

# TÉLÉDÉTECTION APPLIQUÉE À L'ÉTUDE DU BIOME CAATINGA: Une Revue De La Littérature

*Remote Sensing applied to the study of the Caatinga biome:  
a literature review*

Admilson da Penha Pacheco<sup>1</sup>

## RÉSUMÉ

Le Nord-Est brésilien a à peu près 80% de sa superficie classée comme semi-aride avec environ 845.000 km<sup>2</sup> de Caatinga (l'équivalent à 11% du territoire du Brésil). Des études sur cet écosystème sont essentielles car ce biome est l'un des plus menacés en raison d'une utilisation inadéquate et non durable des ressources naturelles. Des travaux de recherches scientifique et technique en matière de Télédétection à partir de techniques de traitement d'images multispectrales et multi-temporelles de satellites, conjointement avec des bases de données locales et des cartes, ont été utilisés pour examiner la nature, la tendance et la quantification du processus de surveillance environnementale des unités de conservation. La délimitation et la cartographie de la caatinga sont faites pour établir une base fiable pour sa surveillance spacio-temporelle. Dans ce contexte, cet article a comme objectif de contextualiser, à partir d'une revue de la littérature, la contribution de la télédétection pour l'étude du Biome Caatinga.

**MOTS-CLÉS:** Caatinga. Télédétection. Brésil.

## ABSTRACT

The Brazilian Northeastern has around 80% of its area classified as semi-arid, where about 34 million hectares are called Caatinga vegetation. Some studies in this ecosystem are essential because this biome is one of the most threatened due to inadequate and unsustainable use of natural

---

<sup>1</sup> Professeur Docteur, Professeur Titulaire, Centre de Technologies et de Géosciences, Département d'Ingénierie Cartographique, Université Fédérale de Pernambuco, Recife-PE, Brésil. [pacheco3p@gmail.com](mailto:pacheco3p@gmail.com).

resources. Works of technical and scientific research in remote sensing from multispectral images processing techniques and multi-temporal satellite, together with local databases and maps have been used to examine the nature, trend and quantification of environmental monitoring process of conservation units. The delineation and mapping of the savanna are performed to establish a reliable basis for tracking your timeline. In this context, this article aims to contextualize, from a literature review, the remote sensing contribution to the study of the Caatinga Biome.

**KEYWORDS:** Caatinga. Remote sensing. Brazil.

Submission date: 11/04/2017

Acceptance date: 28/06/2017

## 1 INTRODUCTION

Selon Giulietti *et al.*, (2002), la Caatinga est le type de végétation qui couvre la plus grande partie de la zone à climat semi-aride de la région du Nord-Est du Brésil.

L'élimination partielle ou totale de la végétation dans les zones de la caatinga résulte dans la réduction de la biomasse végétale et dans la diminution de la couverture des sols du semi-aride, des facteurs qui conduisent à une augmentation de la dégradation du biome (COSTA *et al.*, 2009).

Habituellement, la Caatinga est associée à la fourniture de ressources en bois et médicinales, et en raison de la manière de comment sont obtenus certains de ces produits de la nature on n'a pas trouvé de meilleure alternative que celle de la protection complète des zones restantes, en particulier compte tenu de l'utilisation intense de certaines espèces qui ont une distribution éparse et/ou de petites populations (ALBUQUERQUE, 2002). La demande d'utilisation énergétique de la végétation de la caatinga a provoqué des modifications du paysage et une perte de la diversité biologique en raison du manque d'informations sur la gestion des espèces (FIGUEIROA, *et al.*, 2008).

Même étant la seule grande région naturelle brésilienne dont les limites sont entièrement restreintes au territoire national, on a accordé bien peu d'attention à la conservation du paysage hétérogène de la Caatinga (SILVA *et al.*, 2004). Les études dans la région Nord-Est du pays et en particulier dans cet écosystème sont essentielles car ce biome est l'un

des plus menacés en raison d'une utilisation inadéquate et non durable des ressources naturelles. Le Biome Caatinga, exclusivement brésilien, est l'un des plus modifiés par les activités anthropiques au cours des derniers siècles (ALMEIDA *et al.*, 2009).

De nos jours, avec l'amélioration constante des instruments d'acquisition et de traitement des données spatiales, il existe un consensus existant dans les milieux académiques et politiques qu'il est nécessaire d'utiliser d'importantes technologies dont l'objectif principal est la représentation et la quantification des zones de la superficie terrestre pour permettre l'élaboration des diagnostics fins, en particulier ceux liés à l'environnement, vu que ces technologies sont de plus en plus modernes et dynamiques.

Ces nouvelles perspectives scientifiques pour l'analyse environnementale ont comme objectif le paradigme de multidisciplinarité, qui prend en compte les inter-relations et les interactions entre les domaines de connaissance des géosciences et des ingénieries. Ainsi, l'objectif principal pour les différents domaines de la connaissance est de mieux comprendre la distribution spatiale des données issues de phénomènes survenus dans l'espace (CÂMARA *et al.*, 2001).

Les données de Télédétection obtenues par des satellites ont le potentiel de fournir des informations détaillées sur les propriétés spectrales de la superficie terrestre, comprenant des aspects spatiaux et temporels.

Les techniques de Télédétection ont présenté, ces dernières décennies, une évolution majeure grâce à l'apparition de systèmes de capteurs, aériens et orbitaux modernes capables de produire des images multi et hyperspectrales de haute résolution spatiale, temporelle et radiométrique, augmentant la capacité de discriminer, chaque fois mieux, les cibles de la superficie terrestre et en augmentant considérablement les applications liées à l'étude des standards d'utilisation et d'occupation du sol.

Parallèlement à l'évolution des systèmes d'acquisition de données de Télédétection, de nouvelles approches méthodologiques dans le traitement numérique des images sont apparues, optimisant ainsi l'extraction d'informations.

Des images multispectrales et multi-temporelles de satellites, conjointement à des bases de données locales et des cartes, ont été utilisées pour examiner la nature, la tendance et la quantification du processus de surveillance environnementale des unités de conservation. La délimitation

et la cartographie de la caatinga sont faites pour établir une base fiable pour sa surveillance spacio-temporelle (Pacheco et al. 2014).

L'émergence de nouveaux systèmes de capteurs orbitaux, tels que les RapidEye, Landsat-8, WorldView-3 et Sentinel créent une expectative que leurs données permettront une meilleure compréhension de l'évolution des processus de déforestation.

La Télédétection insérée dans l'univers des géotechnologies se présente comme un outil important pour la surveillance du Biome Caatinga, car il permet de classifier et de quantifier les standards spatiaux de toute une mosaïque, au moyen de techniques de traitement numérique d'images.

Dans le contexte présenté, cet article a comme but de contextualiser, à partir d'une revue de la littérature, une contribution de la Télédétection pour la surveillance du Biome Caatinga.

## 2 TÉLÉDÉTECTION APPLIQUÉE À LA CAATINGA

L'élimination partielle ou totale de la végétation dans les zones de la caatinga résulte dans la réduction du stock et de la production de biomasse végétale et dans la diminution de du couvert végétal des sols du semi-aride, des facteurs qui conduisent à une dégradation accrue du biome (COSTA *et al.*, 2009).

À l'heure actuelle, les techniques les plus précises pour l'étude du couvert végétal font référence aux Indices de Végétation tels que le NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), NDWI (*Normalized Difference Water Index*), SAVI (*Soil Adjusted Vegetation Index*) et IAF (*Foliar Area Index*). De tels indices permettent d'évaluer le degré de modification provoquée par l'action de l'homme dans le paysage de la Caatinga, car « ils facilitent l'obtention et la mise en forme de paramètres biophysiques des plantes, telle que la surface foliaire, la biomasse et le pourcentage de couverture du sol, en particulier pour la région du spectre électromagnétique de l'infrarouge, qui peut fournir d'importantes informations sur l'évapotranspiration des plantes » (JENSEN; EPIPHANIO, 2009; EPIPHANIO *et al.*, 1996).

Les indices de végétation résultent de combinaisons linéaires de données spectrales, mettant en évidence le signal de la végétation, qui minimisent les variations du rayonnement solaire et les effets du substrat

du couvert végétal (JACKSON; HUETE, 1991). L'un des indices de végétation les plus utilisés est l'indice de végétation de la différence normalisée (NDVI). Sa simplicité et sa relative haute sensibilité à la densité du couvert végétal ont permis que des comparaisons spatiales et temporelles de l'activité photosynthétique terrestre deviennent possibles, ainsi que la surveillance saisonnière, interannuelle et des variations à long terme des paramètres structurels, phénologiques et biophysiques de la végétation sur une échelle mondiale (WANG *et al.*, 2003). Les indices de la végétation les plus utilisés obtiennent l'information de la réflectance des couvertures relatives à la région du rouge et de l'infrarouge proche lesquels sont combinés sous la forme de raisons (PONZONI, 2001).

Pour la végétation sèche, le NDVI est faible, mais il est élevé pour une végétation en pleine vigueur. Ceci est dû au fait que la pigmentation de la couleur verte de la végétation saine reflète plus dans l'infrarouge proche et moins la bande du visible, ce qui donne des valeurs élevées pour le NDVI (PARKINSON, 1997). Les indices sont indiqués comme des indicateurs de croissance et de vigueur de la végétation et peuvent être utilisés pour diagnostiquer plusieurs paramètres biophysiques avec lesquels ils présentent des corrélations élevées, y compris l'indice de surface foliaire, la biomasse, le pourcentage de couverture du sol, l'activité photosynthétique et la productivité (PONZONI, 2001).

Le NDWI (*Normalized Difference Water Index*) est le résultat de la combinaison des bandes spectrales dans l'infrarouge proche (NIR) et du SWIR (infrarouge à onde courte) avec, donc, le SWIR plus sensible à la quantité d'eau présente dans la végétation et l'humidité du sol (SILVA *et al.*, 2012, p.24).

L'Algorithme SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*) a été développé et validé par Bastiaanssen en 1995 au moyen de campagnes expérimentales en Espagne et en Egypte en utilisant des images du satellite Landsat 5 TM (BASTIAANSEN *et al.*, 1998a). Avec le SEBAL, on obtient le flux de chaleur latente -  $\lambda E$  ( $W m^{-2}$ ) en tant que résidu du bilan énergétique, ce qui se produit après l'obtention du solde de rayonnement -  $R_n$  ( $W m^{-2}$ ), le flux de chaleur dans le sol -  $G$  ( $W m^{-2}$ ) et le flux de chaleur sensible -  $H$  ( $W m^{-2}$ ), dans cet ordre. Cet algorithme a été appliqué dans plusieurs pays, et son utilisation généralisée est due au fait que celui-ci ne demande que des images numériques de capteurs qui

permettent la détermination de l'albédo, des indices de végétation et de la température de la superficie, dans le cas des capteurs TM - Landsat-5, MODIS - Terre, AVHRR - NOAA, ASTER - Terre, et peu de données de superficie. (ALLEN *et al.*, 2002; TASUMI *et al.*, 2008).

L'albédo de la surface est le pourcentage de l'énergie électromagnétique qui est réfléchi par une superficie en fonction de l'énergie qui incide sur elle, en prenant en compte, pour le moins, le spectre électromagnétique du visible (PONZONI; SHIMABUKURO, 2010). Il contrôle le solde de rayonnement sur la superficie terrestre et, par conséquent, le bilan énergétique dans les interactions sol-plante-atmosphère, qui se traduit dans le réchauffage du sol, de l'air et dans l'évapotranspiration de la végétation native ou cultivée (SILVA *et al.*, 2005; MATTAR *et al.* 2014). Dans des systèmes écologiques, l'albédo contrôle les conditions microclimatiques des cultures et l'absorption des rayonnements, affectant les aspects physiques et physiologiques, tels que le bilan énergétique, l'évapotranspiration, la photosynthèse et la respiration (WANG *et al.*, 2001). Cette affirmation montre que la détermination de l'albédo est un paramètre important dans l'étude des impacts des changements climatiques et des impacts environnementaux (SILVA *et al.*, 2005).

L'évapotranspiration est variable dans le temps en raison de la variabilité du climat (ALLEN *et al.*, 2002). Ainsi, les images de satellite deviennent un outil important pour la cartographie et l'évolution temporelle de l'évapotranspiration. Comparoé *et al.* (2008) qualifient le potentiel des images de Téledétection par satellite afin d'examiner des standards spatiaux de distributions régionales d'évapotranspiration.

Kazmierczak (1996) a établi une méthodologie pour la détection d'indices normalisés de végétation de la caatinga, en tant que facteur déterminant dans la détection de zones désertifiées, à partir de séries temporelles du satellite nord-américain météo AVHRR/NOAA et du croisement avec des données pluviométriques de stations dans le semi-aride brésilien. l'auteur a noté que « plus l'indice de végétation est grand, plus la phytomasse verte est dense », car dans la mesure où la végétation augmente, la réflexion dans la bande de l'infrarouge proche augmente également, tandis que la réflexion dans la bande rouge diminue, faisant que le rapport entre elles soit amélioré, faisant ressortir la végétation (apud FREIRE; PACHECO, 2011, p. 45).

Costa *et al.*, (2001) ont présenté une méthode pour la cartographie de la phytomasse de la caatinga, sur la base de l'indice de la Surface de Plante et sur le NDVI, obtenus avec des données du capteur LandSAT 7 ETM+.

Gurgel *et al.* (2003) ont analysé la variabilité du NDVI sur le Brésil, en utilisant l'analyse de groupes. Les analyses ont été faites au moyen d'images NOAA/AVHRR sur la période allant de janvier 1982 à décembre 1993. Dans le cas de la région nord-est du Brésil, la caatinga montre un cycle annuel bien défini, avec une saison sèche marquée, étant entendu que les valeurs les plus élevées de NDVI apparaissent entre les mois d'avril et de mai, qui est la fin de la saison des pluies, et les plus basses en septembre et en octobre (GURGEL, *et al.*, 2003). Conformément à Gurgel *et al.*, (2003), la plus grande corrélation entre le NDVI et la quantité de précipitations apparaît quand on compare les valeurs de NDVI avec les précipitations du mois précédent.

Melo (2003) a utilisé des données de NDVI obtenus à partir d'images AVHRR/NOAA pour estimer l'indice de Surface Foliaire (IAF) et la fraction de la végétation dans la région Nord-Est. Ils ont introduit ces données dans le modèle régional de prévision météo RAMS (Regional Atmospheric Modeling System).

Jacóbsen *et al.* (2004) ont affirmé que, en plus de donner un aperçu de comment le couvert végétal est distribué sur la superficie, le NDVI permet une étude de la dynamique du couvert, mettant en évidence les variations présentées par celui-ci en raison de situations climatiques isolées, des cycles phénologiques annuels et d'événements épisodiques. Wessels *et al.*, (2004) a comparé la saisonnalité obtenue du NDVI du AVHRR/NOAA pour identifier la quantité de zones dégradées et non dégradées, cartographiées par le NCL (National Land Cover), en utilisant l'image du Landsat-5/TM pour la même type de sol et de climat dans le nord de l'Afrique du Sud. Les résultats ont montré que la résistance et la stabilité de la végétation sur les deux n'ont subi aucun grand changement pour les zones dégradées et non dégradées.

Lopes (2005) a utilisé l'albédo et la température dans l'identification des zones dégradées dans le bassin de la Rivière Brígida PE, concluant que l'utilisation de la Télédétection et de paramètres biophysiques peut être utile comme indicateurs de dégradation de l'écosystème. L'augmentation considérable de la température dans le bassin peut être

associée à la déforestation, affectant la microfaune du sol responsable de la décomposition de la matière organique et de son aération (LOPES, 2005).

Braga *et al.* (2006) ont utilisé des images AVHRR/NOAA pour estimer la distribution spacio-temporelle de la végétation dans l'est de Bahia. Ils ont vérifié que dans les années 1980, il y a eu une réduction de la végétation Caatinga, tandis que dans les années 1990, la végétation a augmenté dans la Caatinga.

Selon Liu *et al.*, (2006), la température de la superficie peut être un paramètre clé pour de nombreuses études sur l'environnement. Herb *et al.* (2008) ont développé un modèle pour déterminer la température de la superficie (LTS) pour l'identification des diverses utilisations et du couvert végétal de la superficie, lequel peut être utilisé pour différencier des changements sur la superficie. Julien et Sobrino (2009) ont innové au moment de cartographier le Solde de Rayonnement en n'utilisant uniquement que des produits MODIS.

Selon Barbosa *et al.*, (2006), les valeurs du NDVI dans le nord-est du Brésil augmentent dans la mesure où il y a une augmentation des précipitations en raison de l'augmentation de la densité et de la vigueur de la végétation et diminue considérablement dans les années sèches.

Carvalho (2007) a évalué la désertification dans le Sud-Ouest de l'État du Piauí, grâce à des techniques de télédétection à l'aide d'une série temporelle d'images Landsat-5/TM pour montrer la dynamique des classes d'utilisation du sol dans la région. Et il a conclu que les images Landsat ont été efficaces pour détecter une tendance à l'augmentation de la zone dégradée dans la région de Gilbués au cours des dernières années.

Accioly *et al.* (2007) ont étudié le potentiel de la télédétection hyperspectrale dans l'étude des pertes de sol dans une zone pilote du Seridó (RN) en processus de désertification. Dans cette étude, ils ont comparé les courbes spectrales de Sols « inaltérés » et de sols dégradés en utilisant le spectroradiomètre FieldSpec Pro FR (ASD, 2006), en opérant dans la plage spectrale de 400 à 2.500 nm avec un intervalle d'échantillonnage de 1 nm dans des conditions d'éclairage artificiel. Les combinaisons de courbes spectrales entre des sols « préservés » et érodés ont été en mesure d'évaluer la profondeur de la couche retirée par l'érosion (ACCIOLY *et al.*, 2007).



Selon Chaves *et al.*, (2008), pour chaque biome de caatinga représentatif d'une région physiographique d'étude il est nécessaire d'établir une valeur de référence de la biomasse pour une condition de préservation maximum; seulement ainsi il est possible de faire l'estimation du volume de la biomasse pour les autres zones d'étude, en multipliant simplement le volume standard de référence par la surface considérée et par l'IBVL (indice de la biomasse pour la condition de végétation) obtenu de la description de la végétation. Le NDVI a présenté une corrélation avec la quantité de biomasse mesurée par la méthode directe destructive (COSTA *et al.*, 2002, VIANA *et al.*, 2009) et l'indice de la zone végétale (COSTA *et al.*, 2002).

Silva *et al.* (2008) ont utilisé une Image du satellite CBERS-2 CCD, de 2007, pour estimer la réflexion et le NDVI du couvert végétal dans la municipalité de Brejo da Madre de Deus/PE, dans l'objectif de permettre le diagnostic et la surveillance de la végétation. Les résultats ont montré qu'environ 56% de la zone de végétation a vu sa vigueur et la densité de sa végétation augmenter avec l'augmentation de l'altitude et que la végétation basse et éparse a occupé environ 40% de la zone étudiée. Le diagnostic fournit des informations initiales qui permettent le suivi de l'altération de la biodiversité végétale dans une municipalité du semi-aride du nord-est en raison des diverses activités anthropiques (SILVA *et al.*, 2008).

Silva *et al.* Al., (2009) ont utilisé les indices de végétation NDVI et NDWI, la température de la superficie et des données climatiques dans le but d'obtenir une évaluation spatio-temporelle de la végétation dans la municipalité de Petrolina - PE en 1991, au moyen de l'analyse d'images de 1991, 1997 et 2001, sur les périodes sèche et pluvieuse. Lors des analyses des indices de végétation, de meilleurs résultats ont été obtenus au cours de la période pluvieuse pour le NDWI et au cours de la période sèche pour le NDVI. En ce qui concerne la corrélation entre les indices et la température de la superficie il a été observé dans les résultats que les températures les plus élevées durant les périodes sèches étaient les mêmes avec des valeurs inférieures de NDVI, et vice-versa (SILVA *et al.*, 2009). En ce qui concerne les périodes pluvieuses on a pu observer de plus basses températures dans les endroits où il y avait des valeurs plus élevées pour les deux indices de végétation (NDVI et NDWI). (SILVA

*et al.*, 2009). Ferreira *et al.* (2012) ont obtenu des résultats similaires en utilisant des images de 1991, 1992, 2000 et 2009.

Costa *et al.* (2009) ont utilisé des images multi-temporelles du capteur TM/Landsat de l'époque sèche pour appliquer un modèle développé à partir de paramètres biophysiques et d'un Potentiel Naturel d'Érosion (PNE) dans l'évaluation de processus de dégradation et l'identification des zones à risque de désertification du Bassin Hydrographique de la rivière Brígida. Les résultats ont montré une augmentation du niveau de dégradation (suppression du couvert végétal natif, suivie d'érosion), révélant ainsi le potentiel du modèle afin de déterminer les risques de désertification (COSTA *et al.*, 2009).

Dantas *et al.*, (2010) a utilisé des données du système de capteurs AVHRR / NOAA et Landsat-5/TM pour trouver un rapport fonctionnel entre l'albédo, l'Indice de Végétation de la Différence Normalisée (NDVI), l'Indice de Végétation Ajusté au sol (SAVI) et l'Indice de Surface Foliaire (IAF) et la Fraction sur la végétation dans divers endroits près de Quixeré - CE (apud, PACHECO *et al.*, 2014). Les résultats ont montré des différences dans la variabilité spatiale et temporelle de l'albédo au cours des deux années de l'étude. Le rapport fonctionnel entre les données AVHRR et TM a montré un coefficient de corrélation ( $r$ ) égal à 0,75 avec un écart type de 1,67% (DANTAS *et al.*, 2010).

Silva et Santos (2011) ont évalué l'utilisation d'images ALOS/PALSAR dans la caractérisation et la cartographie de l'utilisation et du couvert de la terre dans le semi-aride du Brésil à partir d'algorithmes de classification MAXVER-ICM et de Wishart, impliquant des paires et/ou l'ensemble de composants dérivés de la matrice de covariance [AHH, A HVe AHH\*HV]. Des relevés physiologiques et structurels des faciès de caatinga et également de points d'observations des typologies d'utilisation et de couvert de la terre, dûment géoréférencés, ont servi comme échantillons d'entraînement et d'étalonnage thématique, définissant ainsi les classes suivantes d'utilisation et de couvert de la terre pour la zone en étude: caatinga boisée, caatinga boisée-arbustive, caatinga arbustive, agriculture et plans d'eau. La procédure méthodologique appliquée a montré que le meilleur résultat a été obtenu au moyen de la classification MAXVER-MCC, présentant une précision globale de 66% et un indice Kappa de 0.58 (SILVA; SANTOS, 2011).

Rêgo *et al.*, (2012) ont analysé les résultats des Indices de Végétation SAVI et NDVI dans la municipalité de São Domingos-PB obtenus à partir d'images Landsat 5 TM de 2009 et 2010. Les indices de végétation NDVI et SAVI ont présenté des résultats satisfaisants en ce qui concerne la représentation de la végétation de la zone étudiée. Malgré la différence dans la représentation de valeurs minimales et maximales entre les indices, la différence sur les cartes thématiques a été presque imperceptible (RÊGO *et al.*, 2012).

Cunha *et al.*, (2012) ont réalisé une analyse multi-temporelle de variables biophysiques dérivées d'images du satellite Landsat/TM-5 à partir de techniques de traitement numérique d'images du Bassin de São João do Rio do Peixe (Paraíba/Brésil) sur une période de 23 ans. Selon les auteurs, les résultats obtenus indiquent une récupération du couvert végétal, plus évidente dans les régions les plus vallonnées du bassin hydrographique, un fait lié à l'exode de la population rurale survenu au cours de la période d'étude. Il a été également démontré que l'albédo de la superficie a été le paramètre qui s'est le mieux corrélé aux variations de la biomasse végétale (CUNHA *et al.*, 2012).

Leivas *et al.*, (2013) ont réalisé des études multi-temporelles dans l'état de Bahia et ont prouvé que, dans les différentes périodes de disponibilité hydrique, le NDWI est un indicateur d'altérations provoquées par le manque en eau et l'élimination du couvert végétal.

Bezerra (2013) a évalué la dynamique spacio-temporelle dans l'unité de conservation du Parc National da Furna Feia et de ses environs (municipalité de Mossoró RN, Brésil), à partir d'images Landsat TM 5 et de l'algorithme Sebal. La recherche a conclu que le modèle SEBAL a été efficace afin de cartographier la distribution spatiale des paramètres biophysiques et d'évapotranspiration (ET) réelle quotidienne dans la zone semi-aride de Caatinga. Les cartes thématiques d'ET (SEBAL24h) ont démontré des valeurs élevées dans les régions de végétation native de Caatinga de l'ordre de 2,0 à 8,0 mm.jour<sup>-1</sup> pour les périodes de sécheresse et d'hiver, respectivement. Dans toutes les scènes analysées, les plus grandes valeurs d'ET se situent dans des zones de couvert végétal dense de Caatinga, à de hautes altitudes (BEZERRA, 2013).

Francisco *et al.*, (2013) ont utilisé des images de satellites, des techniques de traitement d'images, de géotraitement et de relevé sur le

terrain, pour la description de la végétation de caatinga dans le Bassin hydrographique de la rivière Taperoá (Paraíba/Brésil). Grâce à l'utilisation d'images satellites de résolution spatiale moyenne, du NDVI et de l'IBVL (Indice de Biomasse de la Végétation Ligneuse) en plus des programmes ERDAS et SPRING, il a été possible de classer et de cartographier les typologies de végétation de Caatinga dans la zone d'étude avec une bonne précision et rapidité, en obtenant des résultats satisfaisants (FRANCISCO *et al.*, 2013).

Lopes *et al.*, (2014) ont réalisé des études de bilan énergétique dans la région d'Itaparica (PE et BA), comportant une modélisation et une cartographie de paramètres physiques et biophysiques à partir d'images MODIS et de l'algorithme SEBAL dans une zone de végétation de caatinga et d'agriculture irriguée. Les auteurs ont montré qu'il a été possible d'appliquer le modèle sinusoïdal pour déterminer le solde de rayonnement maximum et moyen quotidien en prenant en compte les divers utilisations et couverts végétaux, cependant il est nécessaire de comparer avec des données sur le terrain pour la validation de ce modèle lié à l'écosystème caatinga et les cultures irriguées de manière à évaluer la qualité des estimations de chaque variable (Lopes *et al.*, 2014).

Bezerra *et al.*, (2014) ont réalisé une étude sur la dynamique spacio-temporelle de la Caatinga dans le Semi-aride du Rio Grande Unité de Conservation du Parc National da Furna Feia et ses environs, située entre les municipalités de Mossoró et de Baraúna (RN, Brésil). Le travail a impliqué dans la mise en œuvre d'algorithmes pour la production de cartes thématiques exprimant la variabilité des paramètres: albédo de la superficie, NDVI et la température de superficie. Les résultats obtenus ont été conformes aux données de la littérature pour les différentes utilisations du sol et les variations climatiques, ainsi que de démontrer le potentiel des géo-technologies, la compréhension de la dynamique des standards spatiaux et temporels des processus biophysiques d'interaction sol-plante-atmosphère de la Caatinga dans le Semi-aride (Bezerra *et al.*, 2014).

Júnior *et al.*, (2014) ont étudié la relation entre le NDVI et la biomasse estimée avec l'utilisation d'équations allométriques dans une zone de caatinga hyper-xérophilique, afin d'ajuster un modèle de régression linéaire qui permet l'estimation de la biomasse ligneuse dans les zones de caatinga. Ils ont utilisé des images Landsat-5/TM de 2011. La

régression linéaire entre l'IVDN et la biomasse a obtenu un coefficient de détermination  $R^2 = 0,70$  et un écart-type de 8,43 t.h-1: l'erreur de prédiction de l'estimation de la biomasse, calculée par une validation croisée (JÚNIOR *et al.*, 2014).

Cunha *et al.*, (2014) ont utilisé des techniques de télédétection pour la classification d'images Landsat/TM-5 et l'analyse des produits du capteur MODIS-TERRA au moyen de séries temporelles dans un bassin du semi-aride de la Paraíba. Ils ont conclu qu'il a été possible de comprendre la dynamique interannuelle du couvert végétal du sol dans le bassin étudié et qu'il a été possible d'identifier une grande variabilité interannuelle de la végétation et l'influence conséquente sur la température de superficie et les processus hydrologiques (CUNHA *et al.*, 2014).

Nascimento et Araújo (2014) ont analysé la corrélation entre la moyenne des précipitations avec le NDVI à partir d'images Landsat-5/TM et du SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithms for Land*) dans une partie de la micro-région de Mossoró localisée dans la région ouest de l'État du Rio Grande do Norte. Les résultats ont montré une bonne corrélation entre les valeurs moyennes des précipitations avec le NDVI moyen, suggérant que l'utilisation de valeurs moyennes a une bonne représentation de variabilité (A114-2014). L'analyse spatiale et temporelle de l'IVDN moyen conformément aux précipitations moyennes semestrielles a permis de trouver un rapport fonctionnel entre ceux-ci, au moyen du modèle de régression de minimums carrés dans l'ouest du Rio Grande do Norte montrant un rapport significatif ( $r = 0,81$ ) entre les informations avec une erreur type d'estimation de l'ordre de 4,99% (NASCIMENTO; ARAÚJO, 2014).

Cunha *et al.*, (2015) ont présenté les initiatives du projet *EU Brazil Cloud Connect* pour la diffusion des données obtenues par des capteurs orbitaux et des outils d'analyse multi-temporelle et l'analyse des tendances de changements sur la superficie terrestre. Le projet *EU Brazil Cloud Connect* réunit des applications et des services pour donner appui aux études sur les rapports entre la biodiversité et le changement climatique. Par conséquent, des outils de *cloud computing* seront utilisés pour le traitement de l'algorithme SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm*) pour une série supérieure à 30 ans d'images orbitales pour tout le semi-aride brésilien et des services web pour la visualisation, l'analyse et la disposition pour des décideurs et la communauté scientifique (CUNHA

*et al.*, 2015). Des résultats préliminaires ont été obtenus pour le NDVI et l'Évapotranspiration.

### 3 CONSIDÉRATIONS FINALES

Historiquement, les sécheresses ont été identifiées comme étant la cause des grands problèmes du semi-aride, bien que l'on sache que celles-ci ne font qu'aggraver les séquelles éco-sociales de la région. Dans la recherche de solutions à ces problèmes, on a eu recours à diverses stratégies la plupart d'entre-elles, cependant, se basant sur l'importation de modèles, de technologies et d'intrants qui, par la suite, se sont avérés inadéquats (PEGADO, 2006). Selon Pegado (2006), dans le cas du biome Caatinga, on constate l'absence d'informations scientifiques y compris même les approches de base telles que, par exemple, la succession écologique, la structure phytosociologique des différentes physionomies, la dynamique de régénération, entre autres (apud, PACHECO *et al.*, 2014).

La caatinga en plus d'être rigoureusement frappée par la sécheresse, souffre d'un processus de dévastation causé par l'homme. Par conséquent, les technologies qui permettent de cartographier les processus de désertification sont d'une importance fondamentale pour la protection des zones naturelles encore existantes et également, pour la récupération de zones dégradées de l'environnement (PACHECO *et al.*, 2014).

Parallèlement à l'évolution des systèmes d'acquisition de données de Télédétection, de nouvelles approches méthodologiques en traitement numérique d'images et des améliorations sur les méthodologies déjà existantes ont surgi, optimisant ainsi l'extraction d'information d'images d'unités de conservation.

Des aspects théoriques de l'état de l'art de la télédétection liée à l'étude de la caatinga ont été présentés dans ce travail afin de fournir une contribution technique et scientifique au développement de travaux futurs sur ce thème.

### RÉFÉRENCES

ACCIOLY, L. J. O.; MACEDO, M. R. O. B.; PACHECO, A. P.; SILVA, E. A.; LOPES, H. L.; IRMAO, R. A.; ALVES, E. S. .Potencial do sensoriamento remoto hiperespectral no estudo das perdas de solo em uma área piloto do Seridó (RN) sob processo de desertificação. In: XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento

Remoto, 2007, Florianópolis. *Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 2007.

ALBUQUERQUE, U. P.; ANDRADE, L. H. C. Conhecimento botânico tradicional e conservação em uma área de caatinga no estado de Pernambuco, Nordeste do Brasil. *Acta Botanica Brasilica*, São Paulo, v. 16, n. 3, p.273-285, 2002.

ALLEN, R.G., TASUMI, M.; TREZZA, R.; BASTIAANSEN, W.G.M. SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land). *Advance Training and Users Manual–Idaho Implementation, version*, v. 1, p. 97, 2002.

ALMEIDA, S. A. S.; FRANÇA, R. S.; CUELLAR, M. Z. Uso e ocupação do solo no Bioma Caatinga do Estado do Rio Grande do Norte. *Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Natal – RN, Brasil p. 5555-5561, 25 a 30 de abril de 2009.

ASD. Spectroradiometers – FieldSpec Pro Line, the benchmark. Disponível em: <<http://www.asdi.com/products-FSP.asp>>. Acesso em: 02 fev. 2006.

BARBOSA, H. A.; HUETE, A. R.; BAETHGEN, W. E. A. 20 year study of IVDN variability over the Northeast Region of Brasil. *Journal of Arid Environments*, v. 67, p. 288-307, 2006.

BASTIAANSEN, W. G. M.; MENENTI, M.; FEDDES, R. A. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. *Journal of hydrology*, v. 212, p. 198-212, 1998.

BEZERRA, J. M. *Estimativa da evapotranspiração real para área de caatinga utilizando SEBAL*. 2013. 77 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Agrícola, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, Pernambuco, 2013.

BEZERRA, J. M.; MOURA, G. B de A.; SILVA, B.B.; LOPES, P.M. O.; SILVA, E. F. de F. Parâmetros biofísicos obtidos por sensoriamento remoto em região semiárida do estado do Rio Grande do Norte, Brasil *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.18, n.1, p.73–84, 2014.

BRAGA, C. C.; NEVES, D. G.; BRITO, J. I. Estimativa da fração vegetação no leste da Bahia no período de 1982 a 1999. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v. 14, n.3, p.252 – 260, 2006.

CÂMARA, G.; DAVIS. C.; A. M. MONTEIRO; J. C. D’ALGE. *Introdução à Ciência da Geoinformação*. 2 ed. São José dos Campos-Brasil: INPE, 2001.

CARVALHO, C. M. *Avaliação da desertificação no Sudoeste do Estado do Piauí-PI, através de técnicas de sensoriamento remoto*. São Jose dos Campos: INPE, 2007.

CHAVES, I. DE B.; LOPES, V. L.; FOLLIOTT, P. F.; PAES-SILVA, A. P. Uma classificação morfo-estrutural para descrição e avaliação da biomassa da vegetação da caatinga. *Revista Caatinga*, v. 21, n. 2, p.204-213, 2008.

COMPAORÉ, H.; HENDRICKX, J. M.; HONG, S., FRIESEN, J.; VAN DE GIESEN, N. C.; RODGERS, C. Evaporation mapping at two scales using optical imagery in

the White Volta Basin, Upper East Ghana. *Physics and Chemistry of the Earth*, v.33, p.127-140, 2007.

COSTA, T. C. C.; OLIVEIRA, M. A. J.; ACCIOLY, L. J. O.; SILVA, F. H. B. B. Análise da degradação da caatinga no núcleo de desertificação do Seridó (RN/PB). *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 13, p. 961-974, 2009.

COSTA, T. C. E. C.; ACCIOLY, L. J. O.; OLIVEIRA, M. A. J.; BURGOS, N.; SILVA, F. H. B. Phytomass mapping of the Seridó Caatinga vegetation by the plant área and the normalized difference vegetation indeces. *Scientia Agrícola*, Piracicaba, v. 59, n. 4, p. 707-715, 2002.

COSTA, T.; ACCIOLY, L.; OLIVEIRA, M.; BURGOS, N.; SILVA, F. Mapeamento da Fitomassa da Caatinga do Núcleo de Desertificação do Seridó, pelo Índice de Área de Planta (IAP) e o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI), obtido com dados do Sensor Landsat 7 TM. *Anais... X Simpósio Brasileiro De Sensoriamento Remoto*, Foz do Iguaçu, p. 1563-1573, 2001.

CUNHA, J. E. B. L.; TAVEIRA, I. M. L. M.; RUFINO, I. A. A.; ALCANTRARA, H. M. Dinâmica Sazonal da Cobertura do Solo em uma Região Semiárida e seus Impactos no Ciclo Hidrológico. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 19, p. 197-207, 2014.

CUNHA, J. E. B. L.; RUFINO, I. A. A.; BRITO, L. K. F. L.; SOUSA JUNIO, S. S.; RODRIGUES, A. J. S. Computação em nuvem e sensoriamento remoto nos estudos dos efeitos das mudanças climáticas na biodiversidade do semiárido brasileiro. In: XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - João Pessoa-PB. *Anais...*, 2015, p. 7397-7404.

CUNHA, J. E. de B. L.; RUFINO, I. A. A.; SILVA, B. B. da; CHAVES, I. de B. Dinâmica da cobertura vegetal para a Bacia de São João do Rio do Peixe, PB, utilizando-se sensoriamento remoto. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.16, p.539-548, 2012.

DANTAS F. R. C.; BRAGA C. C.; SOUZA E. P.; SILVA S. T. A. Determinação do albedo da superfície a partir de dados AVHRR/NOAA e TM/LANDSAT-5. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 25, n.1, p. 24-31, 2010.

EPIPHANIO, J. C. N.; GLERIANI, J. M.; FORMAGGIO, A. R.; RUDORFF, B. F. T. Índices de vegetação no sensoriamento remoto da cultura do feijão. *Pesquisa agropecuária brasileira*, Brasília, v. 31, n. 6, p. 445-454, 1996.

FERREIRA, J. M. S.; FERREIRA, H. S.; SILVA, H. A.; SANTOS, A. M.; GALVINCIO, J. D. Análise Espaço-Temporal da Dinâmica da Vegetação de Caatinga no Município de Petrolina-PE. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 4, p.904-922, 2012.

FIGUEIRÔA, J. M., ARAÚJO, E. L., PAREYN, F. G. C., CUTLER, D. F., GASSON, P., LIMA, K. C., SANTOS, V. F. Variações sazonais na sobrevivência e produção



de biomassa de *Caesalpinia pyramidalis* Tul. após o corte raso e implicações para o manejo da espécie. *Revista Árvore*, v. 32, n. 6, p. 1041-1049, 2008.

FRANCISCO, P.R.M.; LIMA, E.R.V. de; CHAVES, I.B.; CHAVES, L.H.G. Uso de geotecnologias e de técnicas de descrição e levantamento em campo no mapeamento das tipologias de caatinga da Bacia Hidrográfica do rio Taperoá, PB. In: Simpósio Internacional de Geografia Agrária, 6, 2013, João Pessoa. *Anais...* João Pessoa: UFPB, 2013. Disponível em: <http://www.ppgsufpb.com.br/vi-simposio-internacional-de-geografia-agraria/>. Acesso em: 12 jan. 2017.

FREIRE, N. C. F.; PACHÊCO, A. da P. *Desertificação: análise e mapeamento*. Recife-PE: Editora Universitária UFPE, 2011.

GIULIETTI, A.M.; HARLEY, R.M.; QUEIROZ, L.P.; BARBOSA, M.R.V.; BOCAGE NETA, A.L.; FIGUEIREDO, M.A. Espécies endêmicas da caatinga. *Vegetação e flora da caatinga*, p. 103-115, 2002.

GURGEL, H. da C., Estudo da variabilidade do NDVI sobre o Brasil, utilizando-se a análise de agrupamentos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 7, n. 1, p.85-90, 2003.

HERB, W. R.; JANKE, B.; MOHSENI, O.; STEFAN, H. G. Ground surface temperature simulation for different land covers. *Journal of Hydrology*, v.356, p.327-343, 2008.

JACKSON, R. D.; HUETE, A. R. Interpreting vegetation indices. *Preventive veterinary medicine*, v. 11, n. 3-4, p. 185-200, 1991.

JACÓBSEN, L. O.; FONTANA, D. C.; SHIMABUKURO, Y. E. Efeitos associados a El Niño e La Niña na vegetação do estado do Rio Grande do Sul, observados através do NDVI/NOAA. *Revista brasileira de meteorologia*, Brasília, v. 19, n. 2, p. 129-140, 2004.

JENSEN, J. R.; EPIPHANIO, J. C. N. *Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres*. São José dos Campos: Parêntese Editora, 2009.

JULIEN, Y.; SOBRINO, J. A. The yearly land cover dynamics (YLCD) method: An analysis of global vegetation from NDVI and LST parameters. *Remote Sensing of Environment*, v.113, p.329-334, 2009.

JÚNIOR, C. de L.; ACCIOLY, L. J. O.; GIONGO, V.; LIMA, R. L. F. A., SAMPAIO, E. V. S. B, MENESES, R. S. C., Estimativa de biomassa lenhosa da caatinga com uso de equações alométricas e índice de vegetação. *Scientia Forestalis*, Piracicaba, v. 42, n. 102, p. 289-298, 2014.

KAZMIERCZAK, M. Uso de dados AVHRR/NOAA GAC para análise da sazonalidade da caatinga. *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, v. 8, p. 513-518, 1996.

LEIVAS, J. F.; ANDRADE, R. G.; VICENTE, L. E.; TORRESAN, F. E.; VICTORIA, D. C.; BOLFE, E. L. Monitoramento da seca de 2011/12 a partir do NDWI e NDVI padronizado do SPOT-Vegetation, anais *XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Foz do Iguaçu, Brasil, 13 - 18 abril 2013, INPE, p. 364-370.

- LIU, Y., HIYAMA, T., YAMAGUCHI, Y. Scaling of land surface temperature using satellite data: A case examination on ASTER and MODIS products over a heterogeneous terrain area. *Remote Sensing of Environment*, v.105, p.115-128, 2006.
- LOPES, H. L. *Modelagem de parâmetros biofísicos para avaliação de risco à desertificação*. 1999. 101 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências Geodésicas e Tecnologia da Informação, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, 2005.
- LOPES, HL ; SILVA, B. B. ; PACHÊCO, A. P. Distribuição espacial do saldo de radiação e do fluxo de calor no solo no território de Itaparica, Nordeste do Brasil. RBC. *Revista Brasileira de Cartografia (Online)*, v. 66, p. 233-244, 2014.
- MATTAR, B.F.; SOBRINO, J.A.; CORBARI, C.; JIMÉNEZ-MUNOZ, J.C.; OLIVEIRAGUERRA, L.; SKOKOVIC, D.; SÓRIA, G.; OLTRA-CARRIÓ, R.; JUKIEN, Y.; MANCINI, M. Impacts of the broadband albedo on actual evapotranspiration estimated by S-SEBI model over an agricultural area. *Remote Sensing of Environment*, v. 147, p. 23-42, 2014.
- MELO, M. L. D. de. *Efeito da vegetação em simulações numéricas com o modelo RAMS*. 2003. 108 f. Tese (Doutorado) - Curso de Meteorologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande - Pb, 2003.
- NASCIMENTO, F. C. A. ; ARAÚJO, F. R. C. D. . Estudo comparativo entre o IVDN e a precipitação na região oeste potiguar. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável* , v. 9, p. 269-274, 2014.
- PACHECO, A. da P.; LUCAS, A. de A.; SILVA, B. B.; MARIANO, G. Desertificação: Contextualização e Sensoriamento Remoto. *Estudos Geológicos*, v. 24, p. 2, 2014.
- PARKINSON, C. L. *Earth from above: using color-coded satellite images to examine the global environment*, University Sciences Books, Sansalito. Land vegetation, 1997.
- PEGADO, C. M. A., ANDRADE, L. A; FÉLIX, L. P.; PEREIRA, I. M. Efeitos da invasão biológica de algaroba-Prosopis juliflora (Sw.) DC. sobre a composição e a estrutura do estrato arbustivo-arbóreo da caatinga no Município de Monteiro, PB, Brasil. *Acta Botanica Brasilica*, v. 20, n. 4, p. 887-898, 2006.
- PONZONI, F. J. Comportamento Espectral da Vegetação. In: MENESES, P. R., NETTO, J. S. M. (org) *Sensoriamento remoto, reflectância dos alvos naturais*. Brasília – DF: Editora Universidade de Brasília - UNB, Embrapa Cerrados, 2001, p 157-199.
- PONZONI, F.J.; SHIMABUKURO, Y.E. Sensoriamento Remoto no estudo da vegetação. São José dos Campos: Parêntese, 2010. 144p.
- RÊGO, S. C. A., LIMA, P. S., LIMA, M. N. S., MONTEIRO, T. R. R. Análise comparativa dos índices de vegetação NDVI E SAVI no município de São Domingos do Cariri-PB. *Revista Geonorte*, Edição Especial, v.2, n.4, p.1217–1229, 2012.
- SILVA, J. M C. da; TABARELLI, M.; FONSECA, M. T. da; LINS, L. V. (Org.). *Biodiversidade da caatinga: áreas e ações prioritárias para a*

- conservação**. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente: Universidade Federal de Pernambuco, 2004. 382 p.
- SILVA, A. P. N, MOURA, G. B. A, GIONGO, P. R. , SILVA, A. O. Dinâmica espaço-temporal da vegetação no semi-árido de Pernambuco, *Revista Caatinga*, v.22, n.4, p.195-205, 2009.
- SILVA, A.H.; GALVÍNCIO, J. D.; PIMENTEL, R.M.M. **Índices de vegetação e suas técnicas**. in: GALVÍNCIO, J. D (Org) *Sensoriamento Remoto e Análise Ambiental*. Recife - PE: Editora Universitária - UFPE, Série extensão 15, 2012, p. 19 - 26
- SILVA, B. B., LOPES, G. M. , AZEVEDO, P. V. de. Determinação do albedo de áreas irrigadas com base em imagens Landsat/5-TM.. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Piracicaba, SP, v. 13, n. 2, p. 11-21, 2005.
- SILVA, F. F.; SANTOS, J. R. Imagens alos/palsar na classificação da cobertura vegetal da região semi-árida brasileira. *Revista Brasileira de Cartografia*, n. 63, Ed. especial 40 anos, p. 75- 83, 2011.
- SILVA, J. M. C. T., M. E FONSECA, M. T. **Biodiversidade da Caatinga: áreas e ações prioritárias para a conservação**. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente: Universidade Federal de Pernambuco, 2004.
- SILVA, M. D.; GALVINCIO, J. D.; PIMENTEL, R. M. M. Diagnóstico da ocupação vegetacional do município de Brejo da Madre de Deus, Pernambuco, Brasil, através de sensoriamento remoto. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 1, n. 2, p. 15-29, 2008.
- TASUMI, M., ALLEN, R. G., TREZZA, R. At-Surface Reflectance and Albedo from Satellite for Operational Calculation of Land Surface Energy Balance. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 13, n. 2, p. 51-63, 2008.
- VIANA, H.; LOPES, D.; ARANHA, J. Predição de biomassa arbustiva lenhosa empregando dados de inventário e o índice de diferença normalizada extraído em imagens Landsat 5 TM. *Revista Millenium*, v.14, n. 37, 2009.
- WANG, S.; GRANT, R.F.; VERSEGHY, D.L.; BLACK, T.A. Modelling plant carbon and nitrogen dynamics of a boreal aspen forest in CLASS—the Canadian Land Surface Scheme. *Ecological Modelling*, v. 142, n. 1, p. 135-154, 2001.
- WANG, Z.X. et al. From AVHRR-NDVI to MODIS-EVI: advances in vegetation index research. *Acta Ecologica Sinica*, Amsterdam, v. 23, n. 5, p. 979-988, 2003.
- WESSELS, K. J.; PRINCE, S. D.; FROST, P. E.; VAN ZYL, D. Assessing the effects of human-induced land degradation in the former homelands of northern South Africa with a 1 km AVHRR IVDN time-series. *Remote Sensing of Environment*. v. 91, p. 47-67, 2004.

