

# Apport des algorithmes de GRASS GIS des images satellites Landsat pour le calcul et la visualisation des indices de végétation

Using algorithms of GRASS GIS and satellite images Landsat for calculation and visualization of vegetation indices

Lemenkova P

Received: 05 August 2025 / Accepted: 02 October 2025 / Published online: 02 January 2026  
© PASRES Abidjan Côte d'Ivoire 2026

**Résumé** Le calcul des indices de végétation (VI) constitue un enjeu majeur pour diverses applications de surveillance environnementale, telles que l'écologie, la foresterie et l'agriculture. Ce suivi est particulièrement utile pour la gestion des territoires et la prévision de la santé de la végétation. Les propriétés de la végétation terrestre sont obtenues à partir d'indices de végétation grâce à des techniques de cartographie qui détectent les propriétés de la végétation à partir de données d'observation de la Terre. Différents algorithmes de calcul des indices de végétation exploitent les données satellitaires, le NDVI étant le plus connu. Les capteurs satellitaires tels que Landsat permettent l'acquisition d'images sous forme de séries chronologiques, sources précieuses de données pour décrire la santé de la végétation à partir de ces indices. Les données de télédétection ouvrent de nouvelles perspectives, mais soulèvent également la question du choix des algorithmes de traitement des données. Le logiciel GRASS GIS propose un nombre important de modules intégrant des techniques de scripting pour le calcul et la visualisation de divers indices de végétation. Ainsi, des données environnementales peuvent être extraites d'images satellitaires. Compte tenu des défis ci-dessus, cet article vise à utiliser divers modules de GRASS GIS pour le traitement des images satellites Landsat afin de détecter les changements de végétation de 2013 à 2023. L'objectif consiste à étudier différents VI en évaluant plusieurs algorithmes avec des données multispectrales d'entrée. La stabilité et la robustesse des méthodes de calcul de VI par le module « i.vi » de GRASS GIS sont discutées et comparées. L'objectif porte sur l'analyse environnementale d'une zone d'étude située en Angola, en Afrique australe. Le cadre technique de la cartographie est basé sur la détection des zones de végétation saine et déclinante en Angola. Les résultats ont démontré des images satellites traitées avec des zones détectées de végétation réduite et augmentée dans le centre de l'Angola. Cette étude contribue à la surveillance environnementale de l'Afrique australe en utilisant des méthodes cartographiques avancées et des données de télédétection.

**Mots clés** : Indice de végétation, Cartographie, Télédétection, Dynamique environnementale, Écologie, Angola

**Abstract** Calculating vegetation indices (VI) is a key challenge for diverse applications of environmental monitoring, such as ecology, forestry, and agriculture. Such monitoring is particularly helpful for the management of territories and the prediction of vegetation health. The properties of the vegetation on land surface are obtained from vegetation indices using mapping techniques that detect vegetation properties from Earth Observations data. There are different algorithms of calculating vegetation indices that exploit satellite data with NDVI as the most well-known one. Satellite sensors such as Landsat enable the acquisition of images as time series, which are valuable data source to describe vegetation health from these indices. Remote sensing data open new perspectives, but also raise the question of selecting algorithms for data processing. The software GRASS GIS proposes a substantial number of modules with scripting techniques for calculation and visualization of diverse vegetation indices. Accordingly, environmental data can be extracted from satellite images. Taking into account the above challenges, this paper aims at using diverse modules of GRASS GIS for processing of Landsat satellite images to detect changes in vegetation from 2013 to 2023. The goal consists in studying different VI by evaluating several algorithms with input multispectral data. The stability and the robustness of the methods of VI calculation by module "i.vi" of GRASS GIS are discussed and compared. The aim deals with the environmental analysis of study area located in Angola, Southern Africa. The technical framework of cartographic mapping is based on for the detection of healthy and declined vegetation areas in Angola. The results demonstrated processed satellite images with detected areas of reduced and increased vegetation in central Angola. This study contributes to the environmental monitoring of Southern Africa using advanced cartographic methods and remote sensing data.

**Key words** : Vegetation index, Cartography, Remote sensing, Environmental dynamic, Ecology, Angola

Lemenkova P

<sup>1</sup> Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), Orléans, Centre-Val de Loire, France.

<sup>2</sup> LE STUDIUM, Institut d'Etudes Avancées du Val de Loire, Orléans & Tours, France.

<sup>3</sup> La Technopole d'Orléans, Orléans, Centre-Val de Loire, France.

Lemenkova P (✉)

<sup>1</sup> Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), Orléans, Centre-Val de Loire, France.

<sup>2</sup> LE STUDIUM, Institut d'Etudes Avancées du Val de Loire, Orléans & Tours, France.

<sup>3</sup> La Technopole d'Orléans, Orléans, Centre-Val de Loire, France.

polina.lemenkova@tech-orleans.fr

## Introduction

Les indices de végétation décrivent la couverture biophysique de la surface des terres émergées. Ces variables sont sélectionnées pour leur importance dans le cadre de l'évaluation de la dynamique environnementale (Tran *et al.*, 2022 ; Xu *et al.*, 2022; Vélez *et al.*, 2023). De plus, ils sont indispensables pour guider les mesures sur l'adaptation et l'atténuation aux changements climatiques (Zhang *et al.*, 2023 ; Coppin *et al.*, 2024). Les cartes d'indices de végétation constituent de puissants outils scientifiques et d'aide à la décision. Elles servent de base à la modélisation environnementale (Fernandes *et al.*, 2023), à la protection des paysages (Du *et al.*, 2022) et à la planification agricole (Bahrami *et al.*, 2022 ; Radočaj *et al.*, 2023). Elles sont également utilisées pour des applications opérationnelles, notamment pour le suivi des changements environnementaux (Wang *et al.*, 2023), et pour appuyer la mise en œuvre d'orientations et de recommandations de politiques publiques qui nécessitent une connaissance précise de la santé de la végétation dans les systèmes forestiers et agricoles (Bazzo *et al.*, 2023 ; Zhang *et al.*, 2025). L'importance de ces cartes a conduit à l'émergence de cartes d'évolution de l'occupation du sol. Les cartes d'indices de végétation constituent également un outil essentiel pour le suivi des cultures à grande échelle, utile dans le contexte de la sécurité alimentaire. Dans cette étude, nous visons à cartographier les indices de végétation à l'aide du logiciel SIG GRASS et d'images satellites Landsat. La zone d'étude est située dans le centre de l'Angola. La production automatique de cartes des indices de végétation à partir d'images satellitaires est principalement basée sur des méthodes de traitement d'image. L'objectif de cette méthode est de construire un modèle capable de prédire la santé de la végétation en utilisant l'analyse des pixels de l'image. Issus du domaine de l'apprentissage automatique, ces algorithmes sont disponibles dans le logiciel GRASS SIG. Outre l'application technique des méthodes d'apprentissage d'ensemble en cartographie et l'utilisation de l'algorithme de GRASS GIS pour la modélisation d'images satellite, cette étude a démontré l'utilité de la télédétection comme source de données pour la surveillance environnementale. Plus précisément, l'analyse des séries chronologiques permet de surveiller et de détecter les cycles de sécheresses dans les écosystèmes africains.

Afin d'optimiser son application dans des études futures similaires, la technique des classificateurs

d'images peut être utilisée comme outil efficace des modules SIG GRASS pour le traitement des données d'observation de la Terre à des fins de surveillance environnementale opérationnelle. Le calcul des indices de végétation a pour objectif d'indiquer automatiquement le niveau de chlorophylle correspondant à la valeur du nombre numérique (DI) des pixels de l'image. Cette méthode s'appuie sur l'algorithme intégré à GRASS GIS, qui permet de reconnaître les propriétés de l'image. Une méthode d'analyse d'images a été développée et affinée pour répondre aux besoins spécifiques du traitement des données géospatiales, de la cartographie et de la télédétection, car elle prend en charge les formats raster (Lemenkova, 2023c). Par conséquent, l'utilisation d'outils cartographiques est essentielle au traitement des données géographiques pour révéler et visualiser les problèmes environnementaux et la dynamique du paysage.

La connaissance de la taille, de la répartition et de l'évolution des parcelles de végétation est un élément essentiel des études environnementales sur le changement de la couverture terrestre. Les zones touchées par la déforestation sont étudiées en Angola. L'approche technologique de pointe présentée dans cet article est l'utilisation de scripts de programmation implémentés dans les modules, ou bibliothèques, du logiciel GRASS SIG (Neteler *et al.*, 2012) pour cartographier les indices de végétation dans la zone d'étude en Angola.

L'un des principaux défis de la cartographie des indices de végétation est de trouver un compromis entre un modèle trop simple et les propriétés spécifiques de la végétation représentées sur les images. Pour ce faire, nous avons utilisé plusieurs indices de végétation, adaptés à chaque propriété (végétation aride, forêts denses, différentes espèces de cultures, etc.). Le module « i.vi » de GRASS GIS détecte parfaitement le niveau de chlorophylle (vert des feuilles) pour prédire et décrire correctement la santé de la végétation, conformément au modèle construit. De telles approches peuvent soutenir les décideurs et les politiques environnementales ainsi que les planificateurs et les scientifiques environnementaux.

Utilisés comme modules complémentaires des SIG, ces outils permettent d'identifier les avantages et les inconvénients des méthodes traditionnelles de géoinformatique pour le traitement d'images satellitaires. Comme le démontre cet article, les nouveaux outils de programmation de la bibliothèque de SIG GRASS sont adaptables à

divers modules destinés au traitement des données RS et raster, et sont parfaitement adaptés aux besoins de traitement d'images dans différentes tâches (prétraitement, correction atmosphérique, classification, segmentation, reclassification, cartographie) et contextes cartographiques (Lemenkova, 2023a, 2023b ; Agumagu *et al.*, 2025 ; Uyar et Uyar, 2025).

La couverture végétale est un facteur clé de l'écologie de l'Angola et de la durabilité environnementale des paysages de ce pays. Les écosystèmes constituent la composante dominante de l'environnement terrestre, aux côtés du relief, du climat et de l'hydrologie (Lemenkova, 2022a,b). L'analyse des changements de la végétation permet d'étudier la dynamique des liens entre ces composantes environnementales (relief, climat, hydrologie et végétation). Cartographier l'évolution des types de couverture terrestre au fil du temps grâce à l'évaluation de la couverture végétale offre un aperçu unique de l'évolution des paysages terrestres.

Les changements de végétation sont visibles en comparant des images satellites issues de différentes données couvrant la même zone. La comparaison de ces images permet de détecter la dynamique de la végétation (amélioration ou diminution de la couverture végétale). De plus, les séries de cartes montrant ces changements de végétation sont utiles pour la surveillance écologique, par exemple pour prendre des mesures de restauration de la végétation ou de soutien à la santé des cultures dans le cadre du suivi agricole. Alors que les définitions des parcelles de paysage et des types de végétation sont principalement déterminées à l'aide d'enquêtes sur le terrain en fonction de leur taille et de leur niveau de complexité, montrant l'hétérogénéité de la zone, dans les régions montagneuses de l'Angola, l'identification des parcelles de paysage est difficile en raison de la région inaccessible pour les études topographiques.

Il vaut la peine d'étudier la dynamique de la croissance de la végétation et l'état des plantes avec des images satellite disponibles gratuitement telles que des scènes Landsat, Sentinel-2 ou des données open source similaires de télédétection (Ruppen *et al.* 2023). Parmi divers types de données de télédétection, les images Landsat ont été largement utilisées pour cartographier la végétation, calculer les indices de végétation dans diverses régions du monde et suivi des changements environnementaux. Plus précisément, l'outil efficace pour la surveillance de la couverture terrestre est le calcul des indices de végétation. Son efficacité s'explique par la différence de réflectance spectrale dans les canaux Rouge/NIR des images satellite qui indique bien la répartition de la végétation contrastant avec les autres types de couverture terrestre.

L'objectif principal de la surveillance de la végétation en Angola est la protection de l'environnement et contribue à la conservation de la nature et au bien-être de la société.

### **Présentation de la zone d'étude**

L'Angola est un pays d'Afrique australe qui s'étend sur un vaste territoire de 1.246.700 km<sup>2</sup>. Situé sur la côte sud-ouest de l'Afrique, ses principales caractéristiques comprennent diverses caractéristiques géomorphologiques, géologiques, pédologiques, climatiques et biotiques. Le cadre environnemental de l'Angola est contrasté, du climat désertique ultra-aride du Namib dans le nord du pays, aux savanes arides et semi-arides des plaines côtières de l'océan Atlantique, à une transition biologiquement diversifiée vers le haut de l'escarpement escarpé de l'ouest de l'Angola. Plus précisément, l'Angola a un carré approximatif en forme géométrique, situé entre 4° 22' et 18° 02' latitude sud, et 11° 41' et 24° 05' longitude est (Linder *et al.*, 2012).

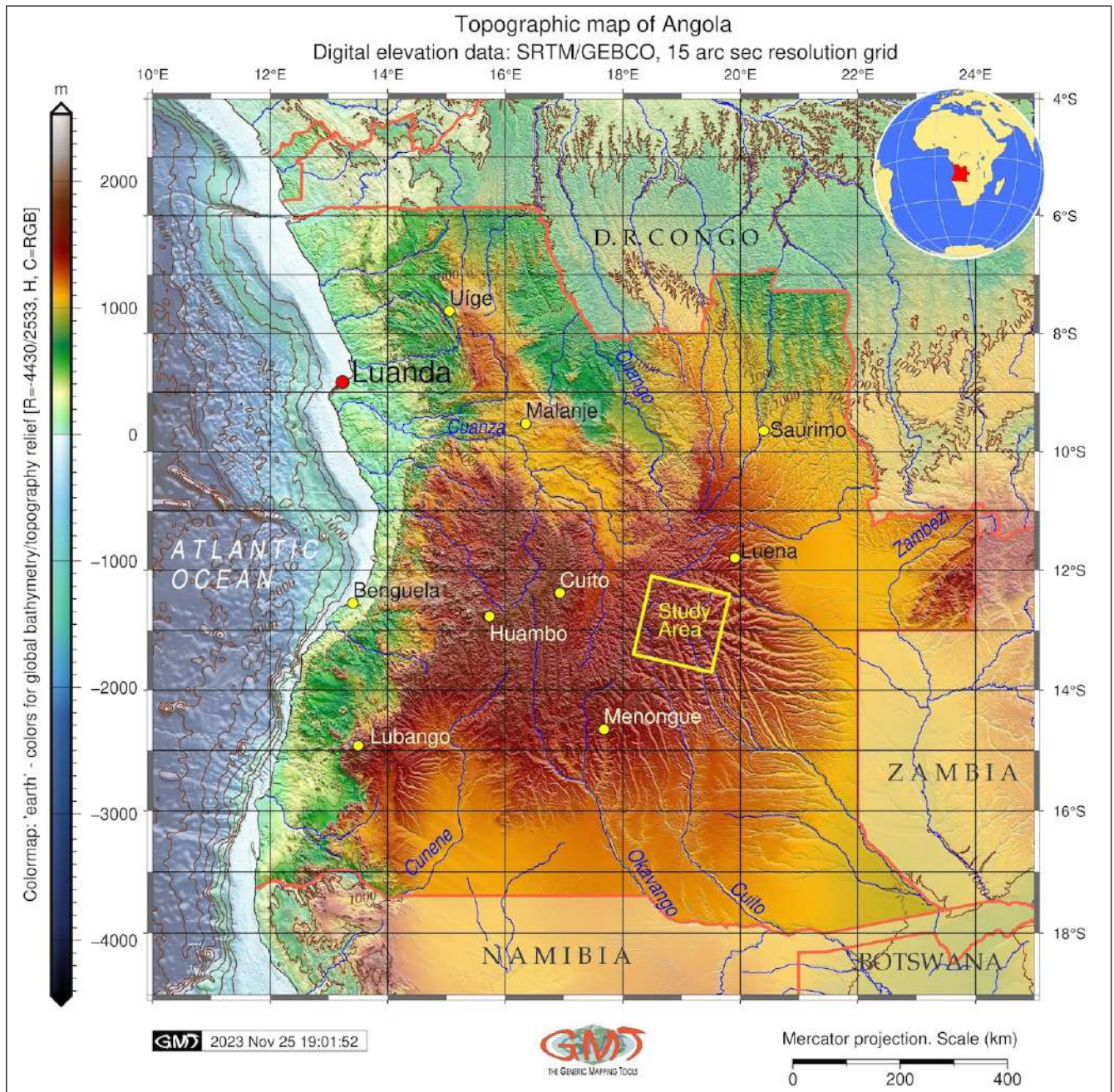
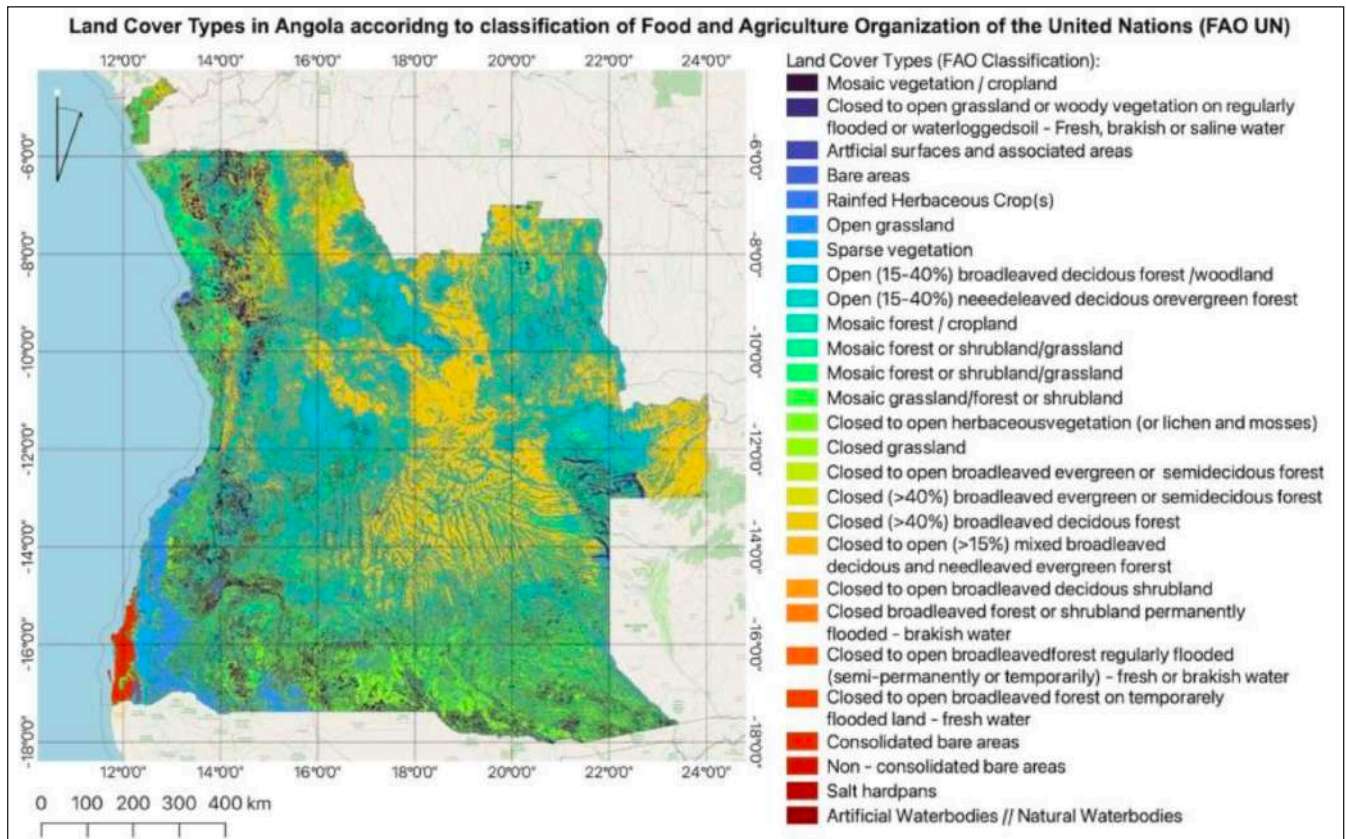


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude : Angola, Afrique. Logiciel : GMT. Source : auteur.

Les forêts tropicales humides d'Angola sont situées le long de la frontière nord avec la République démocratique du Congo, avec des zones périphériques pénétrant vers le sud le long de l'escarpement angolais, en remontant les affluents du bassin du fleuve Congo. Au-dessus de l'escarpement, de hautes montagnes s'élèvent jusqu'à 2620 m, avec des vestiges isolés de forêts et de prairies. De vastes forêts tropicales dominent les plateaux et les pénéplaines des bassins du Congo et du Zambèze, et des forêts sèches d'acacias se trouvent

dans le sud-est du pays avec des sables du Kalahari dominants des bassins fluviaux endoréiques. Les plus grands biomes d'Angola comprennent les principaux types de végétation dominants dans le pays (Figure 2) : 1) Forêts humides tropicales et subtropicales ; 2) Prairies et zones arbustives de montagne ; 3) Prairies, savanes, zones arbustives et zones boisées tropicales et subtropicales ; 4) Forêts sèches et feuillues tropicales et subtropicales ; 5) Déserts et zones arbustives xériques ; 6) Mangroves ; 7) Prairies et savanes inondées.



**Figure 2 :** Carte d'occupation du sol en Angola. Logiciel : QGIS. Source : auteur.

À l'échelle régionale de la biodiversité, l'Angola est remarquable pour avoir des représentants de sept des neuf biomes d'Afrique et de 15 des écorégions du continent (Burgess *et al.*, 2004). Cette richesse unique place l'Angola au deuxième rang après l'Afrique du Sud pour sa biodiversité des écorégions africaines (Gonçalves *et al.*, 2017). Dans les zones centrales du Angola, les forêts tropicales sont dispersées dans des écosystèmes de zones humides et sont donc difficiles à cartographier à l'aide des approches traditionnelles. En revanche, l'approche des scripts dans le SIG GRASS permet de détecter automatiquement les zones couvertes de végétation aux feuilles vert vif en discriminant les parcelles de paysage sur les images satellites par la différence de réflectance spectrale. Les forêts tropicales d'Angola sont pour la plupart entourées de champs cultivés et agricoles, ainsi

que d'établissements urbains. Ainsi, elles se distinguent généralement clairement des zones bâties et des zones cultivées pendant la saison de croissance.

Carvalho *et al.* (2017) soulignent l'extrême vulnérabilité climatique de l'Angola. Ainsi, les précipitations varient considérablement, la hausse des températures étant la plus faible dans les zones côtières et la plus élevée dans le sud-est et les zones désertiques. Les précipitations varient de moins de 20 mm par an dans le sud-ouest à plus de 1 600 mm dans le nord-ouest et le nord-est. Les contrastes extrêmes dans les gradients de température et de précipitations influencent la végétation et augmentent le risque de dégradation des terres dans les zones désertiques de l'Angola.

## Matériel et méthodes

L'analyse des changements de biodiversité, à travers des indices de végétation calculés et visualisés, est réalisée à partir de données de télédétection. Pour ce faire, une méthodologie comprenant plusieurs étapes de recherche a été développée. Cette approche est représentée schématiquement à la Figure 3. Dans cette étude, les méthodes d'apprentissage d'ensemble pilotées par les données de GRASS GIS ont été appliquées en utilisant un algorithme de traitement d'images et élucidé les

variations saisonnières en Angola en utilisant un ensemble d'images satellites multispectrales pour la visualisation de la dynamique du paysage. Tout d'abord, une méthode de script du SIG GRASS est présentée pour le calcul et la visualisation de 10 indices de végétation à l'aide de l'algorithme 'i.vi'. Deuxièmement, la performance de l'imagerie Landsat-8 OLI/TIRS est comparée dans la cartographie de la végétation en utilisant les images de 2013 et 2023.

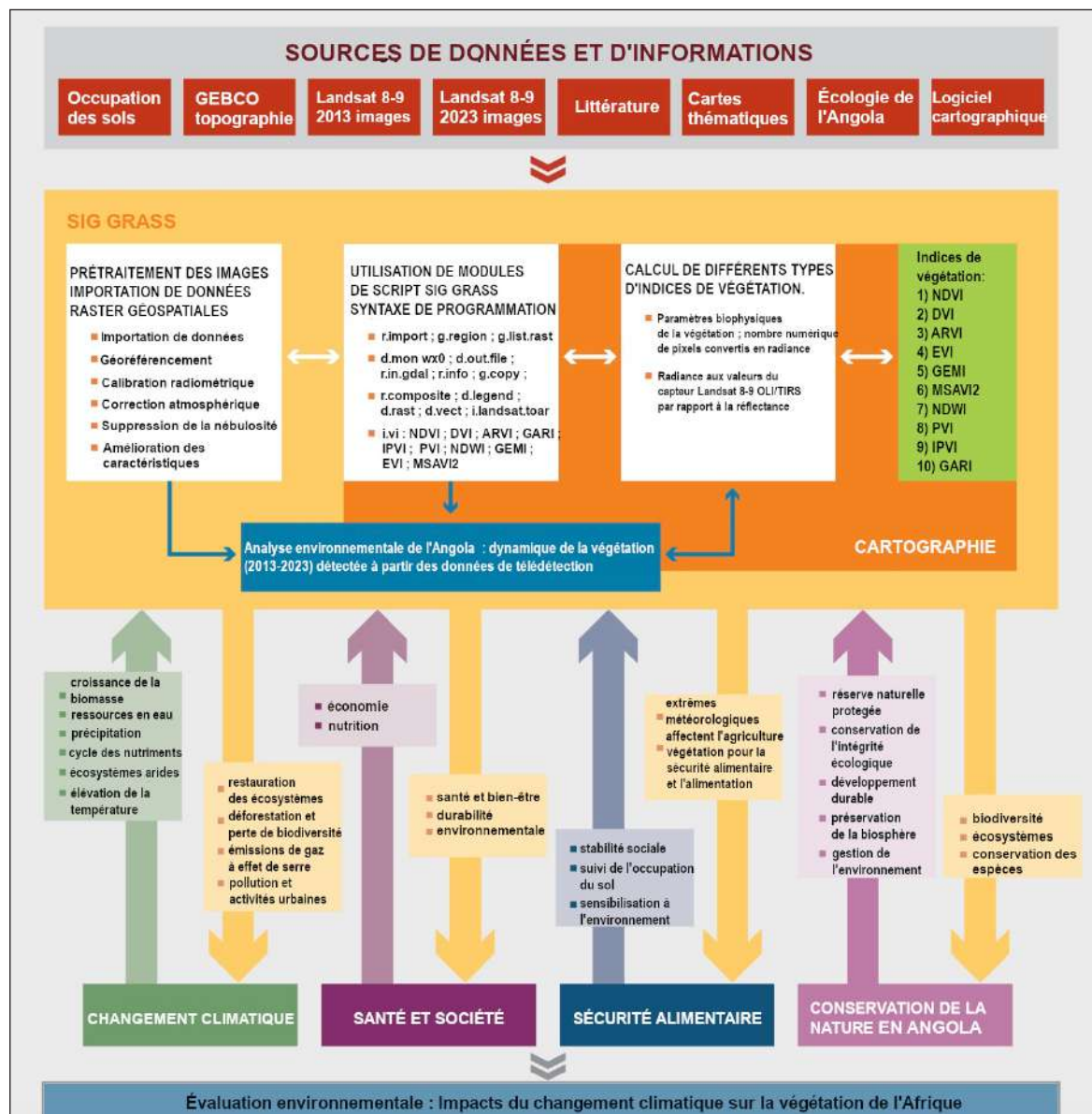
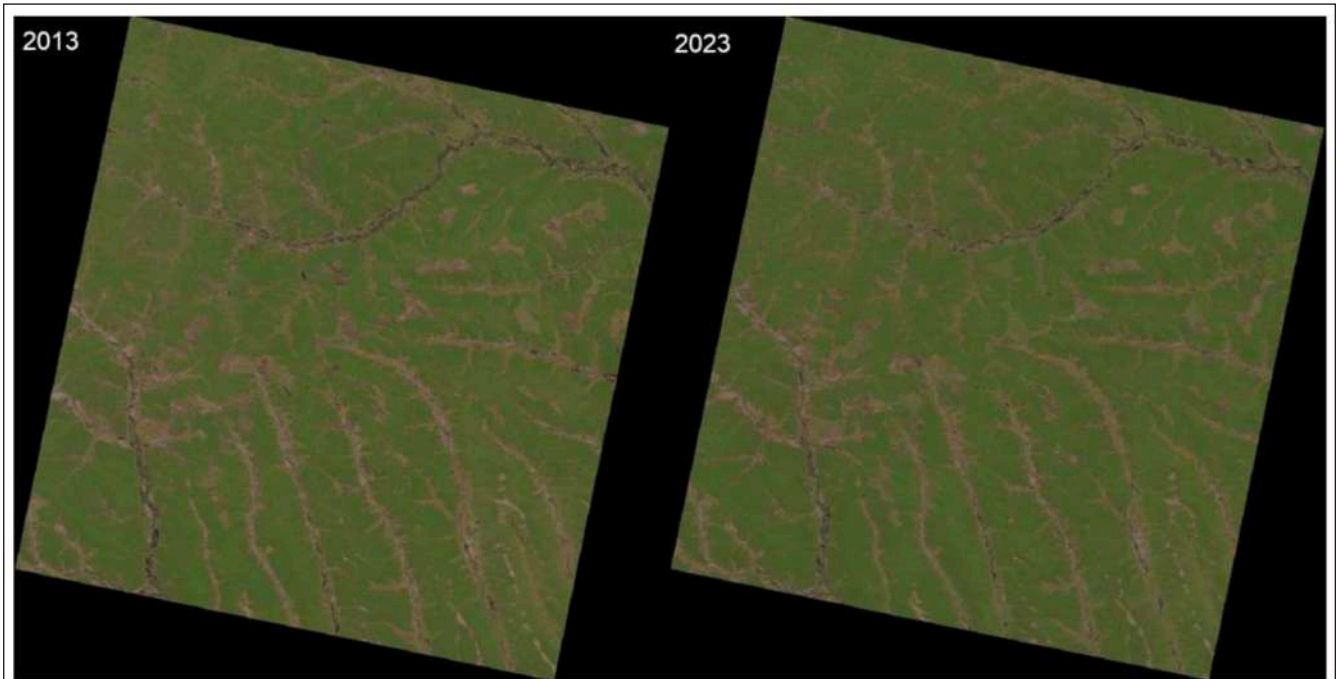


Figure 3 : Schéma principal du projet de recherche et applications pour la surveillance environnementale. Logiciel : GIMP. Source : auteur.

Les séries temporelles d'images satellites multispectrales sont une entrée essentielle dans les chaînes de traitement automatique dédiées à la cartographie des indices de végétation. Dans cette étude, des images Landsat comme source de données ont été utilisées. La NASA a mis en orbite le satellite Landsat-8 en 2013 (Hu et Wang, 2020). Il autorise la capture d'images tous les 16 jours

avec une largeur de fauchée de 185 kilomètres. Il est équipé de deux capteurs : l'instrument OLI et le capteur infrarouge thermique Thermal Infra-Red Sensor (TIRS), permettant des prises de vue à une résolution spatiale de 100 mètres (Yang *et al.*, 2025). Dans cette étude, toutes les bandes multi-spectrales sont exploitées à l'exception de celle destinée à la détection des cirrus (Figure 4).



**Figure 4 :** Données de télédétection : images satellite Landsat 8 OLI/TIRS couvrant le centre de l'Angola. Source des données : USGS.

L'exploitation de cette base de données spatiales et de télédétection a consisté à faire des opérations de requêtes sur les images satellites. Le but est de rechercher l'information sur végétation et de produire de nouvelles données cartographiques et statistiques sur Angola. Une méthode basée sur des scripts du SIG GRASS a été présentée pour l'extraction d'informations sur les indices de végétation. En utilisant cette méthode, l'information a été extraite sur la répartition de la végétation saine, malsaine, clairsemée et distinguées des terres nues. La particularité de cette méthode est qu'elle prend en compte les relations entre bandes entre la réflectance spectrale des pixels et l'identification de la couverture végétale. Une telle approche est utile dans le cadre de surveillance environnementale adaptée au traitement d'images multispectrales telles que Landsat.

La discrimination de la végétation et la séparation des forêts tropicales des autres paysages se font par une approche basée sur l'utilisation de scripts

de programmation. Néanmoins, la condition pour un calcul précis est que les images soient acquises pendant la saison de forte couverture végétale, soient sans nuages et capturées pendant la période de faible humidité (d'octobre à mai), en fonction du climat de l'Afrique tropicale. Pour ces raisons, les images utilisées ont été sélectionnées avec une nébulosité inférieure à 10 % et prises en juillet 2013 et 2023 pendant une période sèche avec de faibles précipitations et humidité.

Le traitement cartographique des données de télédétection s'effectue principalement de deux manières : par un processus algorithmique soutenu par les modules SIG de GRASS et par un processus visuel incluant la production d'informations cartographiques. Le processus algorithmique implique le traitement d'images, la création d'un cadre pour les bandes multispectrales d'images pour divers indices de végétation, le prétraitement, notamment l'amélioration de la qualité des images satellite par des corrections géométriques et

radiométriques, l'optimisation des performances des scripts dans SIG de GRASS et la gestion du processus de classification des images. La méthodologie de traitement des données de télédétection, données géospatiales et cartographiques et organisation du

projet est résumée par la Figure 5. Le schéma de flux de travail a associé des méthodes de traitement d'images satellitaires et des analyses dynamiques de végétation en Angola obtenue par calcul d'indices de végétation.

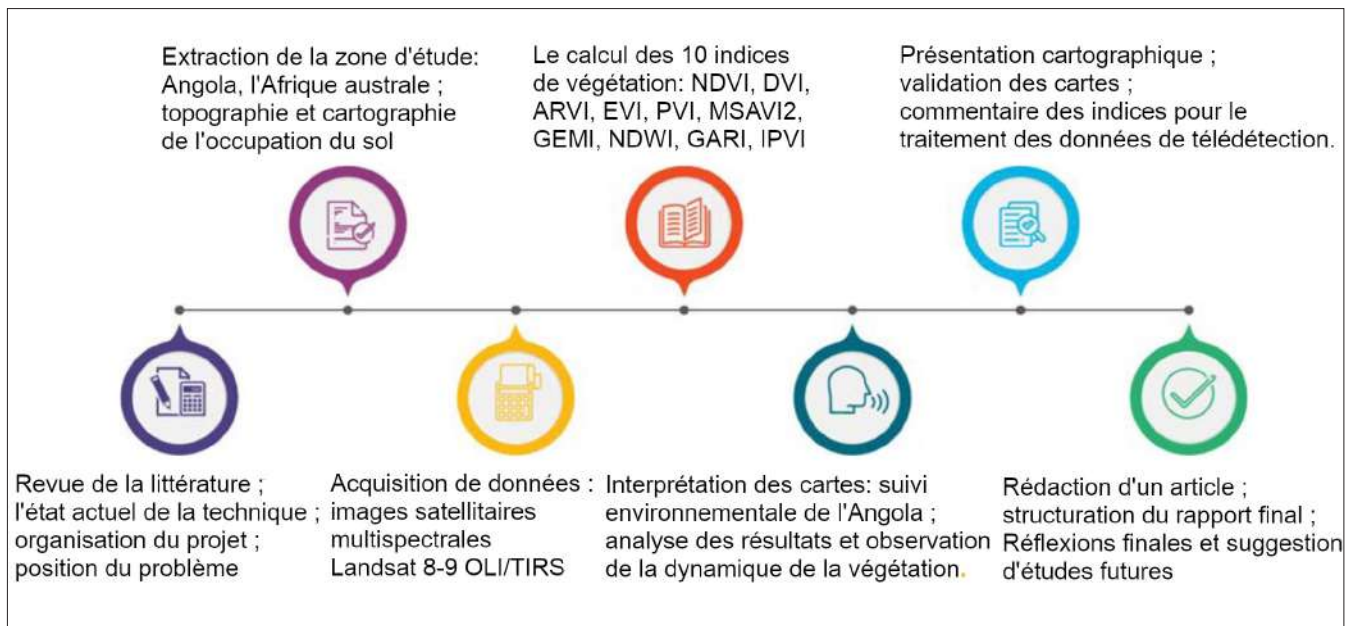


Figure 5 : Résumé de la méthodologie de traitement de données

Le processus visuel implique la représentation de données raster complexes sous forme de cartes, incluant des légendes sur les cartes pour faciliter la compréhension de la dynamique de la végétation grâce au déchiffrement de la verdure des feuilles, information dérivée des images de l'Angola.

### Le calcul des indices de végétation

La méthodologie comprend le calcul des indices de végétation à l'aide de différents algorithmes de GRASS GIS. Cela comprenait différentes classes de types de couverture terrestre indiquées par des indices de végétation. Nous avons également proposé un cadre de flux de travail cartographique hybride qui combine la classification traditionnelle des images satellites basée sur le clustering k-means et la méthode de calcul des indices de végétation à l'aide de bibliothèques de scripts intégrées à GRASS GIS. Cela a permis d'évaluer la fiabilité de la modélisation et de la cartographie. Cette approche a été utilisée pour classer une série d'images multispectrales Landsat 8-9 OLI/TIRS afin d'indiquer, de détecter et de visualiser la dynamique de l'évaporation de l'eau et les réponses de la végétation au changement climatique sur 10 ans, ainsi que pour démontrer les changements dans les paysages d'Afrique australe.

Dans cette étude, le module utilisé est celui du logiciel GRASS GIS « i.vi » développé pour le calcul et la visualisation des indices de végétation. L'un des avantages de l'algorithme i.vi utilisé par GRASS GIS pour calculer les indices de végétation est que la paramétrisation de façon appropriée est requise pour séparer la couverture végétale de tous les autres types de couverture terrestre. Cette méthode est basée sur le calcul d'indices à l'aide de méthodes automatiques en utilisant les valeurs de réflectance spectrales dans les bandes Landsat-8 OLI/TIRS.

la technique des algorithmes de programmation du SIG GRASS a été utilisée pour le calcul des indices de végétation et l'amélioration de la mise en œuvre de cette approche. Contrairement aux méthodes et des approches SIG traditionnelles, cet algorithme fonctionne automatiquement dans l'extraction de données pour divers indices de végétation qui ont été calculés pour une analyse comparative.

### Algorithmes

Dans le reste de cet article, les algorithmes du SIG GRASS sont décrits avec des commentaires sur les extraits de code et les modules utilisés, puis cette application est illustrée pour cartographier 10 indices de végétation différents avec deux images satellites sur 2013 et 2023. L'analyse de l'évolution de l'occupation du sol et végétation de l'espace territorial de l'Angola est basée sur des images

satellites Landsat-8 OLI/TIRS. Les algorithmes de script de GRASS GIS ont été utilisés car l'interprétation automatique de la répartition de la végétation par le calcul d'indices est plus précise que la classification manuelle. Ceci est suivi par une présentation des résultats expérimentaux obtenus

avec une discussion sur leurs implications. Enfin, des conclusions sont tirées et des recommandations sont formulées pour d'autres travaux possibles dans des études futures similaires. Dans cette étude, 10 indices de végétation différents ont été testés (Tableau 1):

**Tableau 1** : Sources de référence des 10 indices de végétation utilisés dans cette étude

No	Nom de l'index (FR)	Nom de l'index (AN)	Formule	Référence
1	Indice différentiel de végétation	Difference Vegetation Index (DVI)	$DVI = NIR - R$	Tucker, 1979
2	Indice de végétation par différence normalisée	Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$	Kriegler <i>et al.</i> , 1969
3	Indice de végétation résistante à l'atmosphère	Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI)	$ARVI = (NIR - RED - \gamma * (RED - BLUE)) / (NIR + RED - \gamma * (RED - BLUE))$	Kaufman et Tanre, 1992
4	Indice de végétation amélioré	Enhanced Vegetation Index (EVI)	$EVI = G * ((NIR - R) / (NIR + C1 * R - C2 * B + L))$	Huete <i>et al.</i> , 2002
5	Indice de végétation non linéaire destiné à la surveillance environnementale globale	Global Environmental Monitoring Index (GEMI)	$GEMI = \eta * (1 - 0.25 * \eta) - ((Red - 0.125) / (1 - Red))$	Pinty et Verstraete, 1992.
6	Indice modifié de végétation ajusté au sol (MSAVI2)	Modified Soil Adjusted Vegetation Index (MSAVI2)	$MSAVI = (2 * NIR + 1 - \sqrt{(2 * NIR + 1)^2 - 8 * (NIR - Red)}) / 2$	Qi <i>et al.</i> 1994a, 1994b
7	Indice de teneur en eau par différence normalisée	Normalized Difference Water Index (NDWI)	$NDWI = (Green - NIR) / (Green + NIR)$	McFeeters, 1996
8	Indice de végétation perpendiculaire	Perpendicular Vegetation Index (PVI)	$PVI = (NIR - a * Red - b) / (\sqrt{1 + a^2})$	Richardson et Wiegand, 1977
9	Indice de végétation verte résistante à l'atmosphère	Green Atmospherically Resistant Vegetation Index (GARI)	$GARI = (NIR - (GREEN - (\gamma * (BLUE - RED)))) / (NIR + (GREEN - (\gamma * (BLUE - RED))))$	Gitelson <i>et al.</i> , 1996
10	Indice de végétation en pourcentage infrarouge	Infrared Percentage Vegetation Index (IPVI)	$IPVI = NIR / (NIR + RED)$	Crippen, 1990

Plus précisément, l'approche convertit les radiances enregistrées par le capteur satellite en quantités significatives dans le domaine environnemental. Plus précisément, le caractère multispectral des données satellitaires permet de décrire l'état d'un phénomène de teneur en chlorophylle dans les feuilles. De cette manière, l'indice de végétation reflète le stade de croissance des plantes à l'aide de ces indicateurs.

### Analyse comparative

Nous avons testé plusieurs indices de végétation qui diffèrent les uns des autres par plusieurs paramètres techniques (utilisation de différents canaux Landsat et leur combinaison dans des équations) et des ajustements pour les paramètres environnementaux et les caractéristiques atmosphériques. Les options de calcul des indices de végétation visent à améliorer le flux de travail de traitement d'images grâce aux puissants outils de télédétection numérique intégrés à GRASS GIS. Ainsi, elles garantissent la qualité et la précision de la classification des images et utilisent diverses approches mathématiques de calcul des indices de

végétation, adaptables à divers besoins de traitement d'images. GRASS GIS propose également une large gamme de modules traditionnels pour le traitement de données géospatiales vectorielles et raster, tels que des outils de calcul des types d'occupation du sol, de modélisation géomorphologique et hydrologique ou de visualisation de données analytiques. Ces options se distinguent par leur adaptation aux données cartographiques grâce aux modules internes des algorithmes de GRASS GIS.

### Traitement des données spatiales

Les images ont été importées dans le projet GRASS GIS à l'aide de la bibliothèque GDAL. Ensuite, le contenu des fichiers a été vérifié à l'aide de la commande listing : `g.list rast`. Après cela, les fichiers ont été prétraités en copiant les bandes Landsat pour correspondre à la structure d'entrée du module « `i.landsat.toar` » qui sera utilisé plus tard pour calibrer le numéro numérique (DN) de l'imagerie Landsat. Après, les valeurs de pixels DN ont été convertis en valeurs de réflectance spectrale à l'aide du DN en

réflectance. Cela se fait à l'aide du module `i.landsat.toar` qui calcule la radiance ou la réflectance et la température du « sommet de l'atmosphère » pour les images Landsat OLI/TIRS. Cette étape est nécessaire car il est important de convertir le DN en réflectance ou éventuellement en radiance avant de créer un composite RVB. Sinon, les couleurs du composite naturel ne semblent pas convaincantes mais plutôt floues. Cette conversion a été effectuée à l'aide du fichier de métadonnées avec `i.landsat.toar`.

### Calculs environnementaux pour l'analyse de la végétation

Maintenant que le prétraitement est terminé, l'étape suivante comprend le calcul de 10 indices de végétation. Tous les indices ont été calculés à l'aide du module «`i.vi`» puis visualisés sur les cartes à l'aide d'une combinaison de modules de traitement cartographique. Tout d'abord, le calcul du NDVI a été effectué à l'aide de la commande de script. L'étape suivante comprenait la visualisation cartographique et la représentation des données à l'aide de plusieurs modules. Tout d'abord, l'écran a été lancé à l'aide du commande «`d.mon wx0`». Ensuite, la région a été créée pour inclure l'étendue géographique de la zone d'étude par «`g.region`». Après, les cartes ont été visualisées à l'aide du module «`d.rast`». La légende cartographique a été ajoutée à l'aide du module «`d.legend`» avec les éléments cartographiques et les ajustements nécessaires. Les changements du NDVI pour 2013 et 2023 et les données originales ont été pré-traitées pour convertir les nombres numériques des pixels en radiance. Il existe de nombreux indices de végétation permettant d'obtenir des informations à partir d'images en niveaux de gris, le NDVI étant probablement le plus connu et le plus populaire en raison de son applicabilité universelle et de son application à long terme dans la surveillance environnementale. Le NDVI est utilisé pour améliorer le contraste entre la végétation et les zones bâties. Le NDVI présente une approche générale qui est utilisée pour tous types d'applications et une plage de variation fixe : de -1 à +1. La formule de  $NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$  utilise les bandes rouges et proche infrarouge de Landsat OLI/TIRS. L'inconvénient de méthode est la sensibilité au bruit et aux effets atmosphériques tels que l'humidité et la nébulosité. Par conséquent, des modifications du NDVI ont été développées avec un certain nombre d'indices aux propriétés ajustées, par exemple une meilleure résistance atmosphérique (ARVI) ou une correction de la luminosité du sol (MSAVI) et les

autres. GEMI considère une relation non linéaire pour minimiser l'influence de l'atmosphère sur la mesure de l'indice de végétation.

Le DVI est un calcul basé sur le contraste entre la zone d'absorption maximale dans le rouge, qui dépend des pigments chlorophylliens, et la réflexion maximale dans l'infrarouge, provoquée par la structure cellulaire de la feuille. Il est similaire au NDVI mais a des valeurs plus robustes puisque cet indice n'est pas normalisé. Le NDVI utilise des bandes (ou canaux) rouges et infrarouges (NIR) qui sont couramment disponibles dans la plupart des données de télédétection, y compris celles de Landsat.

Initialement développé pour le capteur MODIS EOS, ARVI peut également être utilisé pour la télédétection depuis Landsat TM, car il est basé sur le calcul des canaux bleu, rouge et NIR. Son principal avantage est la correction des effets atmosphériques sur la détection de la végétation. La normalisation par la somme des deux bandes calculées dans l'IPVI représentée sur la Figure 9 permet de réduire les effets de lumière et aboutit à ce que les valeurs soient comprises entre -0,1 et 0,90. L'IPVI conserve ses valeurs quel que soit l'éclairement global. Ceci le différencie des simples indices de végétation qui sont sensibles aux variations d'éclairement. Les valeurs de GARI sont théoriquement comprises entre -1 et +1, cependant les valeurs négatives correspondant aux surfaces autres que le couvert végétal sont ramenées à -0,50, car dans la zone d'étude certains types d'occupation du sol correspondant à des valeurs négatives, comme la neige où les nuages denses sont absents. La réflectance dans le rouge est donc supérieure à celle du proche infrarouge ce qui explique les valeurs.

Plusieurs expérimentations ont été réalisées sur des indices de végétation calculés à l'aide de diverses formules incluant différentes conditions des bandes Landsat : NDVI, ARVI, GARI et GVI. Bien que certaines opérations de SIG GRASS donnent de bons résultats de détection sur les images satellite, l'approche GARI s'est avérée la plus robuste. Ainsi, la classification précise des types de couverture terrestre basée sur les indices de végétation peut être envisagée dans des travaux futurs pour différencier des parcelles de terrain présentant des caractéristiques de texture et de structure très différentes pour l'identification de la déforestation, du rétrécissement des végétation ou d'autres exemples de changement de couverture terrestre.

## Résultats

Les résultats du cadre de traitement d'images basé sur le SIG GRASS, utilisant le calcul des indices de végétation, incluent la série d'images satellites classées traitées à l'aide de l'analyse des critères de décision des algorithmes SIG GRASS. Les cartes des différentes années d'analyse (2013 et 2023) ont été croisées pour établir les cartes de dynamique de l'Angola. Ainsi, cette analyse a

nécessité le croisement des cartes de végétation pour détecter les types de changements de végétation d'Angola central. La série de plusieurs images satellites Landsat-8 OLI/TIRS traitées dans cette étude par des techniques d'apprentissage d'ensemble a illustré le processus de changements intenses de la végétation en Angola (Figure 6).

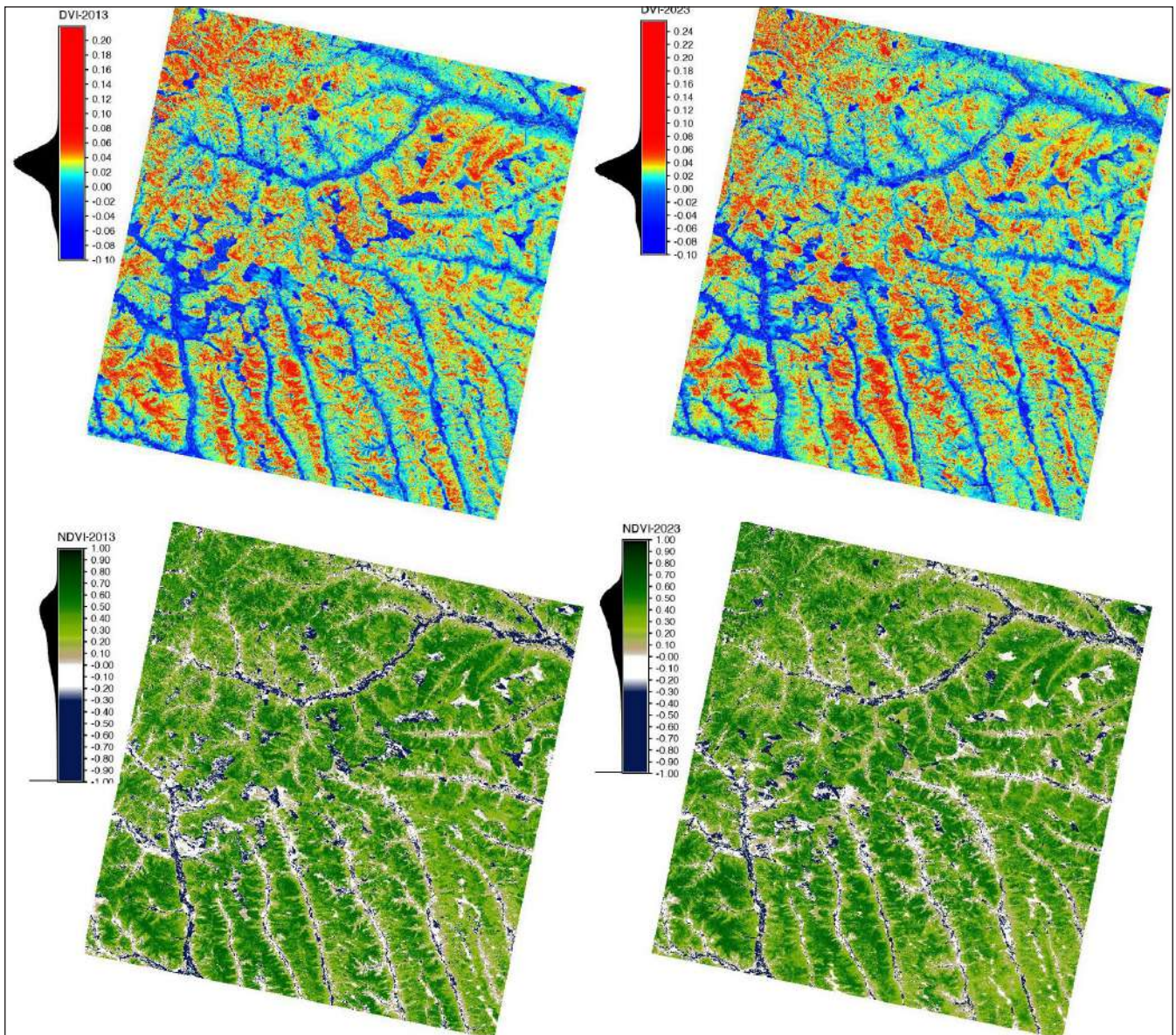
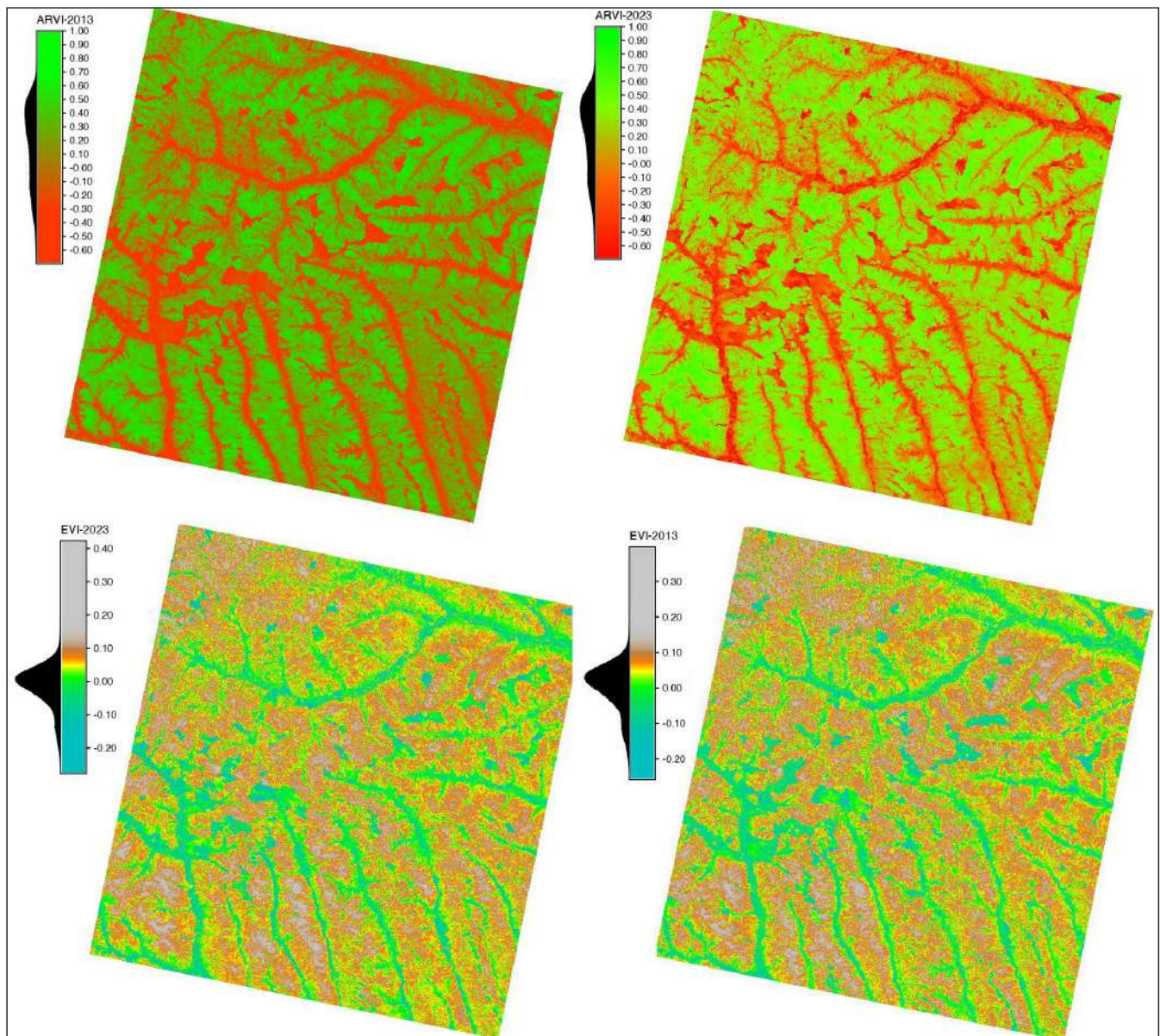


Figure 6 : Indices de végétation DVI et NDVI pour 2013 et 2023. Source : auteur.

La Figure 6 montre les calculs NDVI et DVI pour les images Landsat. Dans cette figure, la végétation lumineuse est représentée par des couleurs vertes pour le NDVI et des couleurs rouges pour le DVI. Sur la Figure 6, les histogrammes de fréquence des valeurs du DVI montrent une représentation des valeurs de DVI allant de -0,10 à +0,20 plus forte pour l'année 2013 que pour l'année 2023 avec le +0,20. Il est possible de déduire que les types d'usage du sol associés à cette gamme de valeurs (mosaïque forestière, maquis, prairie boisée) ont diminué au cours des dernières années. Dans la même Figure

6 (NDVI), les zones de forêts mosaïques, qui présentent une couverture extrêmement dense (plus de 40 %), sont signalées par des valeurs élevées (en vert éclatant). On trouve ensuite des maquis et des prairies touffues, suivis de broussailles. La teinte verte salade (NDVI de 0,30 à 0,40) représente un couvert arbustif tandis que la tonalité beige (NDVI de 0,05 à 0,10) indique une végétation clairsemée. Les valeurs positives les plus faibles correspondent aux terres nues et aux zones désertes, tandis que les valeurs négatives indiquent l'eau (représentée par la couleur bleu foncée sur la Figure 7).



**Figure 7 :** Indices de végétation ARVI et EVI pour 2013 et 2023. Source : auteur.

La Figure 7 montre que les valeurs de l'ARVI varient de -0,60 à 0,70, les valeurs les plus élevées indiquant une végétation saine, vert vif, qui correspond aux forêts de feuillus du centre de l'Angola ou aux forêts mixtes de feuillus et de sempervirents à feuilles aiguilles telles que les forêts à cônes ou à écailles, arbres à feuilles persistantes. Étant donné que le mappage ultérieur est appliqué à chaque image NDVI individuelle, le calcul du NDVI est approprié. Des valeurs plus élevées indiquent une végétation vert vif. Les calculs pour 2013 et 2023 permettent l'analyse du déclin de la végétation dans le centre de l'Angola sur la base de la comparaison entre les images. Les valeurs positives de l'indice ARVI, en vert sur la Figure 6, correspondent soit à de l'eau soit à des zones forestières et buissonnantes (valeurs +0,10 et plus), tandis que les valeurs négatives (couleur rouge) indiquent des vallées et des terres nues sans végétation (valeurs -0,10 et ci-dessous). Comme le montre l'indice de végétation EVI

ci-dessous, plus les valeurs sont élevées (couleur beige, 0,10-0,40), plus la végétation est dense et saine. Les valeurs entre 0,00 et 0,05 (couleur vert vif) indiquent les zones à végétation rare ou clairsemée couvrant certains reliefs. Les valeurs de -0,10 à -0,20 (couleur vert clair vif) indiquent soit les terres cultivées et les prairies soit une végétation arbustive disséminée parmi les herbacées. Les valeurs en dessous de 0,00 (couleur émeraude) signalent des vallées et terres dénudées, tandis que les valeurs élevées correspondent forêts décidues ou semi-décidues ouvertes.

La Figure 8 montre les indices GEMI et MSAVI calculés et visualisés. Les valeurs de GEMI, quant à eux, varient de -0,5 à 0,6 en général, les plus distinctes étant comprises entre 0,15 et 0,40. L'index GEMI présente des variations similaires à celles du MSAVI. La comparaison des valeurs pour 2013 et 2023 indique une augmentation des valeurs égale à 0,40 qui correspond aux arbustes et végétations mixtes.

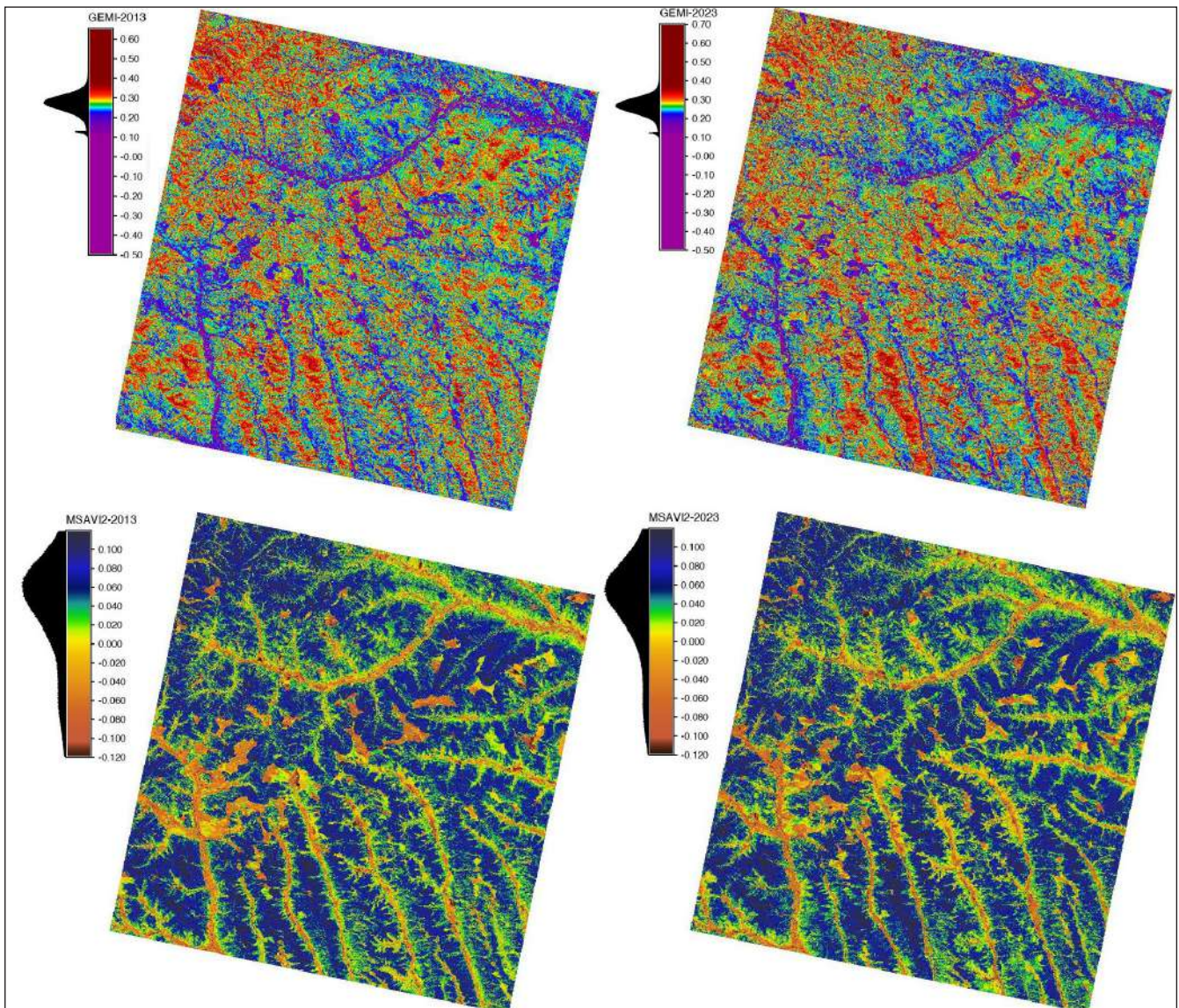


Figure 8 : Indices de végétation GEMI et MSAVI2 pour 2013 et 2023. Source : auteur.

La comparaison des histogrammes établis pour le GEMI et le MSAVI2 (Figure 8) montre que ce dernier atteint sa limite vers +0,10, contre +0,60 pour le GEMI. Pour une végétation dense et saine, le MSAVI2 est donc moins discriminant que le GEMI. Cependant, MSAVI2 est moins sensible aux effets atmosphériques que le GEMI, ce qui le rend plus précis pour la cartographie de la végétation dans les régions montagneuses tropicales de l'Angola. Dans l'indice NDWI (Figure 9), la végétation est représentée en vert foncé, tandis que les vallées fluviales sont indiquées en jaune. Une

telle distinction entre les forêts à couvert dense et à végétation épaisse et la végétation clairsemée ou inexistante dans les vallées fluviales permet également d'utiliser cet indice pour la cartographie hydrologique et géomorphologique. Lors du calcul de l'indice EVI, les minimas locaux avec une constante de valeurs inférieures à -0,20 sont remplies, tandis que la plage principale de valeurs est comprise entre -0,10 et +0,10, selon la distribution des données indiquée dans l'histogramme.

Les valeurs calculées pour les indices NDWI et PVI sont présentées dans la Figure 9.

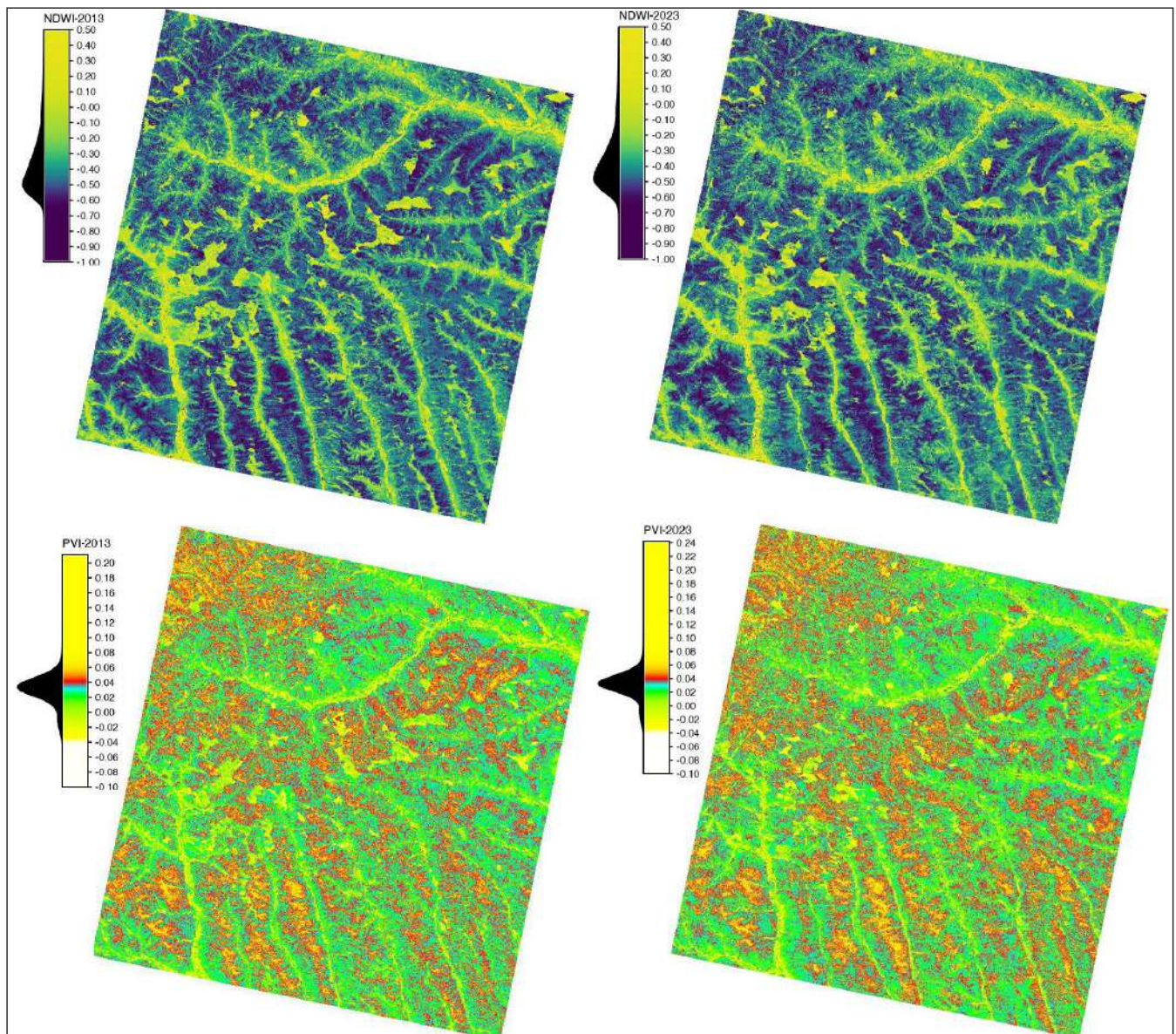


Figure 9 : Indices de végétation NDWI et PVI pour 2013 et 2023. Source : auteur.

Ici, le NDWI souligne une relation entre la végétation avec des processus photosynthétiques actifs, la quantité de biomasse, la surface verte et la santé de la culture, qui sont fortement liées à la plante et la teneur en eau. Ainsi, les valeurs les plus basses de cet indice dans la zone d'étude sont -0,7- et il atteint les valeurs maximales jusqu'à 0,20, après quoi les valeurs se stabilisent. Des valeurs très faibles (de 0,0 à 0,10), négatif (de -0,80 à -1,00), représentent des zones rocheuses, sableuses ou dénudées, tandis que des résultats plus élevés, supérieurs à 0,2 et plus, correspondent à des zones d'arbustes ou de forêts naturelles de feuillus et de

feuillus en haute montagne.

Les indices calculés pour GARI et IPVI sont présentés dans la Figure 10. Ici, GARI présente une petite plage de valeurs allant de -0,50 à 1,0 car il prend en compte la réflectivité du sol. En plus des valeurs d'indices, le codage de qualité des indices de végétation a également été utilisé afin de déterminer la confiance que l'on peut accorder aux valeurs d'indices obtenues pour une date donnée. Les histogrammes des figures 5-9 donnent les valeurs obtenues sur l'année 2013-2023 pour le codage de qualité des indices pour la végétation du centre de l'Angola (Figure 10).

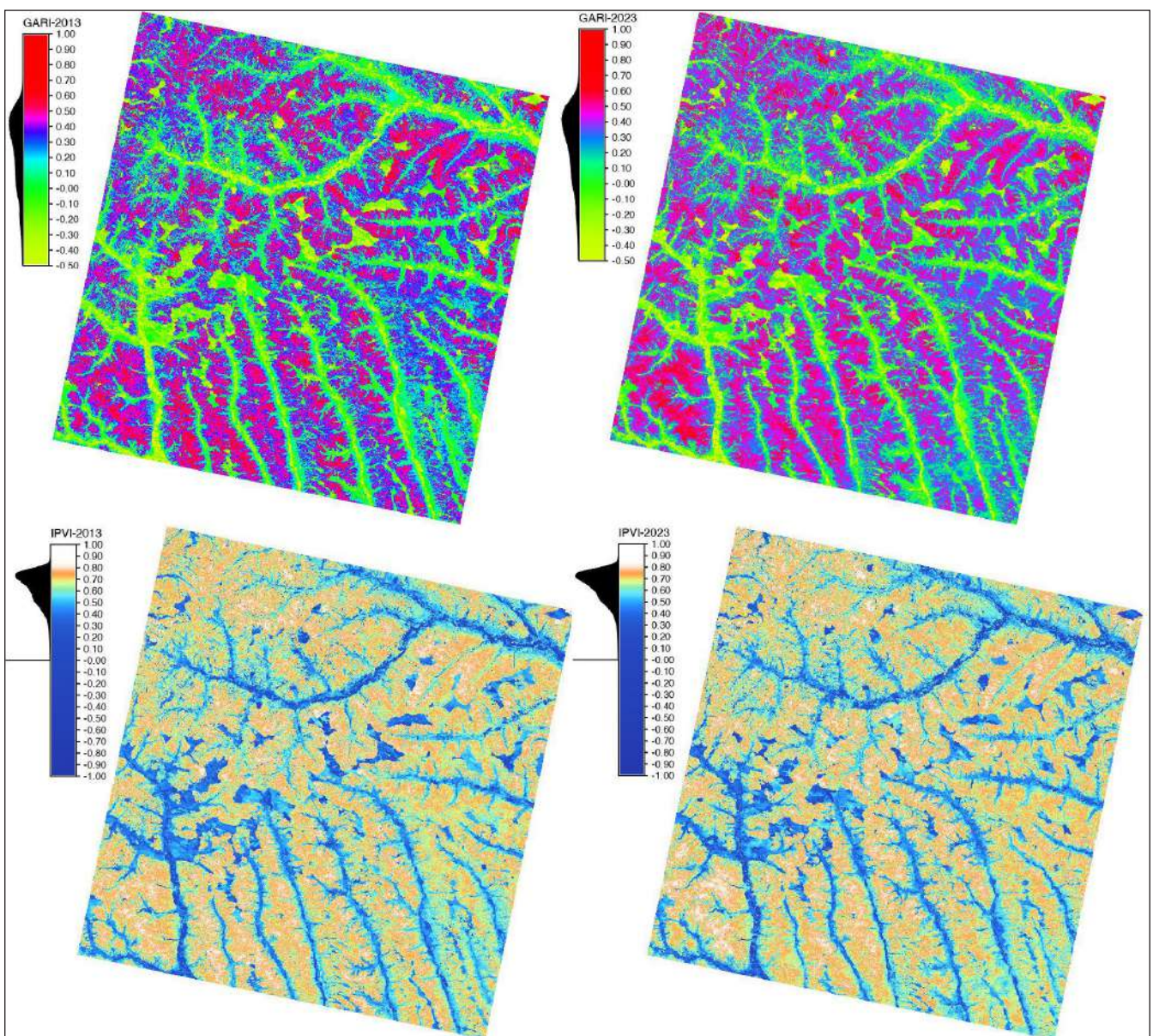


Figure 10 : Indices de végétation GARI et IPVI pour 2013 et 2023. Source : auteur.

Le IPVI montre une plage de données allant de -0,04 à 0,08 dans la principale zone de distribution des données dans le centre de l'Angola (Figure 8). Il est possible de déterminer que la qualité des indices de végétation est supérieure pour la date du 2023 à celle des images précédentes (2013) suite au changement climatique et les dégradations locales de la végétation (déforestation locale, augmentation des activités

urbaines et remplacement des forêts par l'agriculture). La légère baisse de valeur d'IPVI observée pour cette date est donc d'origine climatique et anthropique et non pas végétale. Cet exemple souligne bien l'intérêt de l'utilisation de données de télédétection lors de l'analyse des résultats environnementales, afin de pouvoir discerner de manière précise la cause d'une variation d'indice de végétation observée.

## Discussion

Les résultats ont révélé des différences significatives entre les méthodes testées. L'indice NDVI a montré des performances visuelles satisfaisantes, mais présentait une fragmentation importante concentrée dans plusieurs régions, y compris les zones de végétation. L'affectation de la classe forestière aux zones de brousse souligne les limites de cet indice pour la cartographie environnementale avec une variation spectrale complexe. L'indice ARVI a montré des performances satisfaisantes, mais limitées, avec de vastes régions représentant des types de végétation fusionnés, notamment en bordure des vallées et des bandes de végétation. Cette tendance à la classification suggère une faible sélectivité, rendant difficile la distinction entre les adventices et la végétation cultivée. Parmi les indices de végétation, l'EVI présentait la segmentation visuelle la plus cohérente en termes de verdure, témoignant de sa santé. L'index EVI, probablement grâce à l'utilisation de la bande bleue, a des valeurs constantes au cours des années 2013 et 2023. Le NDVI et l'EVI sont assez similaires en valeurs et en variations au cours du temps. On remarque que l'on peut distinguer les champs agricoles en 2023. Les zones de forêts tropicales denses étaient correctement identifiées et distinctes. Le modèle affichait une bonne adhérence aux structures réelles des sols et des terres agricoles. Au niveau des indices le MSAVI2 permet de mettre très clairement en évidence le démarrage de la feuillaison et ce pour les années 2013 et 2023. Ce phénomène est également perceptible avec le GEMI, mais de façon plus faible. On voit également que le PVI montre une baisse d'activité chlorophyllienne à partir de 2013. L'NDWI est donc bien l'indice le plus approprié pour observer le volume d'eau dans les feuilles.

Avec les impacts climatiques et les activités anthropiques liées au déboisement, les changements dans le paysage et la couverture végétale sont de plus en plus notables en Afrique centrale et australe (Chiteculo *et al.*, 2019, 2022 ; Miapia *et al.*, 2021). Il en résulte donc un changement complexe dans les modèles de couverture terrestre, y compris une fragmentation du paysage qui conduit au déclin de la biodiversité (Ministério do Urbanismo e Ambiente, 2006 ; te Beest *et al.*, 2012 ; Ferrand, 2019 ; Vaz Pinto, 2019 ; Huntley et Catarino *et al.*, 2020).

Grâce à l'abondance d'informations spectrales, de résolution et temporelles fournies par l'imagerie satellite et aux progrès réalisés dans le développement de la programmation, de nombreux progrès peuvent être réalisés dans la surveillance environnementale de la végétation des forêts tropicales d'Afrique, comme le démontre cette étude (Fan *et al.*, 2015 ; Ahmad *et al.*, 2023 ; Xiao *et al.*, 2023).

Compte tenu de l'importance des indices de végétation en tant qu'indicateurs de durabilité écologique, les recherches futures devraient se concentrer sur l'identification de caractéristiques plus appropriées qui s'adaptent aux différentes régions transfrontalières présentant des types de végétation mixtes (savane, forêts tropicales, forêts de feuillus, prairies ou arbustes en mosaïque, etc.). L'adaptation de diverses caractéristiques régionales des classes d'occupation du sol aux différentes régions de l'Angola aiderait à identifier les zones à structure paysagère complexe et changeante.

L'approche SIG GRASS démontrée dans cet article détermine le flux de travail cartographique via des scripts qui automatisent le traitement des images satellites. Cela permet de déterminer automatiquement où les caractéristiques de végétation combinées peuvent être discriminées en tant que régions hétérogènes ou considérées comme des parcelles de paysage homogènes. Les techniques de scripting du SIG GRASS pour le traitement d'images sont utilisées pour cartographier la variabilité spatiale des paysages en Angola. Alors que les méthodes de classification traditionnelles reposent généralement sur les systèmes d'information géographique (SIG), la télédétection numérique offre une approche efficace, automatisée et précise du traitement d'images. Les images Landsat 8-9 OLI/TIRS traitées par le SIG GRASS constituent une source de données idéale pour identifier les oscillations saisonnières de la végétation en Angola. Le calcul des indices de végétation par télédétection numérique est appliqué à la classification automatisée des données Landsat. La classification des données RS constitue une méthode efficace pour suivre l'évolution de la végétation en comparant plusieurs scènes collectées pendant les périodes sèches et humides.

## Conclusion

Cette étude démontre l'efficacité de SIG GRASS pour le calcul des indices de végétation à partir de données de télédétection. Plus précisément, cela montre le calcul et la visualisation des indices de végétation en Angola. Nous avons démontré que les images Landsat de part leur grande fréquence de passage, sont totalement adaptées pour effectuer un suivi environnemental en

utilisant le calcul des indices de végétation. Il permet de mettre en évidence, par exemple, le démarrage des différentes cultures ou les différences entre les zones couvertes par les domaines forestiers et agricoles. Il a également été montré au sein des forêts de feuillus et de conifères les variations des indices en Angola de 2013 jusqu'en 2023.

## Références Bibliographiques

- Agumagu OO, Marchant R, Stringer LC. 2025.** Land Use and Land Cover Change Dynamics in the Niger Delta Region of Nigeria from 1986 to 2024. *Land*, 14(4): 765.
- Ahmad N, Ullah S, Zhao N, Mumtaz F, Ali A, Ali A, Tariq A, Kareem M, Imran AB, Khan IA, Shakir M. 2023.** Comparative Analysis of Remote Sensing and Geo-Statistical Techniques to Quantify Forest Biomass. *Forests*, 14(2): 379. <https://doi.org/10.3390/f14020379>
- Bahrami, H., McNairn, H., Mahdianpari, M., Homayouni, S. 2022.** A Meta-Analysis of Remote Sensing Technologies and Methodologies for Crop Characterization. *Remote Sensing*, 14(22): 5633. <https://doi.org/10.3390/rs14225633>
- Bazzo COG, Kamali B, Hütt C, Bareth G, Gaiser T. 2023.** A Review of Estimation Methods for Aboveground Biomass in Grasslands Using UAV. *Remote Sensing*, 15(3): 639. <https://doi.org/10.3390/rs15030639>
- Burgess N, Hales JD, Underwood E, Dinerstein E, Olson D, Itoua I, Schipper J, Ricketts T, Newman K. 2004.** Terrestrial ecoregions of Africa and Madagascar – a conservation assessment. Island Press, Washington DC, 499 pp.
- Carvalho SCP, Santos FD, Pulquério M. 2017.** Climate change scenarios for Angola: an analysis of precipitation and temperature projections using four RCMs. *International Journal of Climatology*, 37: 3398-3412. <https://doi.org/10.1002/joc.4925>
- Catarino S, Romeiras MM, Figueira R, Aubard V, Silva JMN, Pereira JMC. 2020.** Spatial and Temporal Trends of Burnt Area in Angola: Implications for Natural Vegetation and Protected Area Management. *Diversity*, 12(8): 307. <https://doi.org/10.3390/d12080307>
- Chiteculo V, Abdollahnejad A, Panagiotidis D, Surový P, Sharma RP. 2019.** Defining Deforestation Patterns Using Satellite Images from 2000 and 2017: Assessment of Forest Management in Miombo Forests—A Case Study of Huambo Province in Angola. *Sustainability*, 11(1): 98. <https://doi.org/10.3390/su11010098>
- Chiteculo V, Abdollahnejad A, Panagiotidis D, Surový P. 2022.** Effects, Monitoring and Management of Forest Roads Using Remote Sensing and GIS in Angolan Miombo Woodlands. *Forests*, 13(4): 524. <https://doi.org/10.3390/f13040524>
- Coppin P, Jonckheere I, Nackaerts K, Muys B, Lambin E. 2004.** Digital change detection methods in ecosystem monitoring: a review. *International Journal of Remote Sensing* 25: 1 565–1 596. <http://dx.doi.org/10.1080/0143116031000101675>
- Crippen R.E. 1990.** Calculating the vegetation index faster. *Remote Sensing of Environment* 34(1): 71-73. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(90\)90085-Z](https://doi.org/10.1016/0034-4257(90)90085-Z)
- Du, X., Qin, Y., & Huang, C. 2022.** Status and Prospect of Ecological Environment in the Belt and Road Initiative Regions. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(24): 17091. <https://doi.org/10.3390/ijerph192417091>
- Fernandes PB, Santos CAD, Gurgel ALC, Gonçalves LF, Fonseca NN, Moura RB, Costa KADP, Paim TDP. 2023.** Non-Destructive Methods Used to Determine Forage Mass and Nutritional Condition in Tropical Pastures. *AgriEngineering*, 5(3): 1614-1629. <https://doi.org/10.3390/agriengineering5030100>
- Gitelson AA, Kaufman YJ, Merzlyak MN. 1996.** Use of a Green Channel in Remote Sensing of Global Vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 58: 289-298. [http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00072-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00072-7)

- Gonçalves FMP, Revermann R, Gomes AL, Aidar MPM, Finckh M, Juergens N. 2017.** Tree Species Diversity and Composition of Miombo Woodlands in South-Central Angola: A Chronosequence of Forest Recovery after Shifting Cultivation. *International Journal of Forestry Research*, 13 pp <https://doi.org/10.1155/2017/6202093>
- Fan H, Fu X, Zhang Z, W Q. 2015.** Phenology-Based Vegetation Index Differencing for Mapping of Rubber Plantations Using Landsat OLI Data. *Remote Sensing*, 7(5): 6041-6058. <https://doi.org/10.3390/rs70506041>
- Hu X, Wang Y. 2020.** Coastline Fractal Dimension of Mainland, Island, and Estuaries Using Multi-temporal Landsat Remote Sensing Data from 1978 to 2018: A Case Study of the Pearl River Estuary Area. *Remote Sensing*, 12(15): 2482. <https://doi.org/10.3390/rs12152482>
- Huete A, Didan K, Miura T, Rodriguez EP, Gao X, Ferreira LG. 2002.** Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83(1-2): 195-213.
- Huntley BJ, Ferrand N. 2019.** Angolan Biodiversity: Towards a Modern Synthesis. In: Huntley, B., Russo, V., Lages, F., Ferrand, N. (eds) *Biodiversity of Angola*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-03083-4\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-03083-4_1)
- Kaufman YJ, Tanre D. 1992.** Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(2): 261-270. <https://doi.org/10.1109/36.134076>
- Kriegler FJ, Malila WA, Nalepka RF, Richardson W. 1969.** Preprocessing transformations and their effects on multispectral recognition. *Proceedings of the Sixth International Symposium on Remote Sensing of Environment*, p. 97-131.
- Lemenkova P. 2022a.** Console-Based Mapping of Mongolia Using GMT Cartographic Scripting Toolset for Processing TerraClimate Data. *Geosciences*, 12(3) : 140.
- Lemenkova P. 2022b.** Mapping Climate Parameters over the Territory of Botswana Using GMT and Gridded Surface Data from TerraClimate. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 11(9) : 473.
- Lemenkova P. 2022c.** Handling Dataset with Geophysical and Geological Variables on the Bolivian Andes by the GMT Scripts. *Data*, 7 (6) : 74.
- Lemenkova P. 2023a.** Using open-source software GRASS GIS for analysis of the environmental patterns in Lake Chad, Central Africa, *Die Bodenkultur: Journal of Land Management, Food and Environment*, 74(1): 49-64.
- Lemenkova P. 2023b** A GRASS GIS Scripting Framework for Monitoring Changes in the Ephemeral Salt Lakes of Chotts Melrhir and Merouane, Algeria. *Applied System Innovation*, 6(4): 61.
- Lemenkova P. 2023c.** Monitoring Seasonal Fluctuations in Saline Lakes of Tunisia Using Earth Observation Data Processed by GRASS GIS. *Land*, 12(11) : 1995.
- Linder HP, Klerk HMD, Born J, Burgess ND, Fjeldså J, Rahbek C. 2012.** The partitioning of Africa: statistically defined biogeographical regions in sub-Saharan Africa. *Journal of Biogeography*, 39(7): 1189-1205. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2012.02728.x>
- McFeeters SK. 1996.** The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7): 1425-1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
- Mendelsohn JM. 2019.** Landscape Changes in Angola. In: Huntley B, Russo V, Lages F, Ferrand N. (eds) *Biodiversity of Angola*. Springer, Cham.
- Miapia LM, Ariza-Mateos D, Lacerda-Quartín V, Palacios-Rodríguez G. 2021.** Deforestation and Biomass Production in Miombo Forest in Huambo (Angola): A Balance between Local and Global Needs. *Forests*, 12(11): 1557. <https://doi.org/10.3390/f12111557>
- Ministério do Urbanismo e Ambiente. 2006.** National Biodiversity Strategy and Action Plan (2007-2012); Ministério do Urbanismo e Ambiente, República de Angola: Luanda, Angola, 2006.
- Neteler M, Bowman MH, Landa M, Metz M. 2012.** GRASS GIS: A multi-purpose open source GIS, *Environmental Modelling & Software*, 31 : 124-130.
- Palacios G, Lara-Gomez M, Márquez A. 2015.** Spatial dynamic and quantification of deforestation and degradation in Miombo Forest of Huambo Province (Angola) during the period 2002-2015. *SASSCAL Proceedings*, Huambo, 182.
- Pinty B, Verstraete MM. 1992.** GEMI: a non-linear index to monitor global vegetation from satellites. *Vegetatio*, 101: 15-20. <https://doi.org/10.1007/BF00031911>

- Qi J, Chehbouni A, Huete AR, Kerr YH. 1994a.** A modified soil adjusted vegetation index. *Remote Sensing of the Environment*, 48:119-126. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)90134-1](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)90134-1)
- Qi, J., Kerr, Y., Chehbouni, A., 1994b.** External factor consideration in vegetation index development. Proc. of Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing, *ISPRS*, 723-730.
- Radočaj D, Šiljeg A, Marinović R, Jurišić M. 2023.** State of Major Vegetation Indices in Precision Agriculture Studies Indexed in Web of Science: A Review. *Agriculture*, 13(3), 707. <https://doi.org/10.3390/agriculture13030707>
- Richardson AJ, Wiegand CL. 1977.** Distinguishing Vegetation from Soil Background Information. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 43(12): 1541-1552. URL: [https://www.asprs.org/wp-content/uploads/pers/1977journal/dec/1977\\_dec\\_1541-1552.pdf](https://www.asprs.org/wp-content/uploads/pers/1977journal/dec/1977_dec_1541-1552.pdf)
- Ruppen D, Runnalls J, Tshimanga RM, Wehrli B, Odermatt D. 2023.** Optical remote sensing of large-scale water pollution in Angola and DR Congo caused by the Catoca mine tailings spill, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 118 : 103237.
- Schneibel A, Stellmes M, Revermann R, Finckh M. 2013.** Agricultural expansion during the post-civil war period in southern Angola based on bi-temporal Landsat data. – In: Oldeland J, Erb C, Finckh M, Jürgens N. [Eds.]: Environmental Assessments in the Okavango Region. – *Biodiversity & Ecology* 5: 311–319. <https://doi.org/10.7809/b-e.00285>
- te Beest M, Cromsigt JPGM, Ngobese J, Oloff H. 2012.** Managing invasions at the cost of native habitat? An experimental test of the impact of fire on the invasion of *Chromolaena odorata* in a South African savanna. *Biological Invasions*, 14: 607–618. <https://doi.org/10.1007/s10530-011-0102-z>
- Tran TV, Reef R, Zhu X. 2022.** A Review of Spectral Indices for Mangrove Remote Sensing. *Remote Sensing*, 14(19): 4868. <https://doi.org/10.3390/rs14194868>
- Tucker CJ. 1979.** Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2): 127-150. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0)
- Uyar N, Uyar A. 2025.** Assessing Climate Change Impacts on Cropland and Greenhouse Gas Emissions Using Remote Sensing and Machine Learning. *Atmosphere*, 16(4): 418.
- Vaz Pinto P. 2019.** The Giant Sable Antelope: Angola's National Icon. In: Huntley, B., Russo, V., Lages, F., Ferrand, N. (eds) *Biodiversity of Angola*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-03083-4\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-030-03083-4_17)
- Vélez S, Martínez-Peña R, Castrillo D. 2023.** Beyond Vegetation: A Review Unveiling Additional Insights into Agriculture and Forestry through the Application of Vegetation Indices. *J*, 6(3), 421-436. <https://doi.org/10.3390/j6030028>
- Wang Z, Shi Y, Zhang Y. 2023.** Review of Desert Mobility Assessment and Desertification Monitoring Based on Remote Sensing. *Remote Sensing*, 15(18): 4412. <https://doi.org/10.3390/rs15184412>
- Xiao C, Wu Y, Zhu X. 2023.** Evaluation of the Monitoring Capability of 20 Vegetation Indices and 5 Mainstream Satellite Band Settings for Drought in Spring Wheat Using a Simulation Method. *Remote Sensing*, 15(19): 4838. <https://doi.org/10.3390/rs15194838>
- Xu Y, Yang Y, Chen X, Liu Y. 2022.** Bibliometric Analysis of Global NDVI Research Trends from 1985 to 2021. *Remote Sensing*, 14(16):3967. <https://doi.org/10.3390/rs14163967>
- Yang Y, Li P, Nath AJ, Feng Z, Xiao Z, Yang J. 2025.** Landsat scene- and pixel-based cloud cover research: a review. *International Journal of Digital Earth*, 18(1). <https://doi.org/10.1080/17538947.2025.2489732>
- Zhang T, Song J, Fan Y, Liu Y, Yu S, Guo D, Hou T, Guo K. 2023.** Vegetation Index Research on the Basis of Tree-Ring Data: Current Status and Prospects. *Forests*, 14(10). <https://doi.org/10.3390/f14102016>
- Zhang M, Deng Y, Hai Y, Chen H, Ma A, Wang W, Ming L, Dang H, Peng M, Jize D, Jiao C, Zhang M. 2025.** Monitoring Vegetation Dynamics and Driving Forces in the Baijiu Golden Triangle Using Multi-Decadal Landsat NDVI and Geodetector Modeling. *Land*, 14(5) : 1111. <https://doi.org/10.3390/land14051111>