme de pistolet et un champ de vision instantané (iFOV) de 25° ou 10°. Le spectromètre est contrôlé sans fil par un ordinateur portable, à l'aide d'un logiciel d'acquisition et d'analyse des spectres, le RS3.

Tableau 3. Caractéristiques des capteurs VNIR, SWIR1 et SWIR2 de l'ASD.

La méthode générique pour mesurer une signature spectrale avec l'ASD se compose de différentes phases. Premièrement, il est nécessaire de régler la sensibilité de l'instrument selon les conditions d'éclairage environnementale sur le terrain, de façon que les mesures soient bien optimisées et nous évitions leur saturation. Ensuite, nous mesurons le blanc de référence, dans ce cas le *spectralon* de l'entreprise *Labsphere* avec le certificat de calibration correspondant. Le matériel de fabrication est le polytétrafluoroéthylène et il est caractérisé par sa capacité de refléter presque le 100% de la lumière incidente dans tous les sens d'une manière homogène approximativement. C'est pour cette raison que le rayonnement reflété par le blanc de référence représente une mesure indirecte du rayonnement solaire incident. La dernière phase consiste à mesurer l'objet d'intérêt. Le résultat final est une signature spec-

de reflectancia de la superficie de interés obtenida mediante el cociente entre esta última y la medida previa sobre el blanco de referencia.

En condiciones de medida normales, con un determinado contenido de humedad ambiental (existente incluso en el caso de este estudio con clima desértico), el vapor de agua atmosférico absorbe la mayor parte de la radiación solar incidente alrededor de los 1400 nm, 1900 nm y 2500 nm, reduciendo así la relación señal/ruido y por lo tanto la calidad de la información espectral obtenida para estas longitudes de onda. Es por eso, que en algunos gráficos de firmas espectrales presentados en este documento, existe una falta de continuidad en las mismas justo en estas regiones.

La geometría de observación y de iluminación solar resulta de enorme trascendencia en la espectro-radiometría de campo. Las medidas óptimas se realizan con grandes ángulos de elevación solar, sin sombras, dejando siempre el objeto a medir entre el Sol y el usuario. Igualmente se debe evitar, en la medida de lo posible, cualquier reflexión de luz difusa proveniente de los alrededores, incluyendo las nubes próximas.

En cuanto al viento, puede influir significativamente en las medidas, especialmente de la vegetación. Las hojas y ramas que conforman la vegetación se mueven creando sombras que modifican la respuesta espectral en función de la dirección y velocidad de viento. Condiciones ideales de medida serían aquellas con viento nulo o muy débil ($< 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$).

Durante las tres campañas experimentales realizadas en la zona de estudio a finales de 2012 y en 2013, se llevaron a cabo diferentes medidas espectro-radiométricas. El diseño experimental para la adquisición de firmas espectrales de la vegetación o suelo se ajustó en cada caso a las necesidades concretas,

trale avec les valeurs de réflectance de la surface d'intérêt, qui est définie par le rapport entre celle-ci et la dernière mesure réalisée sur le blanc de référence.

Dans des conditions normales de mesure et à une humidité ambiante donnée (toujours présente, même dans un climat désertique comme dans cette étude), la vapeur d'eau atmosphérique吸吸收 la plupart du rayonnement solaire incident autour des 1 400 nm, 1900 nm et 2 500 nm, en réduisant le rapport signal/bruit, ainsi que la qualité de l'information spectrale obtenue pour ces longueurs d'onde. C'est pour cette raison que quelques graphiques des signatures spectrales présentées dans ce document montrent des discontinuités précisément sur ces régions.

La géométrie d'observation et d'éclairage solaire ont une très grande importance pour la spectrométrie de terrain. Les mesures optimales sont réalisées avec de grands angles d'élévation solaire, en absence d'ombre, et en situant l'objet à mesurer toujours entre le soleil et l'opérateur. Ainsi, toute réflexion de la lumière diffuse provenant de l'entourage, nuages prochaines incluses, doivent être évitées si possible.

Quant au vent, il peut avoir des effets significatifs sur les mesures, particulièrement dans le cas de la végétation. Les feuilles et les branches qui composent la végétation bougent tout en produisant des ombres qui modifient la réponse spectrale en fonction du sens et de la vitesse du vent. Dans une situation idéale pour prendre des mesures, le vent serait nul ou très faible ($< 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$).

Au cours des trois campagnes expérimentales réalisées dans la zone d'étude vers la fin de l'année 2012 et le long de l'année 2013, des différentes mesures spectrométriques ont été effectuées. Le plan d'expériences pour l'acquisition des signatures spectrales de la végétation ou du sol a été adapté aux nécessités parti-

siguiendo diferentes métodos. Para el caso de medidas de vegetación baja, como los cultivos herbáceos de alfalfa o suelo, se obtuvieron las firmas espectrales a pie de huerta. La óptica elegida normalmente consideraba la fibra óptica desnuda con un campo de visión instantáneo de 25° y a una altura de aproximadamente 1,20 m (Figura 16).



Figura 16: Mediciones espectrales sobre vegetación herbácea y suelo

También se realizaron medidas desde una plataforma elevadora a diferentes alturas y siempre a 2 o 3 metros por encima de la copa de la palmera o árbol seleccionado. En estos casos la óptica fue la misma anterior (25°) (Figura 17).

Y finalmente, también se midieron hojas y frutos, previamente cortados y dispuestos sobre un fondo constante con baja reflectancia, concretamente PVC negro con $\rho_{\text{PVC negro}} < 0.09$. Este último método de medida nos permite generar una librería espectral de hojas y frutos de palmera que pueden ser analizados y comparados entre si, con independencia de la variabilidad de suelos y cultivos que hay bajo las copas en su estado natural. El campo de visión instantáneo del sensor fue de 10° o 25°, y la altura del extremo de la fibra óptica de 1 m (Figura 18).

culières de chaque cas, en appliquant des méthodes différentes. Dans le cas des mesures sur la végétation basse, comme les cultures herbacées de luzerne ou le sol, les mesures ont été prises dès les marges des potagers. Le dispositif optique choisi normalement était celui avec un iFOV de 25°, ce qui correspond à l'utilisation de la fibre optique nue, et le mesures se prenaient à une hauteur d'environ 1,20 m (Figure 16).



Figure 16. Prise de mesures spectrales in situ sur végétation herbacée et sol

Dans d'autres cas, pour la végétation arboree, nous avons utilisé une plateforme élévatrice à hauteur variable, toujours laissant une distance de 2 ou 3 m au-dessus de la couronne de l'arbre ou palmier d'intérêt. Dans ces cas, le iFOV choisi était toujours 25° (Figure 17).

Finalement, nous avons mesuré des feuilles et des fruits, après les avoir coupés et placés sur un matériel de fond constant à réflectance basse: PVC noir ($\rho < 0.09$). Cette dernière méthode de mesure nous permet de générer une bibliothèque spectrale de référence de feuilles et de fruits de palmiers que peuvent être analysés et comparés entre eux, indépendamment de la variabilité des sols et cultures au-dessous du feuillage dans la réalité. Le iFOV du capteur utilisé dans ce cas varié entre 10° et 25° dans les différents situations, à une hauteur d'environ 1,2 m (Figure 18).

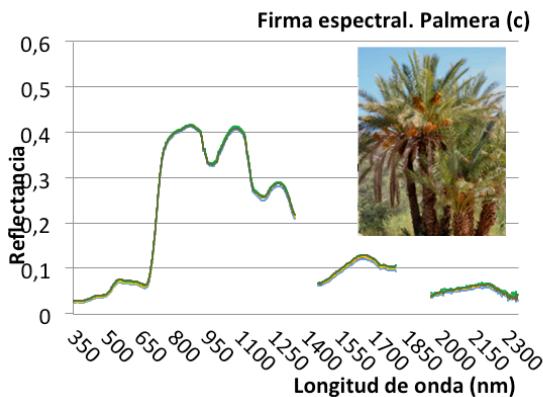
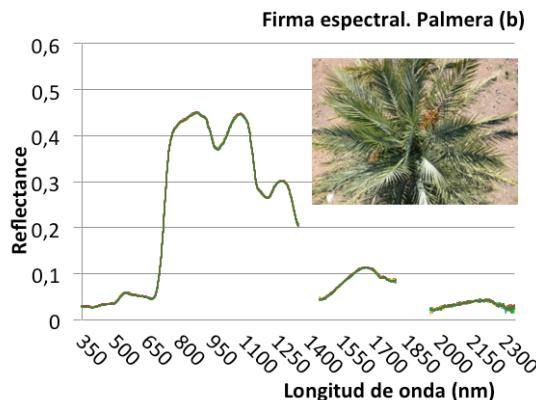
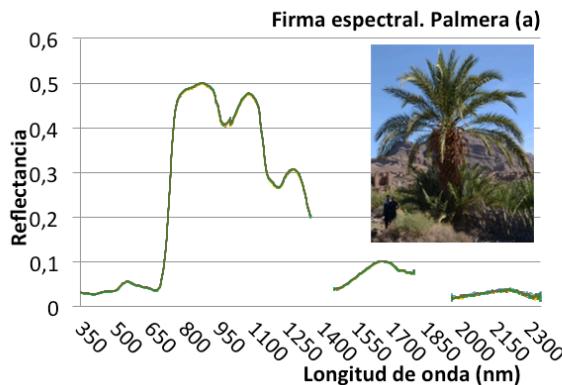




Figura 17. Medidas de firmas espectrales de copas de palmera desde plataforma. Ejemplos registrados en noviembre de 2012

Figure 17. Mesures spectrales des couronnes foliaires réalisées sur une plateforme élévatrice; exemplaires enregistrées en novembre 2012



Figura 18. Medida de firmas espectrales de hojas cortadas

Figure 18. Prise de mesures spectrales in situ sur des feuilles coupées (Maroc, 2013)

5. Cartografiado de palmeras a partir de imágenes de satélite

La información recolectada en las campañas de campo supone la base para proceder a realizar el cartografiado de las imágenes de satélite. A continuación presentamos el proceso seguido.

5.1. Generación de los conjuntos de entrenamiento y validación

Los puntos y polígonos que se registraron durante el trabajo de campo presentaban en ocasiones ligeros desplazamientos o problemas de georeferenciación. Esto se debió fundamentalmente a que las condiciones de medida eran complicadas debido al terreno, la insolación y la propia complejidad del palmeral, impiadiendo dibujar unos recintos perfectos. Por otra parte, al utilizar en los dispositivos portátiles imágenes de base distintas a la que se analiza con posterioridad, se producen desplazamientos debido a la altura de los árboles y palmeras, y al ángulo de visión diferente con el que se adquirieron las imágenes. Estos desplazamientos son incorregibles en una imagen, ya que son proporcionales a la altura de los elementos en cuestión (una palmera de 12 m estará más desplazada que un árbol de 3 m), por lo que se hace necesario comprobar de forma individual y ajustar, en su caso, cada uno de los registros de campo.

Una vez corregidos todos los polígonos y adaptados a la imagen que se iba a analizar, se obtuvo un conjunto que contiene un total de 513. Cada polígono fue comprobado con los datos de campo y la fotografía asociada a ellos.

Además de los polígonos obtenidos durante el trabajo de campo, el conjunto anterior contiene otros obtenidos por interpretación visual, sobre todo de usos no agrícolas, como caminos, agua o terreno no productivo. Con respecto a las

5. Cartographie des palmiers à partir des images satellite

L'information recueillie dans les campagnes expérimentales est une base pour la production de cartographie à partir des images satellite. Ensuite, nous décrivons la procédure suivie.

5.1. Création des ensembles d'entraînement et de validation

Les points et polygones que nous avons enregistrés dans le travail de terrain montraient dans quelques cas un certain déplacement ou quelques problèmes de géoréférencement. La cause principale est la complexité et problématique des conditions pour la prise des mesures comme résultat du type de terrain, d'insolation et de la structure de la palmeraie, ce qui a interdit de dessiner des contours parfaits. D'une autre part, lorsqu'on utilise des images de référence dans les dispositifs portables qui diffèrent de celles qui seront analysées pour la génération de la cartographie, plusieurs déplacements se produisent à cause de l'hauteur des arbres et palmiers et l'angle différent d'observation dont les images ont été capturées. Ces déplacements ne peuvent pas être corrigés, car ils ne sont pas constants mais proportionnels à l'hauteur des objets (un palmier de 12 m sera déplacée plus loin qu'un arbre de 3 m), et cela rend nécessaire de vérifier individuellement et corriger, s'il le faut, chacun de points d'entraînement sur l'image définitive.

Une fois tous les polygones ont été corrigés et adaptés à l'image qui servira à mapper la zone d'étude, à l'aide de vérifications des photographies et des descriptions enregistrées sur le terrain, nous avons obtenu un ensemble de 513 données avec un niveau de fiabilité supérieur à 95%.

Outre ces polygones obtenus dans les campagnes de mesure, l'ensemble cité contient aussi d'autres éléments acquis par interprétation visuelle, spécialement

muestras de palmeras, se registró además su estado sanitario, basado en las anotaciones y las fotografías. También se calculó la superficie de cada recinto trazado y el número de píxeles teórico que caben dentro de cada uno, con la idea de desechar aquellos polígonos que, debido a su tamaño, contenían muy pocos píxeles.

El conjunto obtenido se dividió en dos grupos: un tercio de los polígonos fueron seleccionados como muestras de entrenamiento y el resto, dos tercios, como muestras de validación de resultados. Esta selección se hizo de forma completamente aleatoria (Figura 19).



Figura 19. Detalle de los conjuntos de entrenamiento (amarillo) y de validación (azul), seleccionados aleatoriamente

5.2. Clasificación

Un proceso de clasificación digital de una imagen de satélite consiste en la categorización de forma automática de todos los píxeles u objetos que forman esa imagen, normalmente en base a sus características espectrales. Esta respuesta espectral es, *a priori*, característica de cada elemento de la superficie terrestre y por lo tanto puede ser empleada para

des couvertures non agricoles, comme des chemins, de l'eau ou du terrain non productif. En ce qui concerne aux échantillons des palmiers, on a enregistré leur état sanitaire aussi, sur la base des notations et photographies disponibles. Ainsi, la superficie de chaque contour et le nombre de pixels qu'il contient ont été calculés, afin d'écartez les polygones avec très peu de pixels à cause de leur taille réduite.

L'ensemble obtenu se divisait en deux groupes : un tiers des polygones ont été choisis pour l'entraînement, alors que les autres deux tiers ont été réservés comme échantillons pour la validation des résultats. Cette sélection a été complètement aléatoire (Figure 19).

Figura 19. Détail des ensembles d'entraînement (jaune) et validation (bleu), choisis de manière aléatoire

5.2. Classification

La procédure de classification digitale d'une image satellite consiste à catégoriser tous les pixels ou objets qui font partie de l'image, de manière automatique, et normalement en fonction de leurs propriétés spectrales. Cette réponse spectrale, *a priori*, est caractéristique de chaque élément de la surface terrestre et peut, donc, être utilisée pour essayer de

tratar de distinguir, en este caso particular, las palmeras del resto de usos del suelo circundantes y poder realizar así un cartografiado de las mismas.

El método de clasificación seleccionado en este trabajo se basa en un análisis orientado a objetos (Blaschke, T., 2010) aplicado a la imagen fusionada. La decisión para seguir esta metodología se basa en la experiencia previa y en trabajos similares (Myint et al., 2006; Chubey et al., 2006; Yu et al., 2011; Aniruddha y Joshi, 2014; Johansen et al., 2010), en los que se ha elegido este procedimiento para clasificar imágenes que presentan una alta heterogeneidad y un gran nivel de detalle, como es el caso de las imágenes de WV-2 usadas en este estudio.

Cuando se realiza una clasificación basada en objetos, se comienza con una segmentación, que consiste en la agrupación de los píxeles de la imagen en objetos que vienen definidos por unos parámetros de compacidad y heterogeneidad. Estos parámetros determinan básicamente el tamaño y la forma de los objetos. La obtención de una segmentación ideal es un proceso de prueba y error en el que se varían estos parámetros y se analizan los resultados obtenidos iterativamente.

Como el fin de este trabajo era la identificación de palmeras, se optó por la realización de una segmentación fina, o de objetos pequeños y relativamente compactos, en la que cada palmera quedaría definida en el caso ideal por 2 ó 3 objetos.

La razón de esta segmentación, que normalmente produce más de un objeto por palmera o grupo de ellas, es que la superficie de la copa, como puede verse en la Figura 20, no es homogénea. En una imagen WV-2 se observa normalmente una parte más iluminada, orientada al sur, un centro más oscuro, debido a las sombras que predominan en la parte central de la palmera y a su mayor cobertura

distinguer, dans ce cas particulier, les palmiers par rapport au reste de couvertures afin de faire possible leur cartographie.

La méthode de classification choisie dans ce travail est basée sur une analyse orientée objet (Blaschke, 2010) que nous avons appliqué à l'image fusionnée. La décision de suivre cette méthodologie se base sur des expériences précédentes et des travaux similaires (Myint et al., 2006; Chubey et al., 2006; Yu et al., 2011; Aniruddha y Joshi, 2014; Johansen et al., 2010), où le choix de cette procédure de classification des images répond à une grande hétérogénéité et haut niveau de détail, comme c'est le cas des images WV-2 utilisées dans cette étude.

Dans la classification orientée objet, on commence avec une segmentation de l'image, qui consiste à grouper les pixels de l'image dans des objets bien définis par des paramètres de compacité et hétérogénéité. Ces paramètres déterminent fondamentalement la taille et la forme des objets. L'obtention d'une segmentation idéale est un processus d'assai et erreur où on modifie les paramètres en analysant les résultats itérativement.

Étant donné que le but de ce travail était l'identification des palmiers, nous avons choisi une segmentation fine, ou d'objets petits et relativement compacts, où chaque palmier soit représenté par 2 ou 3 objets, au mieux.

La raison de ce type de segmentation, laquelle habituellement produit plus d'un objet par palmier ou groupe de palmiers, est le fait que la surface de la couronne n'est pas homogène, comme on peut remarquer dans la Figure 20. Normalement, sur une image WV-2, on observe une partie de la couronne qui est plus éclairée et orientée vers le sud, une partie centrale un peu plus foncée à cause des ombres majoritaires et à une couverture foliaire plus épaisse, et une troisième partie éclairée encore une fois, mais orientée



Figura 20. Detalle de la segmentación de dos copas de palmera

vegetal, y de nuevo una parte más iluminada hacia el norte, aunque reflejando menos energía que en el lado sur. Este patrón se manifiesta en los casos ideales de ejemplares de gran porte y bien diferenciados. Cuando la copa de la palmera no es muy densa, o hay varios ejemplares entremezclados, este patrón no es tan sencillo de ver o queda difuminado.

Cada uno de los objetos en que es segmentada la imagen posee características propias dependiendo de los píxeles que contiene. En base a estos, se generaron, aparte de las reflectancias promedio de cada objeto, diferentes índices espectrales de vegetación y parámetros que definen la textura basados en la desviación estándar de las bandas 2 (azul), 5 (rojo) y 8 (NIR 2).

Una vez definida la segmentación pasamos a la fase de entrenamiento. Aquí se seleccionan uno a uno los objetos y se les asigna la clase correspondiente. Se definieron inicialmente 22 tipos de objetos (clases): abedul, alfalfa, almendro, árbol no definido, caña, calabaza, cultivo, erial, granado, higuera, manzano, millo, naranjo, olivo, palmera con afección baja, palmera con afección media, palmera con afección alta, río, terreno arable, tamarix, vías y viña.



Figure 20. Détail de la segmentation de deux couronnes de palmier

vers le nord et qui reflète moins quantité d'énergie que celle du côté sud. Ce comportement se manifeste dans les cas idéaux d'exemplaires bien apparents et différenciés. Dans le cas où la couronne n'est pas trop dense ou il y a plusieurs individus mêlés entre eux, ce comportement n'est pas si facile à reconnaître ou reste flou.

Chacun des objets de l'image segmentée présente des caractéristiques propres en fonction des pixels qui en font partie. C'est à partir de ces pixels qu'on calcule la moyenne de la réflectance, des indices spectraux de la végétation et des paramètres qui décrivent la texture basés sur l'écart type des bandes 2 (bleu), 5 (rouge) et 8 (NIR-2).

Après avoir déterminé la segmentation, nous avons réalisé la phase d'entraînement. Nous avons sélectionné les objets, un par un, et nous leur avons attribué une d'entre 22 catégories initiales de types d'objets (classes) : bouleau, luzerne, grenadier, figuier, pommier, maïs, orange, olivier, palmier avec trois degrés de sévérité d'une maladie (faible, modéré et haut), rivière, terre arable, tamaris, voies et vigne.

Pour la réalisation de ce processus, nous avons utilisé un indice de séparabilité

Durante este proceso se usó un índice de separabilidad (Nussbaum et al. 2006; Marpu et al. 2006) para identificar diferentes subclases y agrupar clases que presentan características tan similares que no pueden ser diferenciadas en la práctica. También se empleó la representación gráfica de los valores medios de los objetos y su desviación estándar para cada una de las bandas espectrales (Figura 21). Esta representación, a modo de firmapectral, permite analizar qué bandas son más convenientes para diferenciar unas clases de otras, o si existe una diferencia real y analizable entre distintas clases.

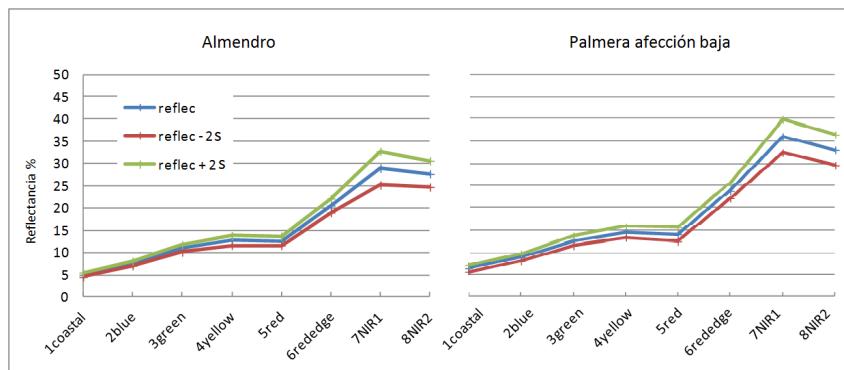


Figura 21. Ejemplos de firmas spectrales medias de objetos que representan almendros y palmera con afección baja

Una vez definidas las muestras de entrenamiento para cada clase se lanza el proceso de clasificación, en el que cada objeto es asignado a la clase que más se le asemeja. El método empleado fue el de la máxima probabilidad (Maximum Likelihood), ampliamente usado en trabajos de teledetección.

El resultado final es un mosaico de objetos, cada uno de los cuales pertenece a una de las clases definidas en el proceso de entrenamiento (Figura 22).

(Nussbaum et al. 2006; Marpu et al. 2006), afin d'identifier les différentes sous-classes et de grouper les classes qui montrent des propriétés si similaires qu'elles ne peuvent pas être séparées en pratique. Nous avons aussi employé la représentation graphique des valeurs moyennes des objets et de leur écart type pour chacune des bandes spectrales (Figure 21). Cette représentation, sous la forme d'une signature spectrale, nous permet d'analyser la convenance des différentes bandes pour distinguer et séparer chaque classe, ainsi que l'existence réelle et observable entre ces classes.

Figure 21. Exemples de signatures spectrales moyennes des objets qui représentent les amandiers et les palmiers avec un degré faible de pathologie

Une fois que les échantillons d'entraînement ont été déterminés pour chaque classe, on a lancé le programme de classification, où chaque objet est attribué à la classe la plus similaire. La méthode employée fût la probabilité maximale (Maximum Likelihood), très utilisée parmi les études de télédétection.

Le résultat final est une mosaïque d'objets, chacun d'eux appartenant à une des classes prédéfinies dans la phase d'entraînement (Figure 22).

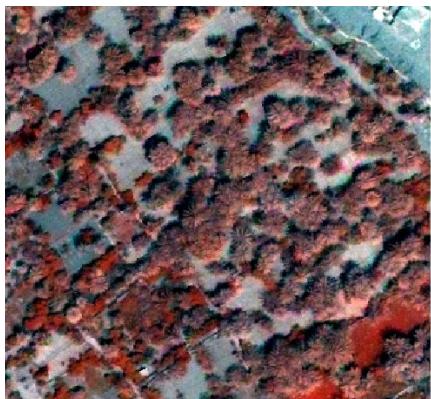


Figura 22. Imagen WV-2 en falso color (izda) y clasificación (dcha.) Los objetos verdes representan palmeras

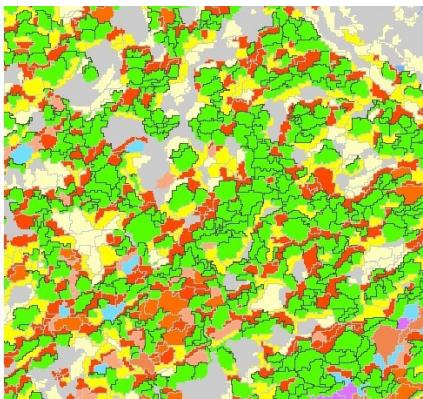


Figure 22. Image en fausse couleur (à gauche) et classification (à droite). Objets verts représentent palmiers

Cabe comentar que el proceso de clasificación suele ser iterativo. El análisis de los resultados, tanto de forma visual como por medio de una matriz de errores, puede producir una sobre-clasificación de una determinada clase en detrimento de otra, o viceversa. Esto nos permite tomar medidas al respecto en la fase de entrenamiento (añadiendo o eliminando muestras de las clases problemáticas) para ir, poco a poco, mejorando los resultados de la clasificación.

5.3. Análisis de resultados

A efectos prácticos, para realizar el cartografiado de las palmeras, solamente se necesita estudiar la separabilidad de la palmera del resto de las clases. Por esa razón, y para simplificar el análisis de los resultados se optó por reagrupar las 22 clases iniciales en 4 grandes grupos: Palmeras, Árboles, Cultivos (incluyendo terreno arable) y Zonas no productivas. En el caso del análisis de la posible diferenciación entre palmeras sanas y enfermas se usaron los tres tipos de palmera determinados en el estudio: palmeras afectación baja (PB), media (PM) y alta (PA).

Il faut signaler que le processus de classification est souvent itératif. L'analyse des résultats, visuellement comme sur une matrice d'erreur, peut montrer une sur-classification d'une classe par rapport à une autre, et vice versa. Cela nous permet de prendre des mesures à cet effet dans la phase d'entraînement (en ajoutant ou supprimant les échantillons des classes les plus problématiques), de façon à améliorer, peu à peu, les résultats de la classification.

5.3. Évaluation des résultats

Afin d'élaborer la cartographie des palmiers on n'a besoin, en pratique, que d'une étude de séparabilité du palmier par rapport aux autres classes. C'est pour cette raison, et pour simplifier l'analyse des résultats, que nous avons regroupé les 22 classes initiales en quatre grands groupes: Palmiers, Arbres, Cultures (y compris terre arable) et Zones Non Productives. Dans le cas de l'étude sur la possibilité d'une différentiation entre les palmiers sains et ceux qui sont malades, nous avons considéré les trois types de palmier déterminés sur le terrain: palmiers avec un degré faible de pathologie (PB), modéré (PM) et haut (PA).

Los mapas obtenidos se compararon con el conjunto de validación para obtener de esta forma el nivel de exactitud de la clasificación obtenida. Los polígonos de la Figura 23 representan palmeras del conjunto de validación que se han cruzado con la imagen clasificada. Por medio de este cruce, es posible analizar la superficie que se encuentra bien clasificada y evaluar así el porcentaje de acierto y error para cada clase.

La matriz de confusión de la Tabla 4 muestra los resultados del cruce de los polígonos de validación con la imagen. La diagonal principal hace referencia a las zonas bien clasificadas mientras que el resto de valores se refieren a aquellas mal clasificadas. De esta matriz se puede deducir no sólo el porcentaje de acierto y el error total, sino también el individual para cada una de las clases analizadas y determinar qué clases se han confundido entre sí y en qué grado.

Les images classifiées obtenues dans ce processus ont été comparées avec l'ensemble de validation, afin de déterminer le niveau d'exactitude de la classification résultante. Les polygones de la Figure 23 représentent des palmiers de l'ensemble de validation qui se combinent avec l'image classifiée, ce qui rend possible l'analyse de la superficie qui s'est classifiée correctement et l'évaluation du pourcentage d'erreur et de réussite pour chaque classe.

La matrice de confusion du Tableau 4 montre les résultats des polygones de validation analysés contre l'image. La diagonale principale fait référence aux zones bien classifiées, alors que les autres valeurs représentent les zones mal classifiées. Dans cette matrice nous pouvons déduire, non seulement les pourcentages de réussite et d'erreur totales, mais aussi les pourcentages individuels pour chacune des classes analysées, ainsi que déterminer quelles sont les classes qui se sont confondues entre elles et en quel degré.

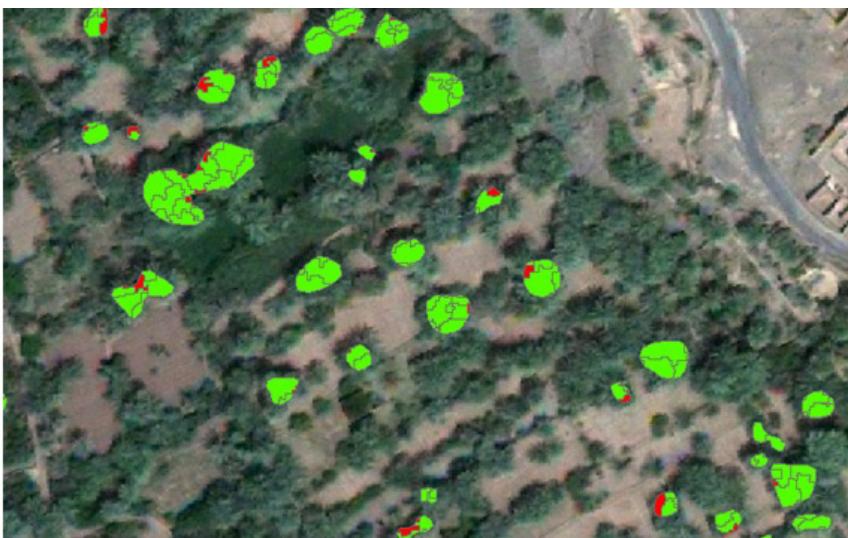


Figura 23. Palmeras del conjunto de validación cruzado con la imagen clasificada. En verde, muestras de palmera clasificadas correctamente. En rojo, errores de clasificación

Figure 23. Palmiers de l'ensemble de validation combinés avec l'image classifiée. En vert, les échantillons de palmiers classifiés correctement. En rouge, les erreurs de classification

También se calculó la exactitud a nivel de productor y a nivel de usuario (Tabla 5). La exactitud desde el punto de vista del productor (producer's accuracy) se refiere a la probabilidad de que un determinado uso del suelo (p.ej. árboles presentes en la zona de estudio) haya sido clasificado como tal. Mientras que la exactitud desde el punto de vista del usuario (user's accuracy) es la probabilidad de que un objeto en la imagen clasificada pertenezca en realidad a la clase que representa.

Tabla 4. Matriz de confusión de la imagen clasificada.

	árbol arbres	palmera palmier	cultivo cultures	no cultivo no cultures	total total
árbol arbres	347	456	267	0	1070
palmera palmier	345	6959	626	0	7930
cultivo cultures	733	452	4935	0	6120
no cultivo no cultures	0	7	1336	2439	3782
total clasificado	1425	7874	7164	2439	18902

Tabla 5. Exactitud de resultados de la imagen clasificada.

En outre, nous avons calculé l'exactitude au niveau du producteur (*producer's accuracy*) et au niveau de l'utilisateur (*user's accuracy*) (Tableau 5). L'exactitude du point de vue du producteur fait référence à la probabilité pour un type de couverture donnée d'être bien classifiée. Par contre, l'exactitude du point de vue de l'utilisateur est la probabilité pour un objet sur l'image classifiée d'appartenir en réalité à la classe qu'il représente.

Tableau 4. Matrice de confusion de l'image classifiée.

Tableau 5. Exactitude des résultats de l'image classifiée.

	Usuario - Utilisateur	Productor - Producteur
Palmera Palmiers	88,4%	87,8%
Árbol Arbres	24,4%	32,4%
Cultivo Cultures	84,7%	80,6%

Analizando los resultados de la matriz, observamos que la clase Palmera ha sido clasificada con casi un 90% de exac-

Les résultats de la matrice nous indiquent que la classe Palmiers a été classifiée avec presque un 90% d'exactitude, tant

titud, tanto desde el punto de vista del productor como del usuario. El 12,2 % de palmeras que se han dejado de clasificar, se han confundido con cultivos y en menor medida con otros árboles, mientras que el 11,6 % clasificado de forma errónea como palmera, corresponde en proporción similar a árboles y zonas de cultivo.

Los cultivos y el terreno arable (clase cultivo), se han clasificado también de forma satisfactoria, con resultados algo peores a la clase palmera, pero por encima del 80%. Por otra parte, la clase árbol ha sido clasificada de forma deficiente ya que casi la mitad de la superficie de validación (42,6%) ha sido clasificada como palmera, y una gran parte como cultivo. Sólo un 24,4% de la superficie clasificada como árbol pertenece efectivamente a esa clase. Sin embargo, la superficie cubierta por árboles es relativamente baja, por lo que este hecho no afecta significativamente a la exactitud de la clasificación de las palmeras.

Otra forma de evaluar la exactitud de la clasificación consiste en el cálculo del desacuerdo por cantidad y del desacuerdo por localización para el conjunto de validación seleccionado (Pontius y Millones, 2011). La figura 24 ilustra estos errores para las clases consideradas. Cabe destacar que para la clase de mayor interés en este estudio, Palmera, el error que se comete en el proceso de clasificación por cantidad, apenas alcanza un 1%. Producíendose un 10% de desacuerdo por localización.

A pesar los errores comentados, el resultado global se puede considerar satisfactorio, permitiéndonos extrapolar los resultados al resto de la imagen y estimar la localización y el número de palmeras de la zona de estudio.

Se contabilizaron exactamente 1.320.841 m² de superficie ocupada por la clase Palmera. El diámetro medio de las pal-

du point de vue du producteur que celui de l'utilisateur. Le 12,2% des palmiers qui n'ont pas été classifiés, ont été confondus avec de cultures et, dans une moindre mesure, avec des arbres, alors que l'11,6% mal classifié comme palmier est également distribué entre Arbres et Cultures.

Les cultures et la terre arable (classe Cultures), ont été classifiées avec des résultats satisfaisants, bien que légèrement moins bons que pour les palmiers, toujours au-dessus du 80%. D'un autre côté, la classification de la catégorie Arbres a été déficiente, puisque presque la moitié de la superficie de validation (42,6%) a été attribuée à la classe Palmiers, et une autre partie importante à la classe Cultures. Seulement un 24,4% de la superficie classifiée comme Arbres appartient effectivement à cette classe. Pourtant, la superficie recouverte d'arbres est relativement réduite et, par conséquent, cela n'affecte pas l'exactitude de la classification des palmiers de manière significative.

Une autre façon d'évaluer l'exactitude de la classification consiste à calculer le désaccord par quantité et le désaccord par localisation pour l'ensemble de validation sélectionné (Pontius et Millones, 2011). Dans la Figure 24 on présente ces erreurs pour les classes considérées. Il convient de remarquer que l'erreur commise par quantité dans le processus de classification est à peine un 1% pour la classe de notre intérêt pour cette étude, Palmiers, alors que l'erreur produite par localisation est le 10%.

Malgré les erreurs expliquées, le résultat global peut être considéré satisfaisant, en nous permettant d'extrapoler les résultats à la totalité de l'image est d'estimer la localisation et la quantité de palmiers dans la zone d'étude.

Nous avons comptabilisé 1 320 841 m² de superficie occupée par la classe Palmiers. Le diamètre moyen des palmiers enregistrés pendant les campagnes expé-

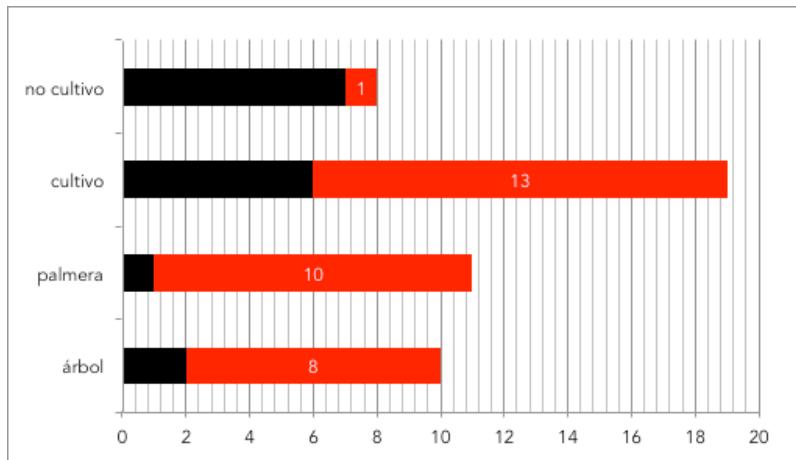


Figura 24. Errores por cantidad (negro) y por localización (rojo)

meras registradas durante las campañas experimentales, teniendo en cuenta todo tipo de ejemplares, es de 7 metros. Con estos datos se deduce que el número aproximado de palmeras en toda la zona de estudio es de unas 34.000.

Se procedió también a analizar la posible diferenciación de palmeras afectadas en diferente grado por plagas o enfermedades, a partir de la clasificación obtenida. Se calculó la matriz de errores que se presenta en la Tabla 6. Observamos cierta confusión entre los tres grados de afección en palmera. La exactitud de los resultados en palmeras con afección alta y baja (Tabla 7), no llega en ningún caso a estar por encima del 50%. La clase PM, palmera con afección media, presenta mejores resultados con un 65,3 % de exactitud de usuario y un 45,0 % desde el punto de vista del productor. En parte, esto podría ser debido a que el número de muestras de esta clase triplica en superficie a las otras dos, sin embargo, estos números reflejan la proporción real encontrada en las campañas experimentales.

Figure 24. Erreurs par quantité (noir) et par localisation (rouge)

rimentales, en considérant tous les types d'exemplaires, est 7 m. Avec ces données on déduit que le nombre approximatif de palmiers dans toute la zone d'étude est d'environ 34 000.

Nous avons procédé aussi à l'analyse de la différenciation potentielle des palmiers touchés par des maladies ou des ravageurs à des degrés divers, d'après la classification obtenue. À cet effet, nous avons calculé la matrice d'erreur qu'on présente au Tableau 6. On peut observer une certaine confusion entre les trois états phytosanitaires des palmiers. L'exactitude des résultats dans les palmiers avec des degrés haut et faible de sévérité des maladies n'arrive jamais au-dessus de 50% (Tableau 7). La classe PM (palmiers avec une sévérité modérée des maladies) montrent des meilleurs résultats avec le 63% d'exactitude de l'utilisateur et le 45,6% d'exactitude du producteur. Cela pourrait être à cause, en partie, d'un nombre d'échantillons de cette classe qui est trois fois plus grand que dans les autres deux classes. Cependant, ces données reflètent la proportion réelle trouvée dans les campagnes expérimentales.

Tabla 6. Matriz de confusión para evaluar la detección de síntomas

	PA	PM	PB	Total test
PA	501	373	280	1154
PM	1163	1701	915	3779
PB	523	532	244	1299
Total clasif	2187	2606	1439	

PA: Afección alta; PM: Afección media; PB: Afección baja

Tableau 6. Matrice de confusion pour évaluer la détection des symptômes

PA: Sévérité haute de la maladie; PM: Sévérité modérée ; PB: Sévérité faible

Tabla 7. Exactitud de resultados de la clase Palmera según grado de afección.

	Usuario	Productor
PA	22,9 %	43,4 %
PM	65,3 %	45,0 %
PB	17,0 %	18,8 %

En estos resultados ha podido influir la dificultad que entraña catalogar, mediante el trabajo de campo, un índice de afección en las palmeras que sea totalmente objetivo. Por una parte, los datos han sido registrados por distintos operarios, con la posible diferencia de criterios de cada uno; y por otro, el análisis del estado de las palmeras se hizo con observación a nivel del suelo (Figura 25). El aspecto de la palmera vista desde arriba (punto de vista del satélite) puede ser muy distinto al que tiene visto desde el suelo, con lo que la información recogida en campo puede presentar discrepancias. Esta información, usada durante la fase de entrenamiento, puede por lo tanto contribuir a la confusión entre las subclases de Palmera.

En cualquier caso, los trabajos de análisis de separabilidad espectral entre palmeras sanas y enfermas, realizados

Tableau 7. Exactitude des résultats de la classe Palmiers selon leur degré de sévérité des maladies.

Ces résultats ont pu être influencés par la difficulté qui accompagne le processus d'identification sur le terrain d'un indice de sévérité des maladies des palmiers d'une façon totalement objective. D'un côté, les données ont été collectées par des différents opérateurs, ce qui entraîne une possible différence des critères entre eux ; et, d'un autre côté, les observations pour l'analyse de l'état phytosanitaire des palmiers a été réalisé au niveau du sol (Figure 25). L'état du palmier observé au-dessus de la couronne (point de vue du satellite) peut être, en fait, très différent de ce qu'on aperçoit dans une vue de dessous, et l'information collectée sur le terrain peut, donc, avoir une divergence avec celle qu'on reçoit du satellite. Par conséquent, cette information utilisée dans la phase d'entraînement peut contribuer à la confusion entre les sous-classes de palmier.



Figura 25: Observación de síntomas en palmeras a nivel de suelo

en paralelo durante este proyecto y que serán presentados a continuación, podrían ayudar a introducir nuevos índices o parámetros en el proceso de clasificación que mejoren los resultados.

Figure 25. Observation des symptômes des palmiers au niveau du sol

En tout cas, les travaux d'analyse de la séparabilité spectrale entre les palmiers sains et les palmiers touchés, qui ont été effectués parallèlement dans ce projet et seront présentés ci-dessous, pourraient aider à introduire de nouveaux indices ou paramètres dans le processus de classification qui améliorent les résultats.

6. Detección de estado fitosanitario mediante medidas espectrales

Uno de los objetivos principales del Proyecto Palmera consistía en estudiar la posibilidad de detectar síntomas de enfermedades de las palmeras por medio de medidas espectrales desde satélite o *in situ*. En el Oasis de Mezguita, las dos enfermedades de mayor interés fitosanitario son la cochinilla blanca (*Parlatoria blanchardi* Targ.), un insecto homóptero de la familia Diaspididae y el Bayud (*Fusarium oxysporum* f. sp. *albedinis* Foa), un hongo patógeno específico de esta palmera a la que infecta desde las raíces.

Un análisis preliminar realizado con las imágenes multiespectrales del sensor espacial seleccionado para este estudio, el WorldView-2, con una resolución espacial de 2 m, demuestra la heterogeneidad existente a nivel sub-pixel. Esto es consecuencia de la gran variabilidad espectral que presentan las palmeras en función de su estado fitosanitario y también fenológico. Las hojas, que suelen medir entre 1 y 2 m de largo, y hasta medio metro de ancho aproximadamente, están dispuestas en anillos concéntricos, aumentando en edad de dentro hacia fuera y por tanto cambiando su respuesta espectral. Además de la madurez de las hojas, el ángulo de inclinación de las mismas cambia gradualmente, apuntando hacia arriba las más jóvenes y centrales, y hacia abajo las más viejas y externas que normalmente quedan ocultas parcialmente por las hojas medias que se disponen horizontalmente.

Con este estudio se pretende contribuir a la caracterización espectral de la palmera datilera. A partir de medidas obtenidas mediante espectro-radiometría de campo, podríamos derivar las bandas espectrales del WorldView-2 que mejor diferencian las frondes sanas de las afectadas en diferente grado por cochinilla

6. Détection de l'état phytosanitaire par des mesures spectrales

Un des objectifs principaux du Projet PALMERA consistait à étudier la possibilité de détecter des symptômes des maladies des palmiers à l'aide de mesures spectrales satellites ou *in situ*. Cette étude a pour but de contribuer à la caractérisation spectrale du palmier dattier. Dans l'Oasis de Mezguita, les deux maladies présentant le plus d'intérêt phytosanitaire sont *Parlatoria blanchardi* (Targ.) o cochenille blanche (un insecte homoptère de la famille Diaspididae) et *Fusarium oxysporum* f. sp. *albedinis* (Foa) ou Bayoud (champignon pathogène spécifique de ce palmier, auquel cause l'infection des racines et puis de toute la plante).

Une analyse préliminaire réalisée avec les images multispectrales du capteur spatial de 2 m de résolution montre une hétérogénéité considérable au niveau de sous-pixel. Cela est la conséquence d'une grande variabilité des palmiers en fonction de leur état phytosanitaire et de leur phase phénologique. Les feuilles font environ 2 m de long et 0,5 m de large, et elles sont disposées dans des anneaux concentriques, en augmentant vers l'extérieur avec l'âge et en changeant, donc, leur réponse spectrale. En plus de la maturité des feuilles, leur angle d'inclinaison change aussi graduellement, étant plus dirigées vers le ciel dans le cas des plus jeunes et centrales, et vers le sol dans le cas des plus vieilles et extérieures, qui habituellement restent partiellement cachées sous les feuilles moyennes et plus horizontales.

À partir des spectres mesurés par le spectromètre de terrain, on peut dériver les bandes spectrales de WorldView-2 qui sont les meilleures pour distinguer les feuilles saines des feuilles touchées par la cochenille blanche ou le bayoud à des degrés différents. Ces mesures, d'ailleurs, nous permettront d'améliorer les

blanca y por Bayoud. Estas medidas, a su vez, nos permitirían mejorar los métodos de cartografiado y seguimiento fitosanitario con las imágenes de satélite.

Se analizaron las firmas espetrales obtenidas en hojas de palmera durante las campañas de espectro-radiometría y validación de imágenes WorldView-2 que tuvieron lugar en el palmeral objeto de estudio. Las frondes fueron cortadas desde su base a la altura media de la copa, ya que es donde ocupan una mayor superficie y donde muestran una disposición más horizontal. Se cortaron dos frondes de cada uno de los ejemplares seleccionados. Aquí presentamos los resultados de nueve ejemplares muestreados en la campaña de marzo de 2013: dos palmeras sanas, dos afectadas por Bayoud y cinco con cochinilla blanca en diferentes grados.

Para la toma de medidas espetrales se utilizó el espectro-radiómetro ASD descrito. La óptica empleada fue de 10°. Todas las firmas espetrales se adquirieron en modo de reflectancia absoluta desde 1 m de altura – lo que abarca aproximadamente un área de 20 cm de diámetro – y sobre un fondo de PVC negro. Las medidas se hicieron en movimiento, a modo de transecto, desplazando el sensor a una velocidad constante sobre el haz de la hoja hasta recorrer la longitud total, y repitiendo el proceso tres veces: una para cada lateral y otra para el raquis de la hoja. Las hojas se dispusieron sobre una lámina de PVC negro extendida horizontalmente sobre el suelo, y se midieron una sobre la otra, agrupando las hojas provenientes de la misma palmera para reproducir mejor la dispersión de la luz y la radiación de la hoja en el interior de la copa. En frondes muy heterogéneas se hicieron dos réplicas de cada medida. Siendo cada medida espectral el promedio de 100 muestreos del sensor con un tiempo de barrido de 0.1 s. El tiempo necesario para

métodes de cartographie et de surveillance phytosanitaire à partir des images satellite.

Nous avons analysé les signatures spectrales obtenues sur des feuilles de palmier pendant les campagnes de spectrométrie et de validation des images WV-2 qui se sont déroulées dans la palmeraie étudiée. Les feuilles ont été coupées à leur base et à une hauteur moyenne de la couronne, étant donné que c'est là où les feuilles occupent plus de superficie et, en même temps, présentent une disposition près de l'horizontale. Nous avons coupé deux échantillons de chacun des exemplaires sélectionnés. Nous présentons ci-dessous les résultats obtenus pendant la campagne de mars 2013.

La prise des mesures a été effectuée à l'aide du spectromètre ASD décrit dans le chapitre 4, avec un dispositif optique qui offre un iFOV de 10°. Toutes les mesures spectrales ont été acquises en mode de réflectance absolue à une hauteur d'environ 1 m, ce qui couvre une superficie de 20 cm de diamètre, approximativement. Les feuilles étaient disposées sur une couche de PVC noir étendue horizontalement sur le sol, et nous les avons mesurées deux à deux, en groupant les échantillons provenant du même palmier, pour mieux reproduire la dispersion de la lumière et du rayonnement infrarouge dans le feuillage. La méthode d'échantillonage était le transept le long de la nervure principale sur la face supérieure des feuilles, à une vitesse constante, dès la base jusqu'à la pointe, et en répétant la procédure trois fois : une pour chaque latérale et une autre centrale. Dans le cas des feuilles très hétérogènes, nous avons fait des doubles échantillons. En tous cas, chaque mesure spectrale était la moyenne de 100 échantillons du capteur dans un temps de balayage de ~0.1 s. Le temps nécessaire pour mesurer une feuille sur toute sa longueur était, donc, de quelque 10 s.

cubrir esa longitud en cada transecto fue de 10 s aproximadamente.

La separabilidad espectral de las muestras se estudió al nivel de resolución espectral del sensor WorldView-2. Por lo que hubo que realizar el oportuno cambio de resolución espectral de las firmas medidas con el ASD a partir de las funciones de respuesta del sensor WV-2 (Figura 9).

La medida utilizada en este estudio fue la distancia Bhattacharyya (B):

donde $B_{1,2}$ es la distancia entre las clases 1 y 2 en las bandas espectrales observadas, μ_1 y μ_2 son los vectores que contienen las medias para cada banda espectral y Σ_1 y Σ_2 las matrices de covariancia. Se puede encontrar más información sobre esta técnica en Langrebe, 2000.

$$B_{1,2} = \frac{1}{8} [\mu_1 - \mu_2]^T \sum \left[\frac{\Sigma_1 + \Sigma_2}{2} \right]^{-1} [\mu_1 - \mu_2] + \frac{1}{2} \ln \frac{\left| \frac{1}{2} [\Sigma_1 + \Sigma_2] \right|}{\sqrt{|\Sigma_1| + |\Sigma_2|}}$$

La separabilidad relativa de cada banda espectral para cada hoja se usó como criterio de agrupamiento de muestras (clases) según tres niveles de afectación por cochinilla blanca. A continuación, se obtuvo la distancia B , entre las frondes verdes y las frondes con Bayoud, los tres grados de afectación por cochinilla y las frondes secas, en todas las combinaciones de 2, 3, 4 y 5 bandas del WorldView-2.

6.1. Resultados

Las firmas espirituales medidas con presencia de cochinilla blanca muestran un descenso de la reflectancia en el infrarrojo cercano y un aumento en el visible con respecto a las hojas sanas. Al nivel de resolución del WorldView-2, la reflectancia en el amarillo llega a igualarse o superar a la del verde, según aumenta el grado de afectación por cochinilla, mientras los componentes de longitudes de onda más corta del azul y el rojo también aumentan.

La separabilidad espectral de las hojas a sido estudiada al nivel de resolución espectral del capteur WV-2, c'est-à-dire que le premier traitement des données a consisté à simuler la résolution espectral des signatures mesurées par l'ASD, à l'aide des fonctions de réponse espectral de WV-2 (Figure 9).

Dans ce travail nous avons employé la distance Bhattacharyya (B) :

où $B_{1,2}$ est la distance entre les classes 1 et 2 dans les bandes spectrales observées, μ_1 et μ_2 sont les vecteurs qui contiennent les moyennes de chaque bande espectral, et Σ_1 et Σ_2 sont les matrices de covariance. Des informations plus détaillées peuvent être trouvées sur Langrebe (2000).

$$B_{1,2} = \frac{1}{8} [\mu_1 - \mu_2]^T \sum \left[\frac{\Sigma_1 + \Sigma_2}{2} \right]^{-1} [\mu_1 - \mu_2] + \frac{1}{2} \ln \frac{\left| \frac{1}{2} [\Sigma_1 + \Sigma_2] \right|}{\sqrt{|\Sigma_1| + |\Sigma_2|}}$$

La separabilité relative de chaque bande espectral pour chaque feuille, nous avons appliqué le même critère de regroupement des échantillons qui a été décrit dans la méthodologie pour la classification des images, en fonction des trois degrés de sévérité des maladies. Ensuite, nous avons calculé la distance B entre les feuilles vertes et les feuilles touchées par le bayoud ou la cochenille blanche, ainsi que les feuilles sèches, dans toutes les combinaisons de 2, 3, 4 et 5 bandes de WV-2.

6.1. Résultats

Les signatures spectrales mesurées sur des feuilles avec la cochenille blanche montrent une réflectance réduite dans l'infrarouge prochain et un augment dans le visible, par rapport aux feuilles saines. Au niveau de résolution de WV-2, la réflectance dans le jaune arrive à celle du vert, même la dépasse, à mesure que croît le degré de sévérité de la cochenille blanche, alors que le rouge, ainsi que les

Aunque no existen bandas espectrales del WV-2 en la región espectral del infrarrojo de onda corta (SWIR) que medimos en campo con el ASD, resulta interesante tener en cuenta y analizar estos valores porque está previsto que durante 2014

bandes avec les longueurs d'onde les plus courtes, augmentent aussi.

Bien qu'il n'existe pas de canaux spectraux du WV-2 dans la région de l'infrarouge d'onde courte (SWIR) que nous avons mesuré sur le terrain avec l'ASD,

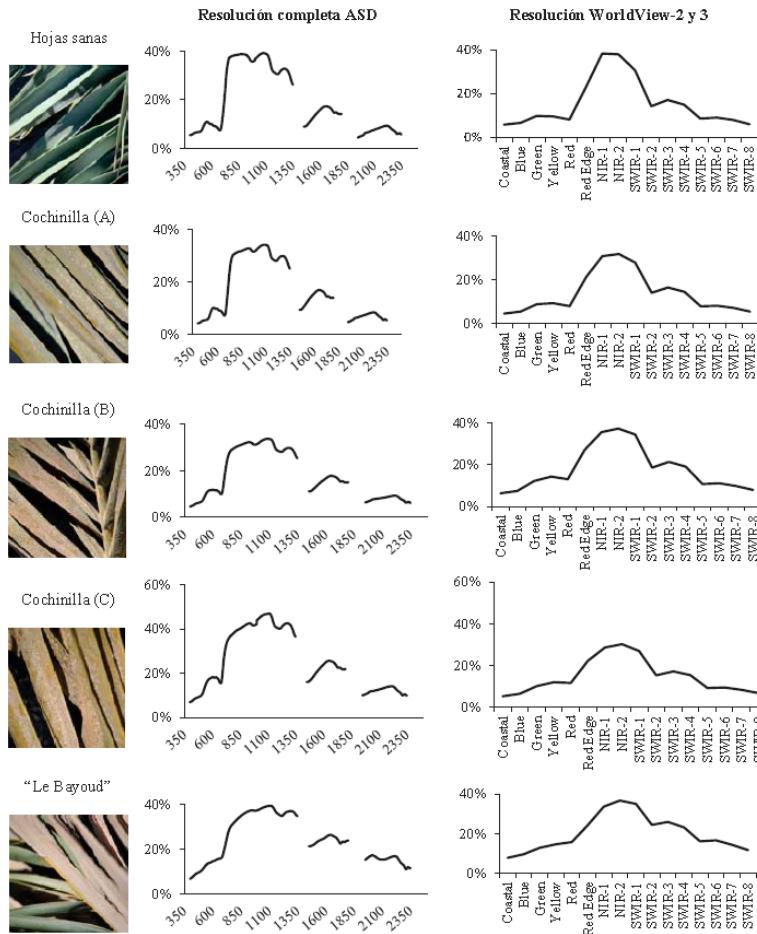


Figura 26. Firmas espectrales obtenidas a partir de promedios de medidas de espectro-radio-metría de campo. Las categorías Cochinilla A, B y C se corresponden a hojas afectadas por cochinilla por orden creciente de gravedad

Figure 26. Signatures spectrales obtenues à partir des valeurs moyennes des mesures du spectromètre de terrain. Les catégories A, B et C correspondent aux degrés de sévérité de cochenille blanche : faible, modéré et haut

se ponga en órbita un nuevo satélite, el WorlView-3, con las características del actual y ocho canales en el SWIR (desde 1195 a 2365 nm). En esta región, sólo se percibe cierto incremento de reflectancia en ejemplares con alto grado de afectación por cochinilla. Siendo significativo en todas las muestras afectadas por Bayoud (Nuñez-Casillas, et al., 2014).

En general, la respuesta espectral de hojas afectadas por Bayoud presenta un comportamiento a medio camino entre una hoja sana y una hoja muerta. Este resultado es consistente con la forma como se manifiesta esta enfermedad: comienza por la muerte progresiva de las hojas por un lateral y descendiendo por el otro una vez llegado al ápice, provocando la presencia de frondes con un lateral verde, aparentemente sano, y el otro seco (Figura 26).

A partir de los cálculos de separabilidad según la distancia de Bhattacharyya, encontramos que en longitudes de onda cortas (bandas *Coastal* y *Blue*), *B* es mayor cuando el grado de afectación de cochinilla es bajo. Por el contrario, cuando es medio o alto, las bandas más separables son la *Yellow*, la *Red* y las *NIR*. Por otro lado, las bandas *SWIR* sólo presentan un nivel de separabilidad significativo en presencia de Bayoud. Con respecto al papel de las bandas *NIR*, parece mayor en la discriminación de hojas con cochinilla que con Bayoud (Figura 27).

En la figura 28 se puede observar la importancia creciente que supone contar con nuevas bandas *SWIR* con respecto a las bandas de la región *VNIR* según aumentan los síntomas por cochinilla o *Bayoud*. Asimismo se observa mayor separabilidad cuando aumentamos el número de bandas que se consideran simultáneamente, con valores superiores a 100 para todas las clases cuando se utilizan cinco bandas. Para este caso (5 bandas), los canales del *Coastal* al *Yellow* junto con el futuro *SWIR-5* del WV-3

nous avons considéré intéressant de prendre en compte et analyser ces valeurs lorsqu'il est prévu pour l'année 2014 le lancement d'une nouvelle mission satellitaire, le WorldView-3, lequel aura les mêmes caractéristiques que l'actuel WV-2, en plus de huit canaux additionnels dans la région du SWIR, en élargissant son domaine spectrale jusqu'à 2365 nm. Dans le cas de la cochenille blanche, nous avons observé un certain accroissement de la réflectance dans cette région (1195 nm – 2365 nm) dans les feuilles touchées à un haut degré de sévérité, alors que cette augmentation était significative pour tous les échantillons touchés par le bayoud (Nuñez-Casillas, et al., 2014).

En général, la réponse spectrale de feuilles touchées par le bayoud présente un comportement à mi-chemin entre celui d'un feuille verte et celui d'une feuille sèche. Le résultat est cohérent avec la manière dont la maladie se manifeste : elle commence par la mort progressive des folioles d'un latéral de la feuille jusqu'à la pointe, et puis elle descend de l'autre côté ; cela produit typiquement des feuilles vertes d'un côté et sèches de l'autre côté (Figure 26).

D'après le calcul de la séparabilité selon la distance Bhattacharyya, nous avons trouvé de plus grandes distances dans les longueurs d'onde courtes (*Coastal* et *Blue*) pour des degrés bas de sévérité de la cochenille blanche. Par contre, quant aux degrés modéré et haut de sévérité, les bandes les plus séparables par rapport aux feuilles saines sont les *Yellow*, *Red* et *NIR*. D'autre part, les bandes du *SWIR* ne présentent des niveaux significatifs de séparabilité qu'en présence du bayoud. En ce qui concerne le rôle des bandes *NIR*, celui-ci est apparemment plus important pour la différenciation des feuilles avec la cochenille blanche que pour celles avec le bayoud (Figure 27).

Dans la Figure 28, on peut observer une importance croissante de la disponibilité

discriminarían mejor las palmeras con grado A y B de cochinilla, mientras que para aquellas afectadas con grado C los canales más adecuados serían *Coastal*, *NIR* y *Red Edge* junto al *SWIR-8*. Por último, en la discriminación del *Bayoud* destacaría la combinación de dos bandas del *SWIR* (3 y 5) junto con el *Blue*, el *Red* y el *NIR2*, estando estas bandas bien distribuidas a lo largo de todo el rango espectral.

Este análisis de la separabilidad espectral de las medidas obtenidas en hojas de palmeras, muestra que, en el caso de la cochinilla blanca, las bandas WorldView-2 de la región visible son las que mayor peso suponen para la discriminación entre palmeras afectadas de las sanas. Sin embargo, en el caso de hojas atacadas por *Bayoud*, las bandas *SWIR* del futuro satélite WorldView-3 aportarán mayor separabilidad espectral que el conjunto de bandas actuales VNIR del WorldView-2.

des canaux dans la région SWIR, par rapport à celles de la région VNIR (visible et infrarouge), à mesure que les symptômes produits par la cochenille ou le bayoud augmentent. Par ailleurs, nous remarquons que la séparabilité est plus grande à mesure que le nombre de bandes considérées pour l'analyse augmente, avec des valeurs de distance supérieures à 100 pour toutes les classes dans le cas où nous utilisons les cinq bandes. Dans ce dernier cas (5 bandes), les canaux *Coastal* au *Yellow* combinés avec le futur canal *SWIR-5* du capteur WV-3 pourront mieux différencier les palmiers avec des degrés de sévérité A et B de cochenille blanche, alors que pour ceux du degré C les canaux les plus appropriés seront le *Coastal*, les *NIR*, le *Red Edge*, et le futur canal *SWIR-8*. Finalement, pour une distinction claire des feuilles avec le bayoud il convient de remarquer l'utilité des nouvelles bandes *SWIR* (3 et 5, particulièrement) combinées avec le *Blue*, *Red* et le *NIR-2*, lesquels sont bien distribuées le long du domaine spectral. Cette analyse de la séparabilité spectrale des mesures obtenues dans les feuilles de palmier nous montre que les bandes du WV-2 de la région visible ont un poids considérable par rapport aux autres régions spectrales dans la distinction entre les palmiers sains et les palmiers touchées par la cochenille blanche. Cependant, dans le cas des feuilles attaquées par le bayoud, les bandes *SWIR* du futur capteur WV-3 rendront une plus grande séparabilité spectrale que l'ensemble de bandes VNIR du WV-2 actuel.

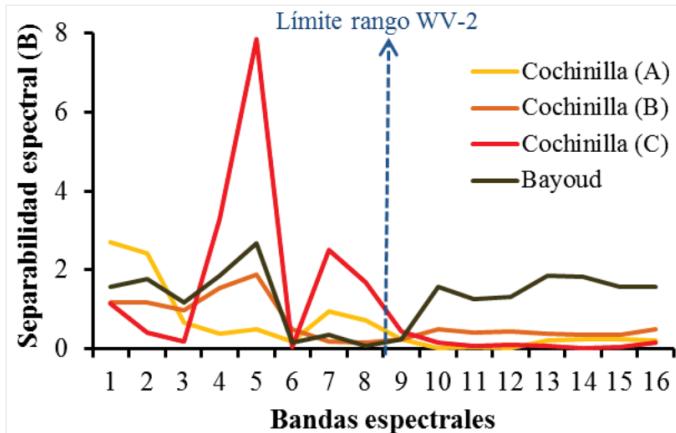


Figura 27. Combinación de bandas espectrales que presentan mayor separabilidad espectral para cada fitopatología con respecto a hojas sanas, en función del número de bandas

7. Conclusiones

El Proyecto Palmera-POCTEFEX ha

Figure 27. Combinaison des bandes spectrales qui représentent une plus grande séparabilité spectrale pour chacune des pathologies par rapport aux feuilles saines, en fonction du nombre de bandes

7. Conclusions

Le Projet PALMERA-POCTEFEX a fait pos-

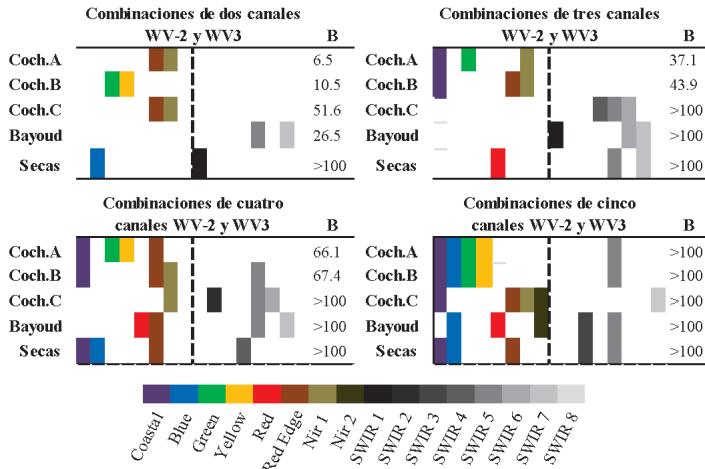


Figura 28. Separabilidad espectral de las bandas WorldView-2 y WorldView-3 de hojas de palmera con diferentes fitopatologías con respecto a hojas sanas

Figure 28. Séparabilité spectrale des feuilles de palmier à des degrés de pathologie différents, dans les bandes spectrales de WV-2 et WV-3, par rapport aux feuilles saines

hecho posible por primera vez la utilización conjunta de la teledetección desde satélites y la espectro-radiometría de campo para el cartografiado y la detección del estado fitosanitario de palmeras datileras en el Oasis de Mezguita (Souss-Massa-Draa, Marruecos).

Para este trabajo fue necesario contar con un sensor con el mayor nivel de detalle posible, ya que en la zona de estudio las palmeras se encuentran entremezcladas con el resto de cultivos. Se seleccionó el satélite WorldView-2 por sus características espetrales y resolución espacial. El tamaño de pixel usado fue de 50 cm, producto de la fusión de las 8 bandas multispectrales con la banda pancromática.

Durante las tres campañas experimentales realizadas en noviembre de 2012 y marzo y julio de 2013 se recolectaron más de 1000 puntos de control de parcelas representativas de los tipos y usos de suelo, y medidas espectro-radiométricas a distintas alturas.

Para la realización del mapa del área de estudio y debido al gran nivel de detalle de las imágenes de WV-2, se utilizó un método de clasificación orientado a objetos. Se detectó un número aproximado de 34.000 palmeras datileras con una exactitud del 99%. Con respecto a su localización en el mapa, la exactitud fue del 90%. En este caso, el error cometido se debió fundamentalmente a la confusión, en proporción similar, con la clase árbol y cultivo. La separación de los tres tipos de palmera en función de su estado sanitario no alcanzó en ningún caso el 65% de exactitud. Esto pudo ser debido en parte, a la diferencia entre la observación que se realizó a nivel de suelo, con respecto a la visión que se obtuvo desde satélite.

Los trabajos de espectroradiometría de campo contribuyeron a la caracterización espectral de la palmera datilera y otros usos de suelo presentes en el área de estudio. Se analizaron las bandas espectral-

sible, par première fois, l'utilisation combinée de la télédétection par satellite et la spectrométrie sur le terrain pour mapper et détecter l'état phytosanitaire des palmiers dattiers de l'Oasis de Mezguita (Souss-Massa-Draa, Maroc).

À cet effet, il a été nécessaire de compter, grâce à un capteur qui a un niveau de détail aussi haut que possible, étant donné que les palmiers se trouvent mêlés aux autres cultures dans la zone d'étude. Nous avons sélectionné le satellite WV-2 à cause de ses particularités spectrales et de sa résolution spatiale. Le pixel employé était de 50 cm x 50 cm, après avoir fusionné les 8 bandes multispectrales avec la bande panchromatique.

Au cours des trois campagnes expérimentales effectuées en novembre 2012 et en mars et juillet 2013 nous avons collecté plus de 1000 points de contrôle sur des parcelles représentatives de plusieurs types et utilisations du sol, ainsi que des mesures spectrométriques à différentes hauteurs.

La méthode de classification des images pour mapper la région d'étude a été choisie conformément à leur haut niveau de détail : une classification orientée objet. Nous avons détecté une quantité approximative de 34 000 palmiers dattiers avec un niveau d'exactitude de 99%. Par rapport à leur localisation sur l'image, l'exactitude était de 90%. Dans ce cas, l'erreur commise était fondamentalement causée par la confusion avec les classes Arbres et Cultures, à des proportions similaires. La séparation des trois types de palmier selon leur état sanitaire n'a jamais atteint le 65% d'exactitude. Cela peut être causé, partiellement, par la divergence entre les observations qui se sont réalisées au niveau du sol par rapport à l'information reçue du satellite.

Les travaux de spectrométrie sur le terrain ont contribué à la caractérisation spectrale du palmier dattier et d'autres utilisations du sol présents dans la région d'étude. Nous avons analysé les bandes spectrales

les del WorldView-2 que mejor diferenciaron las frondes sanas de las afectadas en diferente grado por cochinilla blanca y por Bayoud. Este análisis de separabilidad espectral, mostró que, para la cochinilla blanca, las bandas WorldView-2 de la región visible son las que mayor peso tienen para la discriminación entre palmeras afectadas y sanas. Sin embargo, en el caso de palmeras con Bayoud, las bandas SWIR del futuro satélite WorldView-3 aportarían mayor separabilidad espectral que el conjunto de bandas del WV-2.

La experiencia adquirida y los resultados obtenidos durante este proyecto, demuestran el potencial de la teledetección para realizar un cartografiado preciso de estos palmerales. Sin embargo, la detección desde satélite de plagas y enfermedades en palmeras, requiere la utilización de una metodología de campo que proporcione el detalle espectral y espacial necesario. El uso de imágenes adquiridas por medio de vehículos aéreos no tripulados podría aportar esta información. La continua reducción de costos y la facilidad de acceso a este tipo de plataformas en los dos últimos años, permitiría plantear futuros proyectos basándonos en esta nueva tecnología.

8. Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado en el marco de Palmera, un proyecto cofinanciado mediante recursos del Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) articulados a través del Programa de Cooperación Transfronteriza España-Fronteras Exteriores (POCTEFEX).

Expresamos nuestro agradecimiento a todas aquellas personas que han participado con nosotros tanto en las campañas experimentales como en el análisis de los resultados. Especialmente Mohammed Elmriissani (interprete y colaborador), Pablo Fernández (alumno de 4º Grado de la Facultad de Física) y a Pilar Martín y

de WV-2 qui font une meilleure distinction entre les feuilles saines de palmier et celles qui sont touchées par la cochenille blanche ou le bayoud à des degrés différents. Cette analyse de séparabilité spectrale nous a montré que, pour la cochenille blanche, les bandes WV-2 de la région visible et celles de l'infrarouge prochain ont plus de poids dans l'évaluation de la sévérité de la pathologie que les bandes additionnelles du futur capteur WV-3. Par contre, en ce qui concerne les palmiers touchés par le bayoud, les futures bandes du WV-3 dans la région infrarouge d'onde courte aideront à une séparabilité spectrale supérieure que l'ensemble des bandes du WV-2.

L'expérience acquise au cours de ce projet, ainsi que les résultats obtenus, nous montrent le potentiel de la télédétection dans la réalisation d'une cartographie précise de ces palmeraies. Cependant, la détection précise des maladies et ravageurs des palmiers entraîne l'application d'une méthodologie de terrain qui accomplit le niveau nécessaire de détail spectral et spatial. L'utilisation d'images acquises à l'aide de véhicules aériens non habités (UAV) pourrait offrir ce type d'information. Pendant les deux dernières années, il y a eu une réduction progressive du coût de ce type de plateformes et, en même temps, un augment d'accessibilité à ces technologies, ce qui nous permettra de concevoir des projets futurs basés sur celles-ci.

8. Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre du Projet PALMERA, cofinancé par le Fonds Européens de Développement Régional (FEDER) grâce au Programme de Coopération Transfrontalière Espagne-Frontières Extérieures (POCTEFEX).

Nous remercions toutes les personnes qui ont participé avec nous, dans les campagnes expérimentales autant que dans l'analyse des résultats. Particulièrement, Mohammed Elmriissani (interprète y col-

Lara Arroyo (Investigadoras del Laboratorio de Espectro-radiometría y Teledetección Ambiental del IEGD-CCHS-CSIC).

Así mismo, debemos reconocer la amabilidad y facilidades proporcionadas por Ait Bassou del ORMVAO y Ben MBarek de la Estación Experimental del INRA en Zagora durante las campañas experimentales.

laborateur), Pablo Fernández (élève de 4ème cours de la Faculté de Physique), et Pilar Martin et Lara Arroyo (chercheuses au Laboratoire de Spectrométrie et Télédétection Environnementale de IEGD-CCHS-CSIC).

Ainsi, nous faisons part de notre reconnaissance Ait Bassout del ORMVAO et Benzine MBarek de la Station Expérimentale de l'INRA à Zagora pour l'aide et l'amabilité qu'ils nous ont offertes pendant les campagnes expérimentales.

9. Bibliografía - Bibliographie

- Amira Hassan (2010). Spectral discrimination of palms (*Phoenix canariensis*) infested by the red palm weevil (*Rhynchophorus ferrugineus* Olivier, 1790) and palm localization by aerial photo-interpretation. Master Thesis. Mediterranean Agronomic Institute of Bari (Italy). 54 p.
- Analytical Spectral Devices, Inc. (ASD) Technical Guide. 4th Edition. Editor: David C. Hatchell 1999. Boulder, CO 80301-2344, USA.
- Aniruddha Ghosh, P.K. Joshi, 2014. A comparison of selected classification algorithms for mapping bamboo patches in lower Gangetic plains using very high resolution WorldView 2 imagery. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 26, 298-311.
- Blaschke, T., 2010. Object based image analysis for remote sensing. ISPRS Journal of photogrammetry and Remote Sensing, 65 (1), pp.2-16.
- Chubey, M.S., Franklin, S.E., Wulder, M.A., 2006. Object-based analysis of Ikonos-2 imagery for extraction of forest inventory parameters. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 72 (4), 383–394.
- Helmi Z. M. Shafri , Nasrulhapiza Hamdan & M. Iqbal Saripan (2011) Semiautomatic detection and counting of oil palm trees from high spatial resolution airborne imagery, International Journal of Remote Sensing, 32:8, 2095-2115.
- Johansen, K; Arroyo, LA ; Phinn, S; Witte, C. 2010. Comparison of Geo-Object Based and Pixel-Based Change Detection of Riparian Environments using High Spatial Resolution Multi-Spectral Imagery. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 76(2), 123-136.

- Keddal, H., 2006. National study on date palm irrigation and associated crops in the Kingdom of Morocco, Food & Agriculture Organization.
- L. Núñez-Casillas, M. Labrador-García, M. Arbelo, A. Lorenzo, A. Alonso-Benito, P. Hernández-Leal. (2013). Potencial de WorldView-2 y 3 para distinguir estados fitosanitarios de Phoenix dactylifera L. en el Valle del Drâa (Marruecos). Teledetección. Sistemas operacionales de observación de la Tierra. pp. 103 - 106. INTA, 2013. Depósito legal: M-29011-2013.
- LANDGREBE, D. A. 2000. Information extraction principles and methods for multispectral and hyperspectral image data. Information processing for remote sensing, Chap. 1. Editor: Chen, C.H., World Scientific Publishing, River Edge, NJ, USA.
- Myint, S.W., Gober, P., Brazel, A., Grossman-Clarke, S., Weng, Q., 2011. Per-pixel vs. object-based classification of urban land cover extraction using high spatial resolution imagery. *Remote Sensing of Environment* 115, 1145–1161.
- Peel, M. C., Finlayson, B. L., and McMahon, T. A. 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 11, 1633-1644.
- Robert Gilmore Pontius Jr & Marco Millones (2011): Death to Kappa: birth of quantity disagreement and allocation disagreement for accuracy assessment, *International Journal of Remote Sensing*, 32:15, 4407-4429.
- Ruiliang Pu, Shawn Landry, A comparative analysis of high spatial resolution IKONOS and WorldView-2 imagery for mapping urban tree species, *Remote Sensing of Environment*, Volume 124, September 2012, Pages 516-533.
- Santoso, H., Gunawan, T., Jatmiko, RH., Darmosarkoro, W., Minasny, B. (2011). Mapping and identifying basal stem rot disease in oil palms in North Sumatra with QuickBird imagery. PRECISION AGRICULTURE. Volume: 12. Issue: 2. Pages: 233-248.
- Uddin, S., Al-Dousari, A., Al-Ghadban, A. Mapping of palm trees in urban and agriculture areas of Kuwait using satellite data. (2009) International Journal of Sustainable Development and Planning, 4 (2), pp. 103-111.
- Yu, Q., Gong, P., Clinton, N., Biging, G., Kelly, M., Schirokauer, D., 2006. Object-based detailed vegetation classification with airborne high spatial resolution remote sensing imagery. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 72(7), 799–811.
- <http://gdex.cr.usgs.gov/gdex/>
- <http://www.cgms-maroc.ma/cgms-map/>
- <http://www.digitalglobe.com/about-us/contentcollection#satellites&worldview-3>
- http://www.pcigeomatics.com/pdf/GeoInformatics_WorldView-2.pdf



Socios canarios



Socios marroquíes

