



Land Care  
In Desertification  
Affected Areas  
From Science  
Towards Application

# **Técnicas de Detecção Remota Para Controlo da Desertificação**

Joachim Hill

## CONTEÚDOS

INTRODUÇÃO: O QUE ESTE FASCÍCULO TENTA ALCANÇAR	1
DETECÇÃO REMOTA: A UTILIZAÇÃO DE SATÉLITES E AVIÕES PARA RECOLHER INFORMAÇÃO SOBRE O AMBIENTE	2
DAS MEDIÇÕES REMOTAS À INFORMAÇÃO DEGRADAÇÃO: SINDROMAS DE DEGRADAÇÃO E O CONCEITO DE TEMPO A ESCALA GLOBAL: DINÂMICA DE DEGRADAÇÃO DA TERRA NO MEDITERRÂNEO	3
A VISÃO DETALHADA: PROCESSOS DA ESCALA REGIONAL À LOCAL	4
ESTRATÉGIAS DE INTERVENÇÃO ESPECÍFICAS DOS LOCAIS	7
AVALIAÇÃO QUANTITATIVA DE PROPRIEDADES DA SUPERFÍCIE DA TERRA	9
CONCEITOS DE AVALIAÇÃO INTEGRADA	10
PERSPECTIVAS	11
BIBLIOGRAFIA	12
	13

## INTRODUÇÃO: O QUE ESTE FASCÍCULO TENTA ALCANÇAR

Embora não haja muito desacordo quanto à extensão das terras secas do mundo [1], as estimativas da proporção de terras desertificadas variam entre 10 e 70 por cento (terra hiperárida excluída), provando que as avaliações existentes da extensão global da degradação da terra apresentam debilidades importantes. Contudo, existir informação fiável e isenta sobre a extensão de áreas afectadas e o seu desenvolvimento ao longo do tempo não é apenas importante para compreender os mecanismos motores da desertificação, mas também para implementar estratégias eficazes de prevenção e mitigação. Os produtos de informação necessários incluem mapas espacialmente explícitos sobre o uso do solo, parâmetros biofísicos da vegetação e do solo, e a variabilidade temporal de todos eles.

O uso integrado de detecção remota, baseada em satélites, observações de terreno e bases de dados geográficos, pode proporcionar informação consistente, recorrente e a custo eficiente, do coberto

vegetal e de outras propriedades da superfície relevantes para a desertificação. Além disso, a continuidade das observações que é necessária (controlo a longo prazo), assegura o registo da elevada variabilidade inter-anual dos serviços dos ecossistemas das terras áridas e permite distinguir entre o papel das acções humanas e a variabilidade climática. Por outro lado, o uso de imagens da detecção remota para avaliação e controlo da desertificação ainda requer uma cuidadosa calibração e validação em relação às medições no terreno (tais como coberto vegetal, produtividade biofísica, evapotranspiração, fertilidade do solo e taxas de erosão e compactação).

Este fascículo ilustrará as capacidades das abordagens da detecção remota utilizando exemplos seleccionados de locais da Europa Mediterrânea. Começando pelas definições do problema da desertificação, geralmente aceites, iremos introduzir o conceito de síndromas de degradação, o qual descreve mecanismos específicos de interacção que resultam de uma excessiva utilização da terra no que diz respeito à sua resiliência, causando eventualmente uma redução persistente na capacidade dos ecossistemas em produzir bens e serviços (ex. erosão, perturbação do ciclo hidrológico, desflorestação, sobrepastoreio, etc.).

1

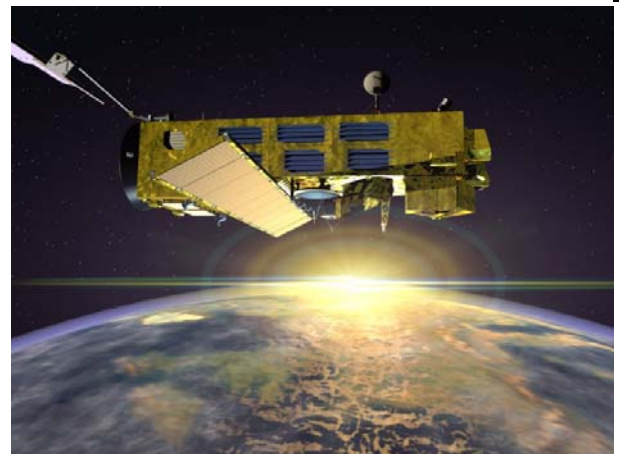


Figura 1. O ENVISAT é um satélite avançado de observação da Terra com uma combinação de sensores que melhora largamente a amplitude e precisão das medições científicas da atmosfera, oceanos, superfície da terra e gelo (fonte: ESA)

Dada a dimensão global do problema da desertificação e da diversidade dos seus síndromas, é evidente que os sistemas de detecção remota têm uma elevada importância nesta tarefa. Portanto, e em termos da dimensão global do problema, é evidente que melhorar a capacidade disponível de avaliação, controlo e estratégias de aviso precoce continuará também a ser um dos desafios mais importantes no futuro.

## DETECÇÃO REMOTA: A UTILIZAÇÃO DE SATÉLITES E AVIÕES PARA RECOLHER INFORMAÇÃO SOBRE O AMBIENTE

É uma mensagem primordial desta série de fascículos que as mudanças ambientais em ecossistemas áridos, semi-áridos e secos sub-húmidos não são conduzidas maioritariamente por variáveis climáticas, mas por processos que emergem do impacto coincidente de acções humanas adversas nos frágeis ecossistemas das terras secas. Devido a estas interacções, as propriedades biofísicas da superfície da terra são alteradas sob o impacto da mudança dos sistemas de uso do solo. Estas envolvem a perda de cobertura vegetal, biomassa, complexidade espacial e estrutura vertical da vegetação, bem como condições do solo alteradas (crostas bióticas e minerais, esgotamento de nutrientes, perfis de solo truncados através da erosão, salinização). Obviamente, a produtividade dos sistemas das terras secas depende largamente de alguns dos últimos, que controlam a disponibilidade de água e a sua redistribuição, a emergência espontânea e desenvolvimento de novas plantas, a produção de pó durante tempestades de vento, entre outros. Mudando as propriedades da superfície (ex. solo) pode-se facilmente exceder o impacto das condições climáticas extremas. Aceitando que os factores socioeconómicos podem predispor e conduzir a terra à desertificação, é também claro que dificilmente se pode dizer que a terra está desertificada até os sintomas aparecerem nos sistemas biogeofísicos [2]. A degradação ambiental é então definida pelas suas consequências na paisagem e são estas consequências que têm que ser detectadas e quantificadas utilizando dados espaciais. Mesmo no caso de observatórios terrestres em rede (tais como o OSS<sup>1</sup> e BIOTA AFRICA<sup>2</sup>, por exemplo) a

dinâmica temporal e espacial da paisagem e mudanças na sua capacidade de providenciar bens e serviços pode ser mais exaustivamente, e por vezes até melhor, deduzida pela observação de vastas áreas a partir de satélites ou aviões do que no terreno.

A detecção remota é geralmente introduzida como a ciência para recolher informação sobre as características físicas e biológicas de um objecto (ou superfície) sem entrar em contacto físico com ela (Figura 2). Na observação da Terra o meio mais importante de transmitir esta informação é a radiação electromagnética na região óptica e do microondas, detectada e registada sobretudo por sistemas de sensores a bordo de satélites ou aviões. O sinal medido é obtido através da interacção da radiação electromagnética (emitida por uma fonte natural ou artificial) com os constituintes da superfície, onde é absorvida, transmitida ou reflectida de volta para o espaço como função da natureza biofísica da superfície [5, 6].

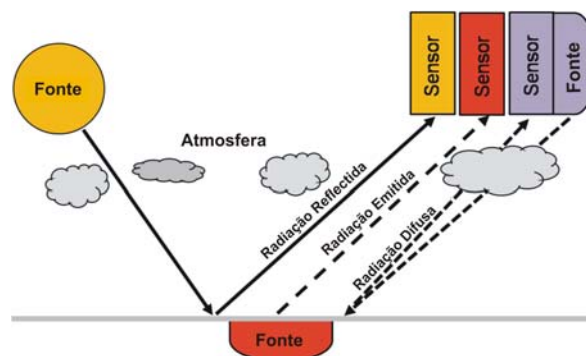


Figura 2. Componentes de um sistema de detecção remota: fonte de radiação, interações com a superfície e Atmosfera, sensor (modificado de [4]).

Variações dependentes do comprimento de onda destes sinais (assinaturas espectrais) são a fonte primária de informação recolhida com sistemas de detecção remota, e é através de cuidada interpretação destas assinaturas que os cientistas são capazes de obter informações acerca do estado corrente da superfície da Terra numa dada posição. Em apenas um instante, os sistemas de observação remotos recolhem muitas dessas medições e compõem-nas na forma de uma imagem digital, dando assim acesso aos padrões espaciais dos fenómenos da superfície que, de outra forma, seriam dificilmente observados no seu todo.

<sup>1</sup> Observatoire du Sahara et du Sahel  
[<http://www.oss-online.org/>]

<sup>2</sup> <http://www.biota-africa.org/1024/frames/biota-africa.htm>

Os sistemas de detecção remota operam realmente numa variedade de escalas espaciais (local a global) e, dependendo das suas características orbitais, podem repetidamente fornecer vistas sinópticas duma área e seguir a variabilidade temporal na assinatura espectral. Os satélites geoestacionários e de órbita polar, que operam no domínio reflectivo e emissivo, são usados há mais de duas décadas. Têm produzido grandes arquivos de dados, que podem hoje ser utilizados para avaliação à escala regional e global bem como actividades retrospectivas de controlo. Actualmente, a detecção remota por satélite tornou-se uma das mais importantes ferramentas para recolher informação espacial sobre o estado do Ambiente, quase em qualquer lugar do Mundo, rapidamente e sob condições de observação largamente controladas, regularmente e repetidamente.

## DAS MEDIÇÕES REMOTAS À INFORMAÇÃO

Os dados de imagem de satélite oferecem capacidades significativas de obter informação integral para estudar os sistemas humanos-ambiente, especialmente aqueles ligados aos impactos da actividade humana no uso do solo e coberto. Empregar imagens de detecção remota para a desertificação requer calibração cuidada do sinal físico e validação com base em medidas no terreno (tais como coberto vegetal, produtividade biológica, evapotranspiração, fertilidade do solo, taxas de compactação e erosão). Mas o maior problema associado ao uso de sistemas de observação da Terra é interpretar quantitativamente, em termos de propriedades biofísicas, o sinal que é medido, depois de ter interagido com objectos remotos.

Isto envolve dois passos: primeiro, o sinal medido tem que ser corrigido para ter em conta as influências externas durante o processo de aquisição (ex. extinção atmosférica) e depois tem que ser feito coincidir com os sistemas de referência geográficos; estão disponíveis métodos eficientes para aplicação de uma rotina de forma a atingir este objectivo [3]. Segundo, o sinal registado tem que ser traduzido em informação útil, o que é conseguido convertendo as medidas físicas da reflectância ou retro difusão em parâmetros biofísicos ou indicadores qualitativos do coberto. Foi alcançado um progresso substancial neste campo. Os utilizadores têm acesso a uma vasta gama de modelos eficazes e algoritmos para

conceber soluções de detecção remota, com aplicações no mundo real [5,6]. Tornou-se, pois, possível caracterizar o estado da vegetação em termos qualitativos e quantitativos (ex. teor de pigmento ou água, estrutura e volume da copa), para cartografar propriedades do solo e, devido à operação contínua de sistemas de satélites durante os últimos 25 anos, seguir as mudanças no tempo e no espaço ao longo de largos períodos de tempo.

Contudo, ligar as observações de detecção remota aos fenómenos de desertificação não envolve só potentes algoritmos para obter parâmetros biofísicos a partir de medidas físicas de reflectância, retro difusão ou emissão de radiação electromagnética. Visto que os indicadores biofísicos das características da superfície podem ser ambíguos e enganadores, quando não interpretados no seu contexto, é de importância crucial relacionar os componentes da informação extraída com restrições causais específicas. O problema aqui é que as últimas podem aparecer como diversas, pois as terras secas diferem nas suas características sociais, económicas e naturais.

## DESERTIFICAÇÃO: SÍNDROMAS DE DEGRADAÇÃO E O CONCEITO DE TEMPO

O enorme número de definições e perspectivas sobre desertificação não irá ser aqui repetido, mas a sua própria existência é indicativa do facto de ser ainda difícil identificar um conceito ou explicação unificador para a desertificação [7,8].

A partir de esforços para definir um quadro conceptual capaz de lidar com as múltiplas expressões de Mudança Global, emergiu o conceito de *síndromas* [9]. A ideia básica por detrás dos *síndromas* não é descrever a Mudança Global por regiões ou sectores, mas através de padrões arquétipos, dinâmicos, co-evolutivos de interacções Civilização-Natureza. Em analogia com a ciência médica, os *síndromas* (como “combinação de sintomas”) descrevem um conjunto de processos interactivos e sintomas que aparecem repetidamente e largamente difundidos em combinações e padrões típicos. Embora o conceito de *síndrome* seja considerado uma das abordagens mais promissoras, para avaliações integradas como base local da Mudança Global, é sentido que o quadro existente necessita de ajustamentos adicionais e de progressos [10], tendo em conta os desafios específicos de

desenvolvimento das terras secas [2], as causas e os caminhos para a desertificação, que foram identificados como “forças motrizes subjacentes” a serem associadas com as causas próximas de desertificação (humanas e/ou biofísicas) [8].

Além do quadro conceptual, uma componente extremamente importante na observação de ambientes em terras secas em mudança é o tempo, e ao conceptualizar desertificação como um processo patológico de dinâmica de coberto e uso do solo multi-anual [2], é quase obrigatório cobrir períodos de tempo à escala de décadas e separar as mudanças a longo termo do impacto das flutuações de curto prazo, conduzidas por impulsos sazonais ou eventos singulares. Uma vez que os períodos típicos de observação necessários podem exceder o tempo de vida de satélites individuais, têm que se estabelecer arquivos calibrados, que incluem dados de vários sistemas de observação idênticos ou conceptualmente similares. Hoje existem vários arquivos específicos por satélite, para diferentes períodos de tempo, mas ligá-los com o objectivo de cobrirem intervalos de tempo de várias décadas, com produtos de dados homogêneos, constitui ainda um enorme desafio.

Têm sido providenciados grandes conjuntos de indicadores terrestres de desertificação<sup>3</sup>, e o uso integrado de detecção remota baseada em satélites com observações de terreno e dados espaciais pode providenciar informação consistente, repetível, a custo efectivo, sobre o coberto vegetal e as propriedades do solo relevantes para a desertificação. A continuidade das observações (controlo a longo prazo) durante décadas pode ser importante para ter em conta a elevada variabilidade inter-anual dos ecossistemas de terras secas, e para distinguir entre o papel das acções humanas e a variabilidade climática na produtividade vegetal. Num esforço para controlar as maiores flutuações na vegetação e compreender como elas afectam o Ambiente, cientistas da Terra começaram há 20 anos a usar sensores remotos de satélites para medir e cartografar a densidade de vegetação verde sobre o Planeta. Utilizando o Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) da NOAA, os cientistas têm recolhido

imagens da superfície com um detalhe espacial de cerca de 1x1 km<sup>2</sup>. Actualmente, uma série contínua de imagens cobre o Globo, para o período de 1981 até hoje. Observações globais melhoradas foram adicionadas às do AVHRR: em 1998, o satélite Francês SPOT-VEGETATION foi colocado numa órbita que permite observações diárias com características espectrais melhoradas, e em 1999/2002 os Estados Unidos lançaram sucessivamente o sistema chamado MODIS<sup>4</sup> em duas plataformas de satélite comparáveis (EOS-1 e EOS-2).

## A ESCALA GLOBAL: DINÂMICA DE DEGRADAÇÃO DA TERRA NO MEDITERRÂNEO

Um aspecto particularmente importante na avaliação e controlo da desertificação é adquirir uma visão de conjunto acerca das áreas afectadas e ligar a dimensão global aos processos regionais e locais. Medições quantitativas reais da desertificação têm sido um “objectivo evasivo” desde as tentativas iniciais da UNEP no “Atlas da Desertificação do Mundo”. De uma forma similar ao GLASOD,<sup>5</sup> baseou-se nas avaliações de peritos, e não em medições objectivas. Embora a detecção remota tenha contribuído substancialmente para corrigir o “mito do deserto em marcha” [11], e embora tenha clarificado que a desertificação não está a ocorrer em todo o Sahel, mas mais provavelmente em áreas específicas, nenhuns estudos foram concluídos a nível global.

No âmbito de projectos de investigação suportados pelos programas científicos da União Europeia, foram desenvolvidas estratégias para ligar a análise dos arquivos de dados dos sistemas de observação global (escala espacial de 1 km, observações decenais, cobertura temporal de 1985 até hoje) com observações de satélites de observação da terra (escala espacial 10-30 m) registadas com menos frequência, mas espectral e espacialmente mais detalhadas. Enquanto se espera que as primeiras identifiquem regiões afectadas, onde as características da superfície da terra mudaram ao longo do tempo para condições mais favoráveis ou

<sup>4</sup> Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer [<http://modis.gsfc.nasa.gov/>]

<sup>5</sup> Global Assessment of Soil Degradation, levado a cabo pelo International Soil Reference Centre (ISRIC) for UNEP

mais críticas, as últimas podem ser utilizadas para desvendar os processos subjacentes numa escala espacial mais detalhada, onde as ligações conceptuais e metodológicas, como os condutores socioeconómicos, podem ser explicitamente consideradas. Contudo, é essencial compreender que definir termos tais como “crítico” ou “favorável” requer um quadro conceptual. Neste sentido, é importante compreender que os processos relevantes de degradação na Europa Mediterrânea podem, até certo ponto, estar incluídos sob *síndromas* clássicos de degradação ambiental [10]: a maior parte deles agrupados sob o cabeçalho de *síndromas de utilização* e incluir processos que sobre utilizam das terras marginais de uma ou outra forma. Embora incompleta, a lista de *síndromas* já fornece um quadro adequado para conceber critérios de avaliação a serem aplicados, para avaliar a mudança ambiental através de produtos da detecção remota, e o Projecto Europeu **DeSurvey** produziu os primeiros exemplos para este tipo de abordagem.

A desertificação é uma característica de vários *síndromas* que reflectem a dinâmica interna de lugares, recursos, economias e populações. A lista preliminar de *síndromas* [10] inclui:

Sahel	sobreutilização de terra marginal
Sobre-exploração	sobre-exploração de recursos naturais
Êxodo rural	degradação ambiental através do abandono das práticas da agricultura tradicional
<i>Dust Bowl</i>	degradação ambiental através de um uso do solo e da água, agro-industrial não sustentável
Mar de Aral	dano ambiental de paisagens naturais, através de projectos de grande escala

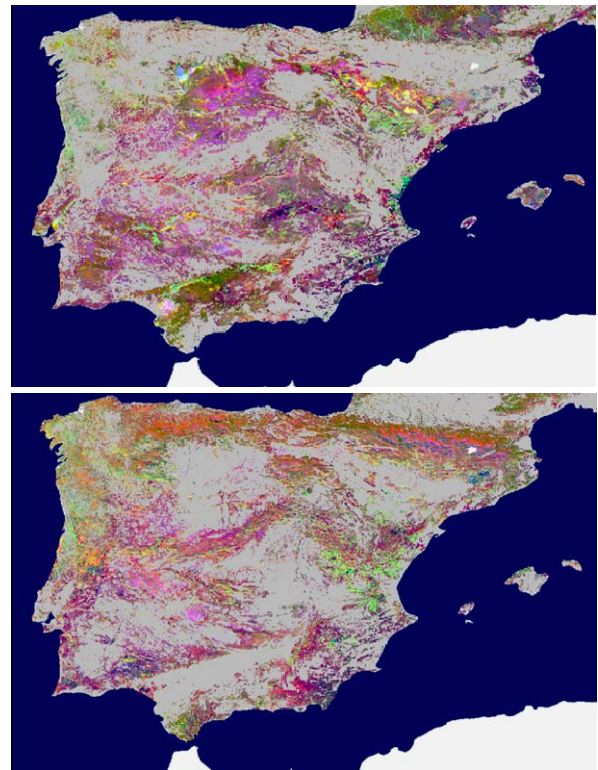


Figura 3. Compósitos coloridos das tendências de 15 anos (1989-2004) da abundância de vegetação (vermelho), magnitude do ciclo anual da vegetação (verde) e sua fase (azul) conforme obtido da análise dos índices de vegetação decenais da série MEDOKADS-AVHRR para a agricultura (topo) e áreas não agrícolas (baixo) na península Ibérica

Relembremo-nos que a maior parte das definições de desertificação enfatiza o papel central da produtividade biológica, e que os sistemas de detecção remota podem fornecer substitutos adequados para este parâmetro. Medindo cuidadosamente os comprimentos de onda e intensidade da luz visível e infravermelha próxima, reflectidas pela superfície da terra de volta para o espaço, os cientistas utilizam um algoritmo chamado “índice de vegetação” para quantificar as concentrações de vegetação de folha verde no interior de um pixel representado [12]. Depois, combinando os Índices de Vegetação diários em compósitos de 10 dias, foi criado um arquivo de imagens (MEDOKADS) a partir do sistema de observação de satélite AVHRR [13] que fornece este índice a uma escala espacial de 1 por 1 km<sup>2</sup> para um período de mais de 15 anos, começando em 1989. Analisando o comportamento temporal deste Índice de Vegetação, não só se incluiu a determinação de tendências lineares deste intervalo de tempo, mas também a identificação de componentes de

frequência importantes: aplicando operações matemáticas mais elaboradas é possível estimar a magnitude de uma curva anual de crescimento da vegetação, para um determinado lugar, e o ponto no tempo em que ocorreu o máximo de vegetação no contexto do ciclo fenológico de um ano (fase).

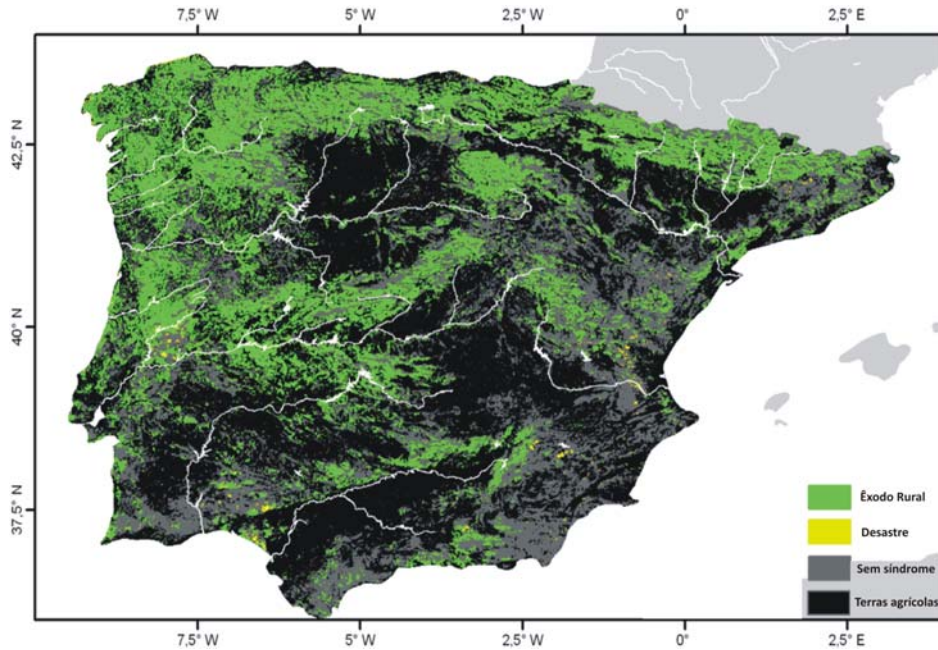


Figura 4. Análise de uma série temporal de arquivo de satélite de 15 anos, que produziu este mapa das áreas da Península Ibérica que foram atribuídas aos síndromas de “Êxodo Rural” e “desastre” (este sobretudo devido a fogos). A análise refere-se ao período 1989-2004

expansão rápida, culturas arbóreas reestruturadas e aglomerados urbanos.

A série de imagens também pode ser utilizada para analisar tendências temporais nos parâmetros anuais de magnitude e fase. A combinação colorida de todos os três parâmetros de tendência (abundância, fase e magnitude) é indicativo da resposta variável da vegetação capturada pelas medições de satélite, que por sua vez representam mudanças de uso do solo e qualidade que ocorreram durante os últimos 15 anos (Figura 3). Por exemplo, olhando para as áreas agrícolas e de vegetação natural da Península Ibérica verifica-se que as tendências positivas de produção de biomassa

prevalecem em ambos os estratos. Nas áreas agrícolas, o maior aumento de produtividade biológica está ligado, de uma forma bastante óbvia, aos esquemas em expansão de irrigação; estes podem ser concebidos como uma expressão específica do síndrome do “MAR de Aral”, visto que a sustentabilidade do aumento crescente do consumo de água é, a longo prazo, pelo menos questionável. Em comparação com casos “clássicos” de desertificação em África ou Ásia Central, o aumento generalizado da produtividade biológica em áreas Europeias não agrícolas parece sugerir que a ausência de pressão humana nestes ecossistemas melhorou a situação. Uma análise mais próxima, contudo, revela que estas tendências positivas são um substituto tangível para a degradação ambiental, através do excesso de produção de biomassa, que seguiu o abandono das práticas agrícolas tradicionais (síndrome do “êxodo rural”): expansão dos matos e copas que se aproximam, não só modificam a complexidade espacial e estrutura vertical da vegetação, contribuindo assim para aumentar dramaticamente os riscos de fogos, como causam mudanças substanciais no ciclo hidrológico (ex. escoamento e recarga da água subterrânea). Em Espanha estes processos levaram à redução do fluxo anual dos rios em aproximadamente 25 % durante os

É importante compreender que dificilmente seria possível desenvolver um sistema estruturado de regras de decisão para interpretar os dados obtidos a partir de satélites à escala de 1-km, sem um quadro conceptual tal como o dos síndromas de desertificação.

Os resultados mais importantes desta análise combinada sugerem que a mudança ambiental na bacia do Mediterrâneo nos últimos 15 anos é primariamente caracterizada por um aumento da cobertura vegetativa nos ecossistemas semi-naturais (florestas e pastos) e áreas agrícolas, devido à intensificação e expansão dos sistemas irrigados e abandono da terra generalizado [14] que já havia começado há muitas décadas. Tendências negativas (perda de coberto vegetal e/ou biomassa) só ocorrem em manchas isoladas, primariamente ao longo de regiões costeiras com as suas áreas de estufas em

últimos 50 anos [15]. Quando se interpreta os parâmetros de tendência a longo prazo combinados através de conjuntos de regras cuidadosamente estabelecidos (para uma determinada janela temporal), torna-se possível obter mapas que de facto mostram a extensão espacial de síndromas específicos de desertificação, tais como as áreas que estão a sofrer as consequências de “êxodo rural” (Figura 4). Estes tipos de mapas são não só importantes para compreender a dimensão espacial das áreas afectadas em termos de combinações específicas de condutores e processos, mas fornecem igualmente um contexto conceptual para usar observações espaciais a escalas mais finas.

### A VISÃO DETALHADA: PROCESSOS DA ESCALA REGIONAL À LOCAL

Alargando a discussão a partir do ponto anterior, pode mostrar-se que as componentes de tendência e frequência obtidas das séries temporais largas de satélites de observação global levam directamente à escala de observação seguinte. Os parâmetros temporais para a terra agrícola num dos mais importantes locais Europeus de estudo no Norte da Grécia<sup>6</sup> (Lagadas) são mostrados na Figura 5, onde cada pequeno quadrado (pixel) representa a informação para uma área de 1 por 1 km<sup>2</sup>.

Enquanto as áreas a preto representam planos de água, as cores na figura da esquerda indicam a tendência da produção de biomassa positiva (tons esverdeados) e negativa (em tons avermelhados) para um período de 15 anos. Pode ver-se que é detectado um grande aumento na grande área agrícola ao Norte (vale de Strimonas), enquanto as características decrescentes de produção de biomassa caracterizam a área a Sul dos lagos. A última compreende uma área de agricultura marginal em terreno montanhoso, com perspectivas limitadas de desenvolvimento agrícola. O vale de Strimonas, por outro lado, inclui esquemas de irrigação extensos, que sofreram recentemente uma intensificação. Da

perspectiva da detecção remota, esta conclusão é fortemente sustentada pela chamada informação de “fase” exposta à direita na Figura 5. Em comparação com a tendência a 15 anos este mapa mostra, para cada pixel, o número de meses pelos quais o máximo da vegetação se deslocou para momentos antecipados ou mais tardios. Pode ver-se que o maior aumento de biomassa coincide com áreas onde o máximo se deslocou para mais tarde no Verão – uma indicação clara para agricultura de irrigação substancialmente intensificada, eventualmente associada com mudanças nas preferências das colheitas.

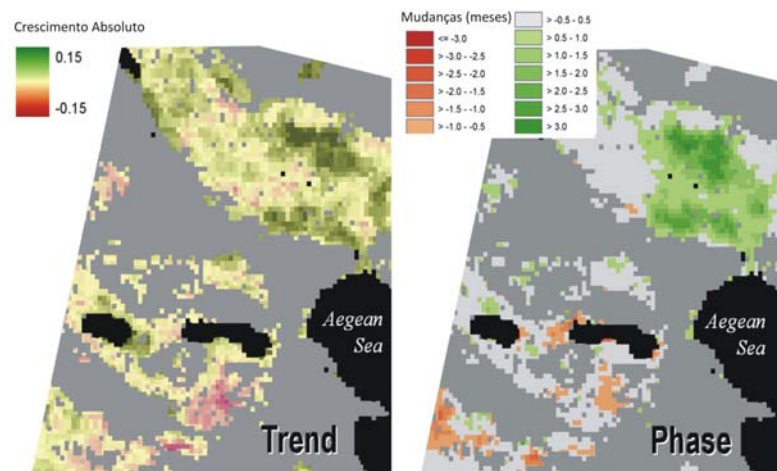


Figura 5. Tendências a 15 anos de abundância da vegetação (esquerda) e mudanças de fase do máximo de vegetação associadas na área de estudo de Lagadas, Norte da Grécia, conforme a informação obtida da análise da série temporal base de dados MEDOKADS-AVHRR

Como complemento à informação fornecida pelos satélites de controlo ambiental global à escala quilométrica, os satélites de observação da Terra com capacidades de observação mais detalhada espacialmente (na casa das dezenas de metros) e espectralmente (5-10 bandas de observação) oferecem melhores capacidades para cartografar quantitativamente os parâmetros biofísicos da vegetação e características do solo à escala regional e local. Podem ser utilizados para fazer zoom, para identificar regiões problemáticas onde é necessária informação mais detalhada. Se foram arquivadas ao longo do tempo observações suficientemente frequentes, através de sistemas de observação da Terra tais como o LANDSAT, SPOT, ASTER, outros podem também ser utilizados, para identificar a

<sup>6</sup> A investigação foi desenvolvida no quadro dos Projectos Europeus GEORANGE, LADAMER e DeSurvey



variabilidade das características da vegetação e solo em termos temporais.



Figura 6. Degradação severa da vegetação e condições do solo na proximidade de um ponto de concentração de gado em Lagadas (Norte da Grécia)

O Landsat Thematic Mapper (TM)<sup>7</sup> é um sensor levado a bordo dos satélites Landsat 4, 5 e 7 e recolheu imagens da Terra quase continuamente desde Julho de 1982 até ao presente, com um ciclo de repetição de 16 dias. Os dados de imagem Landsat TM consistem em sete bandas espectrais com uma resolução espacial de 30 metros para as bandas 1 a 5 e banda 7. A resolução espacial para a banda 6 (infravermelho térmico) é de 120 metros. A dimensão aproximada de uma cena é de 170 km Norte-Sul por 183 km Este-Oeste. Podem ser obtidas imagens similares com os satélites SPOT<sup>8</sup> e ASTER<sup>9</sup>.

O exemplo seguinte ilustra esta estratégia. Como em muitas outras regiões da Europa Mediterrânea, a província de Lagadas é conhecida por sofrer de degradação local dos pastos devido ao sobrepastoreio (Figura 6). Examinando a tendência de longo prazo da vegetação para áreas não agrícolas, tal como foram obtidas da série de 15 anos MEDOKADS-AVHRR, pode ver-se uma área extensa com estado estável ou sinais de tendência ligeiramente negativa a Norte dos lagos (enquanto as áreas florestadas quase sempre exibem uma evolução positiva da biomassa) (Figura 7).

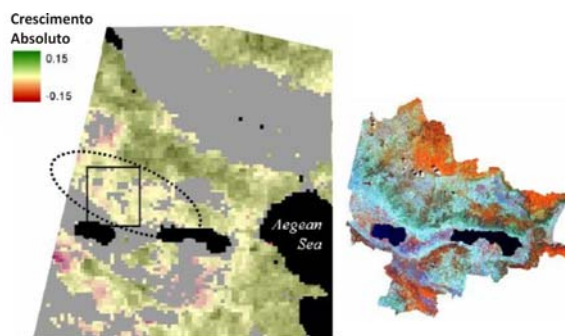


Figura 7. Tendências de abundância da vegetação (1989-2004) para áreas não agrícolas em Lagadas (obtidas da base de dados MEDOKADS-AVHRR, à esquerda) em comparação com o detalhe espacial representado pelos satélites típicos de observação da Terra (Landsat-TM, à direita)

Para uma análise mais detalhada das estruturas espaciais que são necessárias para conceber e implementar estratégias de gestão melhoradas, foi estabelecida uma série temporal de 15 anos calibrada de imagens mais detalhadas Landsat Thematic Mapper.

Os 18 dias que os satélites demoram a passarem novamente num mesmo ponto (ciclo de revisita), tornam óbvio que as séries temporais de tais satélites de observação da Terra (SOT) podem nunca fornecer uma cobertura densa similar aos sistemas com observações diárias. A análise clássica de frequências não é aplicável por causa da natureza descontínua da série de imagens, mas, seleccionando cuidadosamente cenas SOT de estados fenológicos comparáveis, é possível compilar séries temporais multi-anuais para analisar as tendências de produtividade a uma escala espacial mais detalhada [16]. Embora seja mais difícil identificar dinâmicas fenológicas dentro das estações, analisar a variância em torno das tendências multi-anuais estimadas fornece informação significativa acerca dos tipos funcionais de vegetação. Deve ser mencionado que a preparação destas séries temporais de imagens requer esforços substanciais (selecção de imagens, calibração radiométrica, correcção geométrica), mas os avanços nos algoritmos registados nas últimas décadas fornecem soluções confiáveis para esta tarefa. O estudo de Lagadas, por exemplo, revelou resultados cartográficos que permitem a identificação precisa da severidade e extensão da degradação dos pastos [17] e demonstrou que a desertificação, geralmente, não afecta grandes áreas de extensão indefinida, mas que áreas perturbadas e

<sup>7</sup> [http://edc.usgs.gov/guides/landsat\\_tm.html](http://edc.usgs.gov/guides/landsat_tm.html)

<sup>8</sup> [http://www.spotimage.fr/html/\\_php](http://www.spotimage.fr/html/_php)

<sup>9</sup> <http://asterweb.jpl.nasa.gov/>

imperturbadas podem ser arranjadas em padrões espaciais significativos (Figura 8). Resultados semelhantes foram encontrados para pastagens no centro de Creta [18, 19], e trabalho adicional conduzido como parte do Projecto GEORANGE, em áreas afectadas por fogos no SE de Espanha, estabeleceram um quadro de interpretação adequado para eventos de fogo e dinâmica de regeneração pós-fogo [20].

Compreender os impactos da desertificação no bem-estar humano requer que o conhecimento das interações entre factores socioeconómicos e condições do ecossistema seja melhorado. Conceitos avançados de integração tentam, assim, produzir uma representação capaz de ligar processos físicos, ecológicos e socioeconómicos. Isto seria um passo principal no sentido da concepção e avaliação de estratégias destinadas a diminuir as ameaças de desertificação e de degradação em áreas afectadas, e foi portanto formulado como sendo o objectivo central do Projecto Europeu **DeSurvey**.

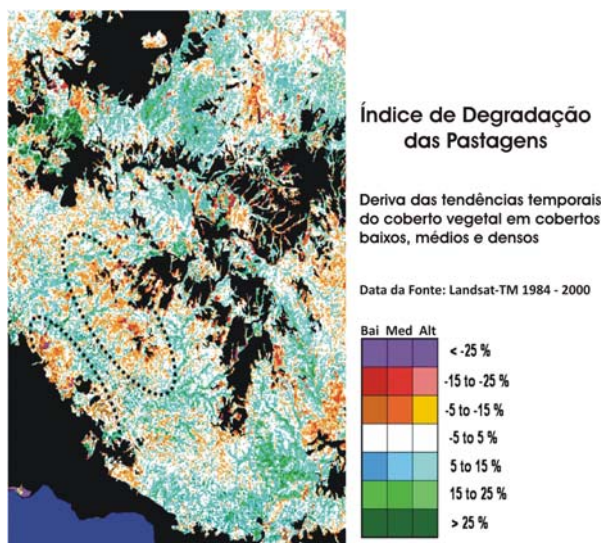


Figura 8. Índice de degradação dos pastos para a área de estudo de Lagadas, obtida da análise de tendência de uma série temporal de 16 anos Landsat-TM (áreas agrícolas a preto, água em azul). Pastos severamente afectados (ver também Figura 6) são indicados pelas linhas a tracejado.

Seguindo esta linha de argumentação, um dos maiores desafios é ligar produtos de satélite a processos de tomada de decisão humanos, que influenciam o uso do solo e, eventualmente, também a dinâmica de degradação da terra. Estratégias adequadas foram propostas para espacializar tanto variáveis socioeconómicas como biofísicas, até à

escala da exploração [21,22], com o objectivo de analisar interações entre processos biofísicos de desertificação e a capacidade dos sistemas socioeconómicos de lidar com estas mudanças. Uma possibilidade é observar trajectórias no espaço bidimensional estabelecido pelas variáveis biofísicas e socioeconómicas até serem ultrapassados limiares de insustentabilidade. No Projecto DeSurvey, este conceito foi usado para avaliar a influência dos subsídios da União Europeia na degradação da terra e o lucro e rendimento de explorações agrícolas na área de Lagadas.

## ESTRATÉGIAS DE INTERVENÇÃO ESPECÍFICAS DOS LOCAIS

A concepção e implementação de estratégias de gestão melhoradas e outras medidas de mitigação requerem amiúde um maior detalhe espacial e a integração de fontes de dados geoespaciais adicionais.

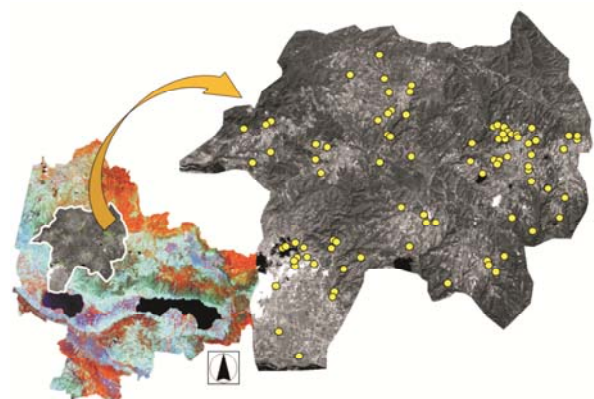


Figura 9. Imagem pancromática Quickbird de alta resolução espacial com pontos de concentração de gados identificados

Sistemas civis de detecção remota multi-espectrais com resolução espacial extremamente elevada estão disponíveis há alguns anos. Embora onerosos, os satélites IKONOS<sup>10</sup> e Quickbird<sup>11</sup> fornecem imagens com detalhe espacial entre 0.7 e 2.5 metros que podem ser vistas em modo pancromático ou multi-espectral. No exemplo acima, um dos requisitos para ligar evidências acerca da degradação física do Ambiente com os condutores socioeconómicos seria identificar a posição dos pontos de concentração de gado (ex. curais) e os trilhos preferidos, que os

<sup>10</sup> <http://www.geoeye.com/products/default.htm>

<sup>11</sup> <http://www.digitalglobe.com/about/quickbird.html>

pastores escolhem de acordo com preferências específicas. Enquanto as imagens na escala Landsat/SPOT/ASTER eram utilizadas com sucesso para avaliar os recursos de pasto, os dados de resolução espacial muito alta do Quickbird eram empregues para cartografar as posições dos currais nas comunidades rurais mais afectadas de Lagadas (Figura 9).

Ligando estas posições a dados geoespaciais adicionais, tais como a distância aos currais, topografia, características do ecossistema (ex. acessibilidade) e conhecimento das preferências dos pastores, é possível traduzir os determinantes principais para o comportamento do gado, em superfícies de fricção espacial, para calcular superfícies de custo acumulado, onde os valores crescentes correspondem a uma probabilidade decrescente de serem pastados e, logo, tendência decrescente de pressão de pastoreio (Figura 10). O padrão espacial dos gradientes de pastoreio (que nesta região têm formas muito mais irregulares que piosferas em extensos pastos homogéneos) fornece a base para formular estratégias de intervenção com esquemas de gestão concebidos de correspondência [17].

10

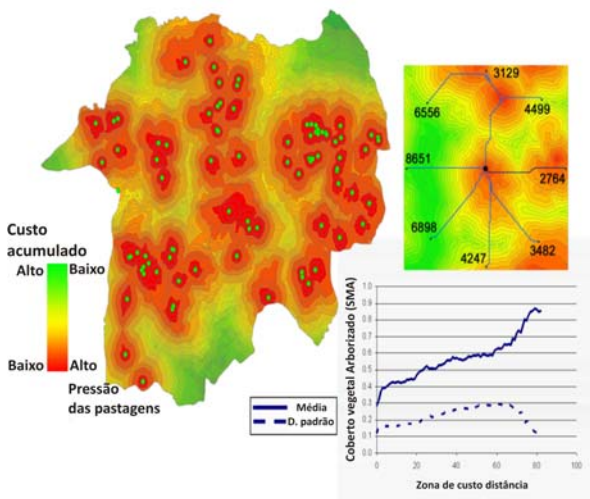


Figura 10. Superfície de custo acumulado para avaliar terreno com animais errantes (ovelhas e cabras), com o perfil do coberto vegetal associado (esquerda em baixo)

## AVALIAÇÃO QUANTITATIVA DE PROPRIEDADES DA SUPERFÍCIE DA TERRA

As estratégias de detecção remota que foram até agora discutidas podem, até certo ponto, ser

aplicadas rotineiramente em qualquer parte dos países afectados em que tal seja requerido. Dados de detecção remota são recolhidos em todo o Mundo, e os cientistas podem entretanto construir as suas estratégias com base em excelentes avanços técnicos e metodológicos que foram alcançados. Foram desenvolvidos sistemas reflectivos ópticos, que cartografam a superfície da Terra com centenas de bandas espectrais estreitas. Estes sensores designados de “hiperespectrais” fornecem dados com conteúdos de informação sem precedentes, de tal forma que se torna possível cartografar minerais e nutrientes nos solos ou a concentração de componentes bioquímicos nas copas da vegetação (clorofila, água, matéria seca).

No contexto da desertificação, tais sistemas de imagem podem ser utilizados para recolher informação sobre a composição do material do solo. o que não só permite discriminar entre solos imperturbados ou degradados (erodidos) [23], mas também estimar concentrações de componentes importantes de formação do solo (ex. carbono orgânico e inorgânico, ferro) [24]. Também as propriedades das copas da vegetação das terras secas podem ser avaliadas, uma vez que causam problemas substanciais aos instrumentos convencionais de detecção remota. O conteúdo da informação espectral disponível é tão mais detalhado que os cientistas podem utilizar modelos de reflectância invertíveis para estimar parâmetros biogeofísicos específicos.

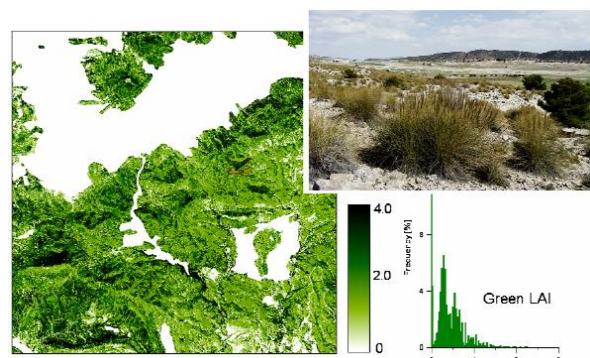


Figura 11: Índice de área de folha verde (LAI) para um ecossistema tipo de terra seca no Sueste de Espanha (bacia do Guadalentin), obtido de dados aéreos hiperespectrais de HyMap

Na Figura 11 é mostrado um exemplo onde os dados do sistema de imagem HyMap<sup>12</sup> com 126 bandas

<sup>12</sup> <http://www.hyvista.com/hyvistaweb/>

espectrais foram utilizados com sucesso em combinação com um modelo geométrico de reflectância da copa para cartografar o índice de folha verde numa comunidade de vegetação típica da Espanha semi-árida [25]. O índice de área de folha (LAI) é uma quantidade biofísica que pode, por exemplo, ser utilizado para prever a produção primária fotossintética, e que desempenha um papel essencial em Ecologia de produção teórica. A disponibilidade de parâmetros quantitativos, por sua vez, estimula o uso de abordagens com modelos na investigação em desertificação, seja para estimar a produção de biomassa, alocação de carbono, estabilidade dos ecossistemas ou outros processos.

Espectroscopia de Imagem, também conhecida como detecção remota hiperespectral (DRH), é uma técnica de imagem capaz de identificar materiais e objectos no ar, terra e água, com base nos padrões únicos de reflectância espectral que resultam da interacção da energia solar com a estrutura molecular do material. Os instrumentos clássicos de detecção remota multi-espectral, tais como o Landsat Thematic Mapper, recolhem dados nalgumas porções selectivamente colocadas de largas porções do espectro. Como resultado de avanços técnicos nos sensores e concepção electrónica, os instrumentos de DRH são capazes de recolher energia electromagnética reflectida ou emitida em centenas de estreitos (~10 nm) canais espectrais ao longo das partes reflectidas e emitidas do espectro electromagnético. Os dados registados providenciam uma informação única, relacionada com a composição estrutural do material, e permitem a identificação de substâncias específicas, tais como minerais, clorofila, materiais orgânicos dissolvidos, constituintes atmosféricos e contaminantes ambientais específicos.

## CONCEITOS DE AVALIAÇÃO INTEGRADA

O objectivo essencial é combinar parâmetros biogeofísicos da superfície da terra, ou substitutos adequados, para produzir indicadores de nível superior da condição da terra. O trabalho pioneiro começou com o Projecto Europeu LADAMER [26], cujo objectivo era explorar uma estratégia de avaliação baseada em implementações de rácios de produtividade primária líquida (PPL). A abordagem baseou-se na premissa de que a precipitação é o

principal factor limitante para determinar a produtividade vegetal local (produtividade primária líquida, PPL), em regiões semi-áridas, e está concentrada num parâmetro chamado “Eficiência de Uso da Chuva” (EUC). Originalmente, a EUC era definida como o rácio da PPL e da precipitação (P) para um determinado período de tempo [27], o que pode ser interpretado como a fracção da precipitação libertada para a Atmosfera através do coberto vegetal.



Figura 12. Paisagem – Sul de Murcia, Espanha

Embora o conceito tenha sido aplicado a estudos em África [28], os cientistas da “Estación Experimental de Zonas Áridas” em Almeria (Espanha)<sup>13</sup> utilizaram toda a Espanha (ca. 494000 km<sup>2</sup>) e Portugal como área de estudo no Projecto **DeSurvey**. Com uma resolução espacial de 1 km<sup>2</sup>, os dados introduzidos consistiram em dados mensais em grelha, no período compreendido entre Setembro de 1996 e Agosto de 2000, contendo as seguintes variáveis: abundância de vegetação conforme obtida da base de dados MEDOKADS (uma variante especial do índice de vegetação, usado como substituto para a PPL); precipitação (P) e temperatura (T), interpolados de estações meteorológicas georreferenciadas e evapotranspiração potencial (ETP).

<sup>13</sup> <http://www.eeza.csic.es/eeza/default.aspx>

Se a EUC é calculada para uma vasta área com fortes gradientes climáticos, em que as áreas secas muitas vezes aparecem com os valores mais altos devido aos seus baixos valores de precipitação (P), isto impede uma comparação directa entre locais com diferentes climas. Para evitar isto, os valores de EUC foram marcados contra um Índice de Aridez (IA) que foi calculado como rácio da P e ETP.

Os limites, superior e inferior de um gráfico de dispersão são interpretados, respectivamente, para transmitir a performance máxima e mínima da vegetação para uma determinada classe de aridez, o que é uma primeira abordagem para retirar tendências climáticas. As funções resultantes podem depois ser modeladas espacialmente, utilizando a camada IA como variável independente, para produzir duas camadas mostrando o máximo e o mínimo esperado de EUC para cada localização do mapa. O último passo foi calcular uma nova camada de informação, mostrando a posição relativa da EUC observada no âmbito da gama formada pelo máximo e mínimo esperado de EUC. A EUC relativa (EUCr) é assumida como reflectindo a condição da vegetação, enquanto a performance observada (em termos do substituto da PPL obtida a partir de satélites integrado ao longo do tempo) com respeito à performance mínima e máxima que pode ser esperada para aquele clima (em termos de IA).

A EUC média observada reflecte a resposta sustentada da vegetação ao seu clima local, e é interpretada como um valor aproximado de biomassa e maturidade. Contudo, os extremos de EUC observados reflectem a resposta a curto prazo se as condições meteorológicas forem adequadas (em termos de P sazonal), e é o melhor valor aproximado para produtividade e resiliência. Essas são duas componentes independentes da performance da vegetação, que capturam a sua condição em termos ecologicamente significativos. O mapa regional resultante da Península Ibérica (Figura 12) parece estar de acordo com a análise de tendência mencionada antes: a maior parte da Península mostra evidências de performance da vegetação em estado estável, ou aumento dentro do período de observação.

Enquanto o conceito anterior assenta em rácios hidrológicos, uma abordagem alternativa para identificar superfícies da terra funcionalmente perturbadas a partir de dados de satélite baseia-se nos rácios de energia [29]. Tendo por base os conceitos anteriores [5], foram desenvolvidos

modelos para estimar a partição da energia superficial disponível em fluxo de calor latente e sensível, utilizando dados de sistemas de satélites com capacidades de detecção térmica. A fracção não evaporativa estimada por satélite é proposta como um indicador eficiente do deficit superficial de água que, por seu turno, é considerado como um indicador primário para sistemas de vegetação degradados.

Contudo, deve sublinhar-se que as mudanças nas condições biofísicas da terra que podem ser identificadas com estas abordagens são importantes, mas ainda não proporcionam uma avaliação completa da degradação da terra ou desertificação. Ligá-las a dados socioeconómicos espacializados e o quadro conceptual dos síndromas ambientais relacionados com a desertificação é importante. O Projecto **DeSurvey**<sup>14</sup>, financiado pela UE, fornece a plataforma para estender, validar, otimizar e integrar estes conceitos.

## PERSPECTIVAS

A desertificação tem expressões diversas, e é sobretudo devido a esta variabilidade de processos e condutores que conceitos unificadores e cartografia largamente aceite da sua ocorrência estão ainda por desenvolver. A detecção remota por satélite pode contribuir substancialmente para a identificação de áreas afectadas e seguir o estado do Ambiente e recursos disponíveis ao longo do tempo. Combinar esta informação com toda a gama de dados meteorológicos recolhidos por satélites, bem como com mapas e mudanças de uso do solo obtidos a partir de dados de satélites fornece capacidades únicas para ligar os processos naturais e condições de fronteira ao quadro socioeconómico da desertificação. A informação da detecção remota pode não só ser usada para determinar o impacto dos processos e factores condutores da desertificação nos sistemas biogeofísicos, mas também servir como suporte indispensável à tomada de decisões e na definição de medidas relevantes para restauro e gestão ambiental.

As abordagens realçadas neste curto fascículo foram retiradas de projectos de investigação Europeus, mas aplicam-se de maneira igual ou similar a síndromas de desertificação, enquanto são desenvolvidos noutras partes do Mundo. Converter as observações a partir do espaço em produtos de informação úteis requer

<sup>14</sup> <http://www.desurvey.net/>

capacidades metodológicas e conceptuais detalhadas; é óbvio que uma descrição pormenorizada está para lá do objectivo deste fascículo, sendo o leitor direccionado para fontes de informação adicionais.

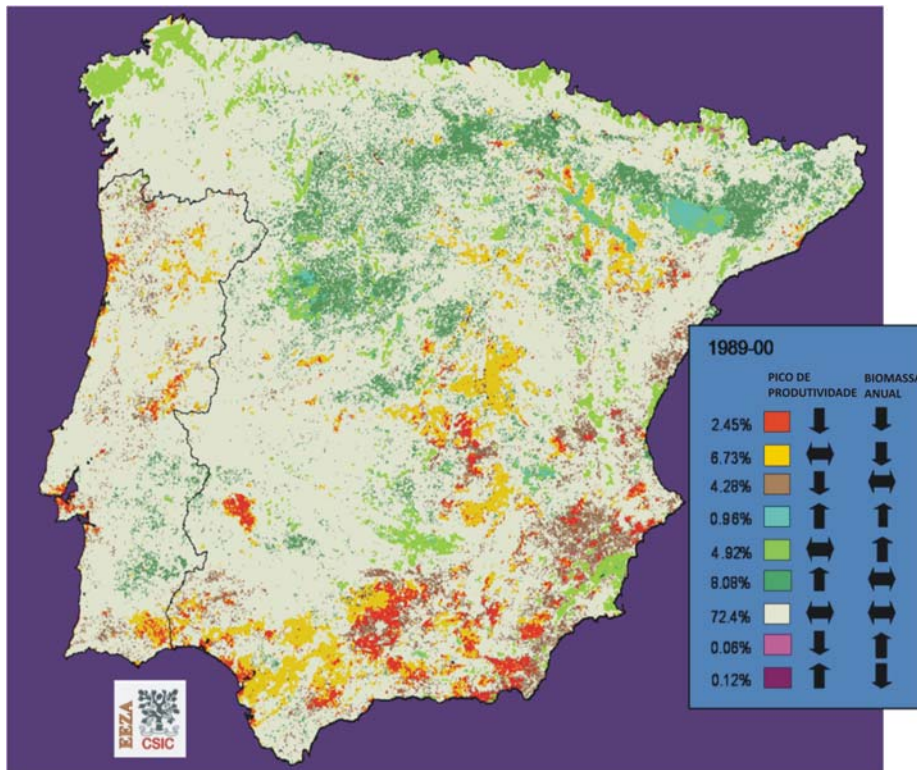


Figura 13. Mudanças cartografadas da EUC Relativa (EUCr) na Península Ibérica, Espanha e Portugal, num período de 10 anos (1989-2000) (Fonte: Estación Experimental de Zonas Aridas, Almeria, Espanha)

## BIBLIOGRAFIA

- [1] UNEP (1992). *World atlas of desertification*. London: Arnold.
- [2] Prince, S.D. (2002). Spatial and temporal scales for detecting desertification. In J.F. Reynolds & D.M. Stafford-Smith (Eds.), *Global desertification. Do humans cause deserts?* (pp. 23-40). Berlin: Dahlem University Press.
- [3] Schowengerdt, R.A. (2006). *Remote sensing. Models and methods for image processing*. San Diego: Academic Press.
- [4] Curran, P.J. (1985). *Principles of remote sensing*. London and New York: Longman.
- [5] Bolle, H.J., Eckardt, M., Koslowsky, D., Maselli, F., Melia-Miralles, J., Menenti, M., Olesen, F.-S., Petkov, L., Rasool, I., & van de Griend, A. (2006). *Mediterranean land-surface processes assessed from space*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer.
- [6] Liang, S. (2004). *Quantitative remote sensing of land surfaces*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons.
- [7] Geist, H. (2005). *The causes and progression of desertification*. Aldershot: Ashgate Publishing Limited.
- [8] Geist, H.J., & Lambin, E.F. (2004). Dynamic causal patterns of desertification. *Bioscience*, 54, 817-829.
- [9] Lüdeke, M.K.B., Petschel-Held, G., & Schellnhuber, H.-J. (2004). Syndromes of Global Change: the first panoramic view. *Gaia*, 13, 42-49.
- [10] Downing, T.E., & Lüdeke, M. (2002). International desertification. Social geographies of vulnerability and adaptation. In J.F. Reynolds & D.M. Stafford-Smith (Eds.), *Global desertification. Do humans cause deserts?* (pp. 233-252). Berlin: Dahlem University Press.
- [11] Helldén, U. (1991). Desertification - time for an assessment. *Ambio*, 20, 372-383.
- [12] Rondeaux, G. (1995). Vegetation monitoring by remote sensing: a review of biophysical indices. *Photo-Interprétation*, 3, 197-212.
- [13] Koslowsky, D. (2003). 12 years Mediterranean satellite data set and analysis. In H.-J. Bolle (Ed.), *Mediterranean climate, variabilities and trends*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer.
- [14] Beguería, S., López-Moreno, J.I., Lorente, A., Seeger, M., & García-Ruiz, J.M. (2003). Assessing the effect of climate oscillations and land-use changes on streamflow in the Central Spanish Pyrenees. *Ambio*, 32, 283-286.
- [15] Gallart, F., & Llorens, P. (2003). Catchment management under environmental change: impact of land cover on water resources. *Water International*, 28, 334-340.
- [16] Hill, J., Hostert, P., & Röder, A. (2004). Long-term observation of Mediterranean ecosystems with satellite remote sensing. In S. Mazzoleni, G. di Pasquale, M. Mulligan, P. di Martino & F. Rego (Eds.), *Recent dynamics of the Mediterranean vegetation*

and landscape (pp. 33-43). Chichester: John Wiley & Sons.

[17] Röder, A., Kuemmerle, T., Hill, J., Papanastasis, V.P., & Tsiourlis, G.M. (2007). Adaptation of a grazing gradient concept to heterogeneous Mediterranean rangelands using cost surface modelling. *Ecological Modelling*, 204, 387-398.

[18] Hill, J., Hostert, P., Tsiourlis, G.M., Kasapidis, P., & Udelhoven, T. (1998). Monitoring 20 years of intense grazing impact on the Greek island of Crete with earth observation satellites. *Journal of Arid Environments*, 39, 165-178.

[19] Hostert, P., Röder, A., Hill, J., Udelhoven, T., & Tsiourlis, G.M. (2003). Retrospective studies of grazing-induced land degradation: a case study in central Crete, Greece. *International Journal of Remote Sensing*, 24, 4019-4034.

[20] Röder, A., Hill, J., Duguay, B., Alloza, J.A., & Vallejo, R. (2008). Using long time series of Landsat data to monitor fire events and post-fire dynamics and identify driving factors. A case study in the Ayora region (eastern Spain). *Remote Sensing of Environment*, 112, 259-273.

[21] Lambin, E.F., Geist, H.J., Reynolds, J.F., & Stafford-Smith, D.M. (2008). Coupled human-environment system approaches to desertification: Linking people to pixels. In A. Röder & J. Hill (Eds.), *Advances in Remote Sensing and Geoinformation Processing for Land Degradation Assessments*: Taylor & Francis, in press.

[22] Rindfuss, R.R., Walsh, S.J., Mishra, V., Fox, J., & Dolcemascolo, G.P. (2003). Linking household and remotely sensed data: methodological and practical problems. In J. Fox, R.R. Rindfuss, S.J. Walsh & V. Mishra (Eds.), *People and the environment: Approaches for linking household and community surveys to remote sensing and GIS* (pp. 1-29). Boston, Dordrecht, London: Kluwer Academic Publishers.

[23] Hill, J., Mehl, W., & Altherr, M. (1994). Land degradation and soil erosion mapping in a Mediterranean ecosystem. In J. Hill & J. Mégier (Eds.), *Imaging spectrometry - a tool for environmental observations* (pp. 237-260). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers:

[24] Hill, J., & Schütt, B. (2000). Mapping complex patterns of erosion and stability in dry Mediterranean ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 74, 557-569

[25] Hill, J., & Mader, S. (2007). Estimating continuous vegetation fields in an arid ecosystem using a coupled leaf-canopy reflectance model at different

spatial/spectral scales. In, *Proceedings 5th EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy, April 23-25 2007*. Bruges, Belgium: EARSeL.

[26] Boer, M. (1999). Assessment of dryland degradation: linking theory and practice through site water balance modelling. In, *Nederlandse Geografische Studies*, 251 Utrecht, Netherlands: University of Utrecht.

[27] Le Houérou, H.N. (1984). Rain use efficiency: A unifying concept in arid land ecology. *Journal of Arid Environments*, 7, 1-15.

[28] Prince, S.D., Brown de Colstoun, E., & Kravitz, L. (1998). Evidence from rain use efficiencies does not support extensive Sahelian desertification. *Global Change Biology*, 4, 359-374.

[29] García, M., Villagarcía, L., Contreras, S., Domingo, F., & Puigdefábregas, J. (2007). Comparison of three operative models for estimating the surface water deficit using ASTER reflective and thermal data. *Sensors*, 7, 860-883.