Télédétection, 2003, vol. 3, n° 1, p. 69-83
Droit de photocopie soumis à l'autorisation

© 2003 CONTEMPORARY PUBLISHING INTERNATIONAL
Publié sous l'enseigne *Éditions scientifiques GB*
Imprimé en France

CARTOGRAPHIE PROVISOIRE DE LA COUVERTURE DU SOL DU PARC NATIONAL HUASCARAN (PÉROU), À L'AIDE DES IMAGES TM DE LANDSAT-5

WALTER SILVERIO [a] et JEAN-MICHEL JAQUET [b]

Unité de Télédétection et SIG, Section des Sciences de la Terre
Université de Genève et UNEP/DEWA/GRID, 13, rue des Maraîchers, 1211 Genève 4, Suisse.
Courriel [(a,b)] : ; silveri9@etu.unige.ch ; jean-michel.jaquet@terre.unige.ch

(soumis le 5 juillet 2002 ; révisé le 24 septembre 2002 ; accepté le 28 octobre 2002)

Une carte de couverture du sol fondée sur l'imagerie TM de Landsat-5 a été élaborée pour le Parc national Huascarán (Pérou). L'influence du relief sur la radiométrie a été atténuée par l'emploi des indices NDVI et NDSI, qui ont été segmentés à l'aide des histogrammes en tenant compte de l'orientation des versants. Quatorze classes spectrales ont été définies et leur correspondance thématique vérifiée par des observations de terrain. La carte de couverture du sol fournit des informations inédites sur l'étendue de la couverture glaciaire, les glaciers rocheux, la turbidité d'environ 400 lacs et la densité de la végétation. Ce document devrait contribuer à une meilleure gestion de ce parc faisant partie du patrimoine naturel de l'humanité.

Mots-clefs : télédétection ; couverture du sol ; Andes ; TM de Landsat.

LANDSAT-BASED PROVISIONAL LAND COVER MAPPING OF HUASCARÁN NATIONAL PARK (PERÚ)

Landsat 5 TM imagery was used to map the distribution of land cover in Huascarán National Park (Perú). The influence of the rugged topography on image radiometry was attenuated by using the NDVI and NDSI indices. Fourteen radiometric classes were defined through a segmentation of the indices histograms taking into consideration the slope orientation, and the classes thematic correspondance was established using field data. The land cover map provides information on the extent of the glaciers and till deposits, the turbidity of over 400 lakes, and the vegetation density. As such, it should contribute towards a better management of this national park as a UNESCO human heritage site.

Keywords : Remote sensing ; snow index ; land cover ; Andes ; Landsat.

1. INTRODUCTION

Par la beauté de ses paysages, la diversité de sa flore et de sa faune, ainsi que ses caractéristiques écologiques, la Cordillera Blanca, située dans le département d'Ancash (Pérou), a été déclarée, en 1975, Parc national Huascarán (PNH). Dix ans plus tard, l'UNESCO l'a inscrit au Patrimoine Naturel de l'Humanité (UNESCO, 2000).

Il n'est donc pas surprenant que le tourisme se soit développé dans le PNH. Cette présence humaine, s'ajoutant aux usagers directs et indirects du parc, n'est pas sans conséquences : pression sur la faune et la flore dans certains secteurs à équilibre écologique précaire, compétition pour l'espace, conflits liés à l'usage de l'eau, et production de déchets. La nécessité d'une gestion intégrée s'impose donc, celle-ci devant s'appuyer, entre autres, sur un système d'information géoréférée, dont nous avons proposé un prototype (Silverio, 2001).

La carte de couverture du sol est une partie importante d'un système d'information et constitue un instrument de compréhension, puis de gestion du territoire (NLCC, 2002). Le contexte socio-économique du Pérou, ainsi que la taille du PNH font que ce plan d'information n'est pas encore disponible. Nous présentons et discutons ici l'approche que nous avons suivie pour élaborer une première carte de couverture du sol du PNH, fondée sur l'imagerie satellitaire (Cihlar, 2000).

2. PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

Le PNH est localisé à 400 km au nord de Lima, entre les coordonnées géographiques 08° 40' – 10° 10' S / 77° 00' – 77° 54' W, dans le département d'Ancash, Pérou. Il est orienté NO-SE et compte une superficie de 3 400 km², pour une longueur de 158 km et, en moyenne, 20 km de largeur (figure 1).

Le trait principal du PNH est sa topographie très accidentée, caractérisée par des versants escarpés et par la présence de vallées étroites et profondes, qui se situent entre les chaînes de la Cordillera Blanca. L'altitude varie entre 2 400 m et 6 768 m. Dans le PNH, se concentrent 27 sommets de plus de 6 000 m d'altitude, dont le Huascarán Sur (6 768 m), point culminant du Pérou, ainsi que de nombreux lacs et vallées glaciaires. La flore est exubérante et la faune très diversifiée (UNESCO, 2002).

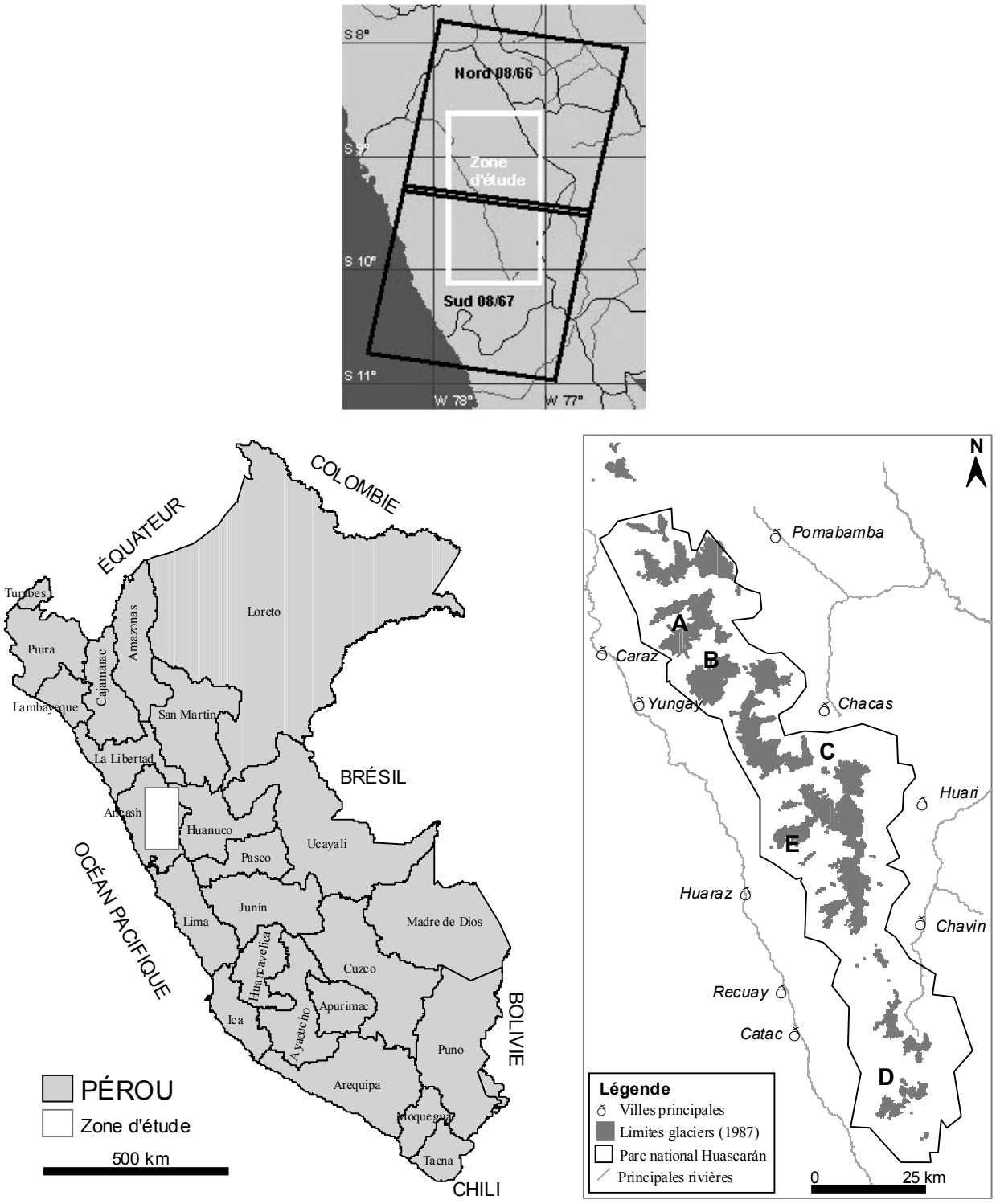


FIGURE 1 Localisation du secteur étudié ; gauche : au niveau du Pérou ; haut : couverture des images TM ; droite : le Parc national Huascarán, les lettres sur la carte correspondant aux zones de vérification de la cartographie (voir figure 10). *Location map. Left : general ; up : Landsat TM images coverage ; right : extent of Huascarán national park, with A-D letters marking control zones (see figure 10).*

3. DONNÉES SATELLITAIRES ET CARTOGRAPHIQUES

Deux images TM (nord 08/66 et sud 08/67) du satellite Landsat-5 prises le 31 mai 1987, couvrant une grande partie du département d'Ancash, ont été acquises auprès de l'U.S. Geological Survey (figure 1, centre). La résolution spatiale est de 28,5 m et les images sont de bonne qualité.

Les feuilles 18-h (Corongo), 18-i (Pomabamba), 19-h (Carhuaz), 19-i (Huari), 20-h (Huaraz), 20-i (Recuay), 21-h (Huaytapallana) et 21-i (Chiquián) de la carte nationale du Pérou au 1 : 100 000 (précision d'environ 100 m) ont été utilisées pour la rectification des images. Les courbes de niveau de ces huit feuilles, espacées de 200 m, ont été obtenues sous forme vectorielle auprès de l'INGEMMET (Institut National Géologique, Minier et Métallurgique du Pérou). Elles ont été corrigées et complétées par nos soins.

4. MÉTHODOLOGIE

La complexité topographique du parc induit un fort effet de relief sur les images et, par là même, sur les signatures spectrales des classes de couverture. Ce genre d'effet est idéalement corrigé par une normalisation topographique faisant appel au modèle numérique d'altitude (Dymond and Shepherd, 1999). Celui-ci devrait avoir une résolution spatiale au moins quatre fois supérieure à celle de l'imagerie à corriger (Sandmeier, 1995). Le MNA (modèle numérique d'altitude) interpolé par Silverio (2001) à partir des courbes de niveau de l'INGEMMET (50 m de résolution) ne répond pas à ces conditions, mais nous avons néanmoins tenté une normalisation en appliquant la correction cosinus disponible dans le logiciel ERDAS (1999). Les résultats se sont avérés mauvais avec, en particulier des artefacts de sous- ou sur-correction. Nous avons donc renoncé à cette normalisation, et avons eu recours aux rapports de bandes TM (indices), qui permettent une certaine atténuation du relief.

4.1. Pré-traitement des images

Deux sous-images ont été extraites à partir des images originelles, puis mosaïquées. La correction géométrique a été effectuée grâce à 91 points de contrôle, avec un modèle de transformation polynomiale du premier degré et un ré-échantillonnage avec la méthode du plus proche voisin (pixel de 28,5 m). L'erreur quadratique moyenne s'élève à 2,4 pixels, ce qui est acceptable compte tenu de la topographie très accidentée et de la relative imprécision de la carte au 1 : 100 000. L'image résultante de cette transformation comporte 7 730 lignes par 5 381 colonnes, dont a été extraite une fenêtre représentant la zone étudiée (figure 1, haut).

4.2. Calcul des indices

Les indices ou les rapports de bandes spectrales permettent de supprimer ou, en tout cas, de minimiser les différences d'illumination dues à la topographie (Colby, 1991). Ces rapports doivent être calculés à partir de canaux peu corrélés (visible et PIR) et, idéalement, après élimination du bruit additif (Bonn et Rochon, 1993). Aucune brume n'étant visible sur les images, cette dernière opération n'a pas été jugée nécessaire.

Afin de tenir compte au mieux des thèmes de couverture présents dans le PNH, allant de la glace aux surfaces végétalisées, nous avons utilisé les indices suivants :

– indice de végétation normalisé (NDVI), défini par :

$$NDVI = [TM4 - TM3] / [TM4 + TM3]$$

– indice de neige normalisé (*Normalized Difference Snow Index* ou NDSI), défini par :

$$NDSI = [TM2 - TM5] / [TM2 + TM5]$$

Selon Dozier (1989), le NDSI permet de distinguer la neige des sols, des roches et des nuages. Sidjak et Wheate (1999) ont montré que cet indice est efficace pour la cartographie de la neige en terrain accidenté.

4.3. Segmentation spatiale et création des masques

Les indices, dont les valeurs sont comprises entre –1 et 1, ont tout d'abord été utilisés pour définir les limites des entités suivantes, qui seront par la suite segmentées en vue de leur classification : lacs, glaciers, glaciers rocheux (Lambiel, 2000) et « autres thèmes ». Cette procédure, schématisée sur la figure 2, a passé par les étapes suivantes :

– lacs : mise à jour d'une carte digitale du réseau hydrographique de l'INGEMMET (1995 et 1996) par numérisation sur une composite TM 7/4/2 de 1987 ;

– glaciers : l'image du NDSI (moins les lacs) a été seuillée à ≥ 0,52, par inspection visuelle et sur la base de l'histogramme de la figure 3, puis les limites externes des glaciers ont été obtenues par vectorisation (laissant donc à l'intérieur de ceux-ci des enclaves rocheuses).

– glaciers rocheux/moraines : les limites de ce thème ont été obtenues par seuillage de l'image de NDSI (moins les lacs et glaciers) à ≥ –0,28 ; dans ce cas, l'histogramme étant unimodal, c'est l'interprétation visuelle de l'image qui a permis le choix du seuil. Là aussi, la vectorisation n'a concerné que les limites externes de cette entité.

– « Autres thèmes » : cette entité a été obtenue par différence, et représente le territoire non couvert par les lacs, glaciers et moraines.

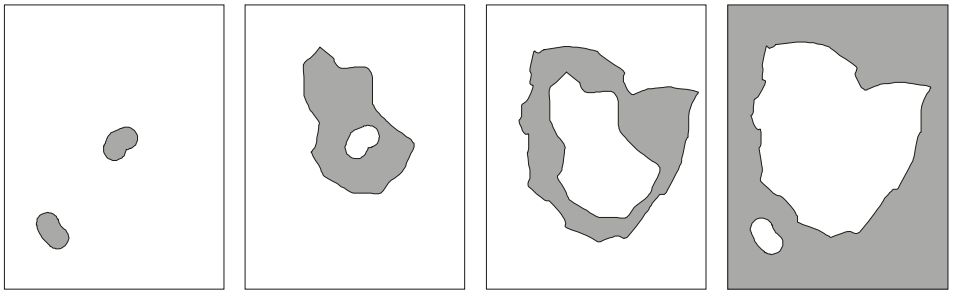
Entités	Lacs	Glaciers	Glaciers rocheux	Autres thèmes
Schéma				
Source	Vecteur / image	NDSI	NDSI	NDSI
Critères pour limites	–	NDSI ≥ 0,52	NDSI ≥ –0,28	Par soustraction
Utilisé pour classifier	NVDI	NDSI	NDSI	NVDI

FIGURE 2 Segmentation spatiale des entités, procédant de gauche à droite. Le rectangle symbolise les limites du PNH. *Spatial segmentation procedure (proceeds from left to right). The rectangle represents the park's limits.*

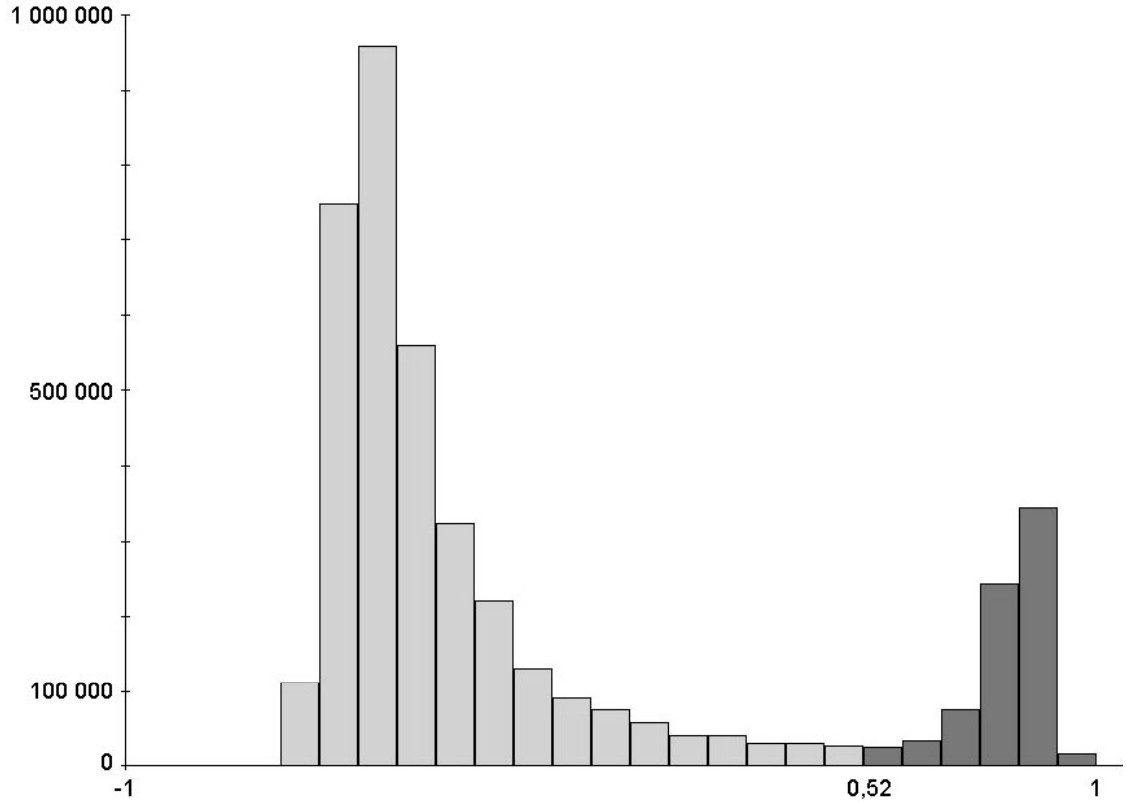


FIGURE 3 Histogramme du NDSI (sans les lacs). Les valeurs ≥ 0,52 définissent la limite des glaciers. *Histogram of NDSI (lakes excluded). Values ≥ 0,52 define glacier limits.*

4.4. Classification

Pour chaque région résultant de l'étape précédente, nous avons procédé à une segmentation par seuillage d'histogramme (Caloz et Collet, 2001) sur les images d'indices NDSI et NDVI (figure 2, dernière ligne).

4.4.1. Classification dans l'entité « glaciers »

À l'intérieur de cette zone, les valeurs du NDSI varient entre –1 et 1 (représentant la glace ainsi que les enclaves rocheuses, mentionnées plus haut). Nous avons pu y différencier trois classes, résumées dans le tableau 1. L'unimodalité de l'histogramme introduit un certain arbitraire dans la fixation des limites de classes.

4.4.2. Classification dans l'entité « glaciers rocheux »

Dans cette entité, les valeurs de NDSI sont comprises entre –0,56 et 0,89 (figure 4). La faible bimodalité de l'histogramme autorise la définition de trois classes spectrales, dont la correspondance thématique est résumée sur le tableau 2.

4.4.3. Classification dans l'entité « lacs »

Le NDVI donnant des résultats comparables à l'index de turbidité de Giuliani (2001), nous l'avons appliqué à l'ensemble des 403 lacs relevés dans le périmètre du PNH. Cet index varie entre –1 et 0,543 (figure 5), les valeurs supérieures provenant de mixels eau/rivage. Là encore, la polymodalité de l'histogramme permet une subdivision en trois niveaux reflétant bien les variations de la turbidité existant sur le terrain (haute, moyenne et basse ; tableau 3).

En plus des variations de turbidité existant d'un lac à l'autre, on constate aussi des variations à l'intérieur de ceux-ci : ces dernières se marquent généralement par des valeurs plus élevées à la périphérie, dues soit à l'influence du fond (Jaquet *et al.*, 1999), soit à des mixels eau/terre. Cette source de variabilité a été éliminée en assignant à chaque lac la valeur de la classe de turbidité majoritaire. Finalement, la turbidité des lacs plus petits que 1,5 ha a été considérée comme indéterminée, car ils sont représentés en majorité par des mixels eau/terre.

4.4.4. Classification de l'entité « autres thèmes »

Cette entité représente en général les surfaces végétalisés à des degrés divers, situées dans les parties basses du PNH (entre 2 400 et 4 800 m d'altitude). Le NDVI s'impose donc naturellement pour une classification préliminaire de la couverture du sol. Étant donné que cet indice ne compense que partiellement les effets topographiques (Caloz et Collet, 2001, p. 227), nous l'avons segmenté sur la base d'histogrammes calculés selon neuf grandes classes d'orientation (tableau 4).

Sur les histogrammes de la figure 6, on remarque une certaine similitude entre les différentes distributions (bimodalité). Les faibles différences dans la position du minimum entre les classes 1 et 2 sont considérées comme non significatives. En revanche, le pic secondaire correspondant à NDVI = 0 pour les versants orientés au S et SO est plus difficile à expliquer. Il ne provient pas de pixels ayant des ND saturés à 255 dans les canaux 3 et 4 (limités aux glaciers). Peut-être pourrait-on expliquer par un effet d'ombrage cette surabondance *a priori* anormale de valeurs de NDVI = 0 dans ces versants.

Le minimum inter-modal (NDVI entre –0,041 et 0) sépare les surfaces nues (classe 1) des surfaces végétalisées de densité croissante (classes 2 à 4). Celles-ci ont été définies en divisant en trois parties approximativement égales la queue droite des histogrammes. Elles seront interprétées en terme d'associations végétales à la section 6.2. Les segmentations par versant ont été regroupées en une seule carte représentative des parties basses du PNH.

4.4.5. Cours d'eau

Le tracé vectoriel du réseau hydrographique a été rastérisé à la résolution des images (28,5 m). Ceci représente le cours d'eau proprement dit, ses lits mineur et majeur, ainsi que ses berges. L'emprise surfacique de ce thème est donc approximative.

5. RÉSULTATS

La carte finale de la couverture du sol du Parc national Huascarán est le résultat de la superposition de toutes les cartes individuelles obtenues dans l'étape précédente. Au total, elle comporte 14 classes thématiques (tableau 5). Pour des raisons de lisibilité, nous n'en présentons que deux extraits (figures 7 et 9).

On constate un certain parallélisme entre les limites de classes de couverture et l'altitude. Cette relation est exprimée sur la figure 8, montrant une relation sigmoïde entre altitude et densité de la végétation exprimée par le NDVI. Par ailleurs, l'influence de l'exposition se marque aussi par une décroissance plus accentuée du NDVI avec l'altitude, et les valeurs du NDVI dans les classes d'altitudes 4 200–4 600 et 4 600–5 000 sont plus élevées à l'adret (NO) qu'à l'ubac (SE).

TABLEAU 1 Entité « glaciers ». Classes fondées sur le NDSI et leur interprétation thématique. *« Glacier » entities. Classes based on NDSI and their thematic interpretation.*

Classes	*Intervalle de valeurs*	*% de la surface*	*Interprétation*
1	[– 1 à 0,04]	0,2	Affleurements rocheux à l'intérieur des glaciers
2	[0,04 à 0,52]	3,1	Mélange neige, glace et roches
3	[0,52 à 1]	96,7	Neige et glace

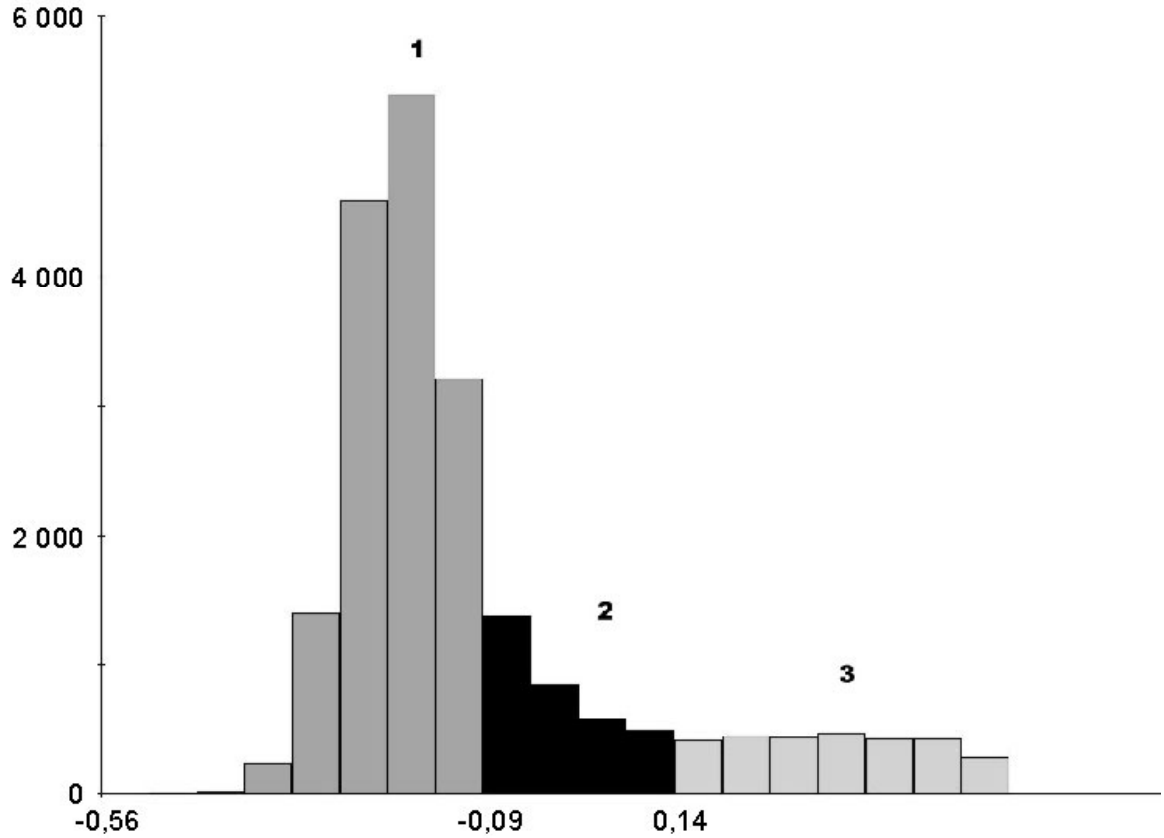


FIGURE 4 Histogramme du NDSI à l'intérieur de l'entité « glaciers rocheux », segmenté en trois classes. *Histogram of NDSI for the « rock glacier » entity, segmented in 3 classes.*

TABLEAU 2 Entité « glaciers rocheux ». Classes fondées sur le NDSI et leur interprétation thématique. *« Rock glacier » entities. Classes based on NDSI and their thematic interpretation.*

Classes	*Intervalle de valeurs*	*% de la surface*	***Interprétation***
1	[– 0,56 à – 0,09]	71,0	Glaciers rocheux
2	[–0 0,09 à 0,14]	15,1	Mélange glaciers rocheux et glace
3	[0,14 à 0,89]	13,9	Glace

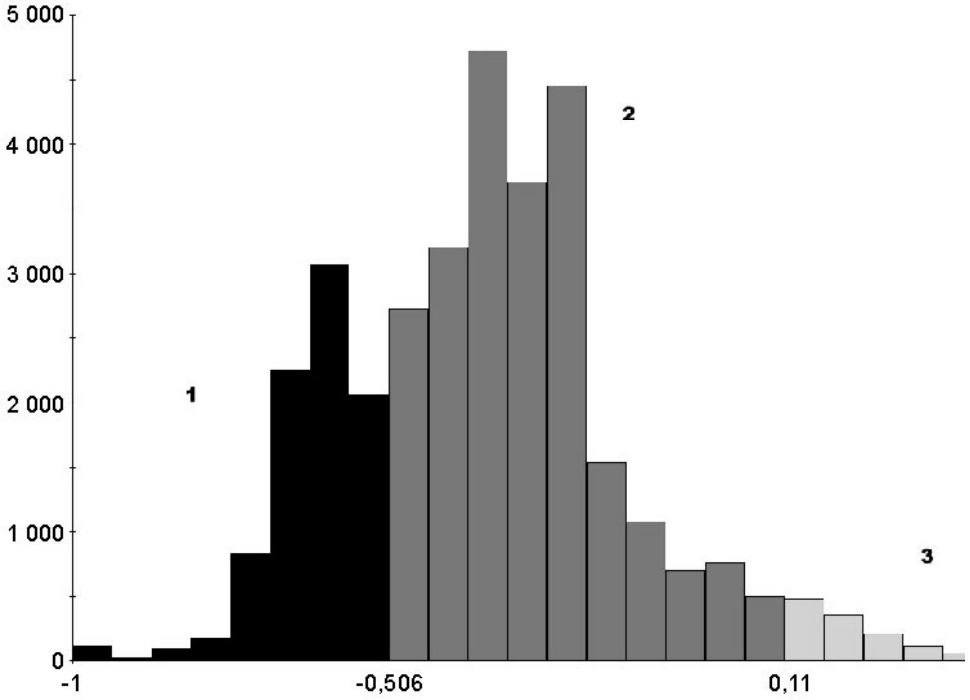


FIGURE 5 Histogramme du NDVI à l'intérieur de l'entité « lacs », segmenté en trois classes de turbidité décroissante. *Histogram of NDVI for the « lake » entity, segmented in 3 classes of decreasing turbidity*.

TABLEAU 3 Entité « lacs ». Classes fondées sur le NDVI et leur interprétation thématique (turbidité). *« Lake » entities. Classes based on NDVI and their thematic interpretation (turbidity).*

Classes	***Intervalle de valeurs***	*% de la surface*	*Interprétation*
1	[– 1 à – 0,506]	25,9	Lac à haute turbidité
2	[– 0,506 à 0,11]	70,3	Lac à moyenne turbidité
3	[0,11 à 0,543]	3,8	Lac à basse turbidité

TABLEAU 4 Segmentation du NDVI en fonction de l'orientation des pentes (hors glaciers). *NDVI segmentation following slope orientation (outside glaciated areas).*

Classe	*N*	*NE*	*E*	*SE*	*S*	*SO*	*O*	*NO*	*Plat*	*Min Max*
1	– 1,00 – 0,023	– 1,00 – 0,041	– 1,00 – 0,001	– 1,00 – 0,016	– 1,0 0,00	– 1,0 0,00	– 1,0 – 0,025	– 1,00 – 0,028	– 0,333 – 0,064	– 1,00 0,00
2	– 0,023 0,274	– 0,041 0,264	– 0,001 0,260	– 0,016 0,284	0,00 0,25	0,00 0,25	– 0,025 0,229	– 0,028 0,226	– 0,064 0,228	0,00 0,25
3	0,274 0,402	0,264 0,394	0,260 0,390	0,284 0,412	0,25 0,40	0,25 0,35	0,229 0,357	0,226 0,395	0,228 0,385	0,25 0,40
4	0,402 0,699	0,394 0,743	0,390 0,738	0,412 0,712	0,40 1,00	0,35 1,00	0,357 0,696	0,395 0,691	0,385 0,564	0,40 1,00
Moy	0,0912	0,1175	0,1063	0,0827	0,0664	0,0673	0,0709	0,0729	0,1357	0,0831
Ect	0,1811	0,1866	0,1908	0,1878	0,1966	0,1922	0,1877	0,1838	0,1549	0,1891

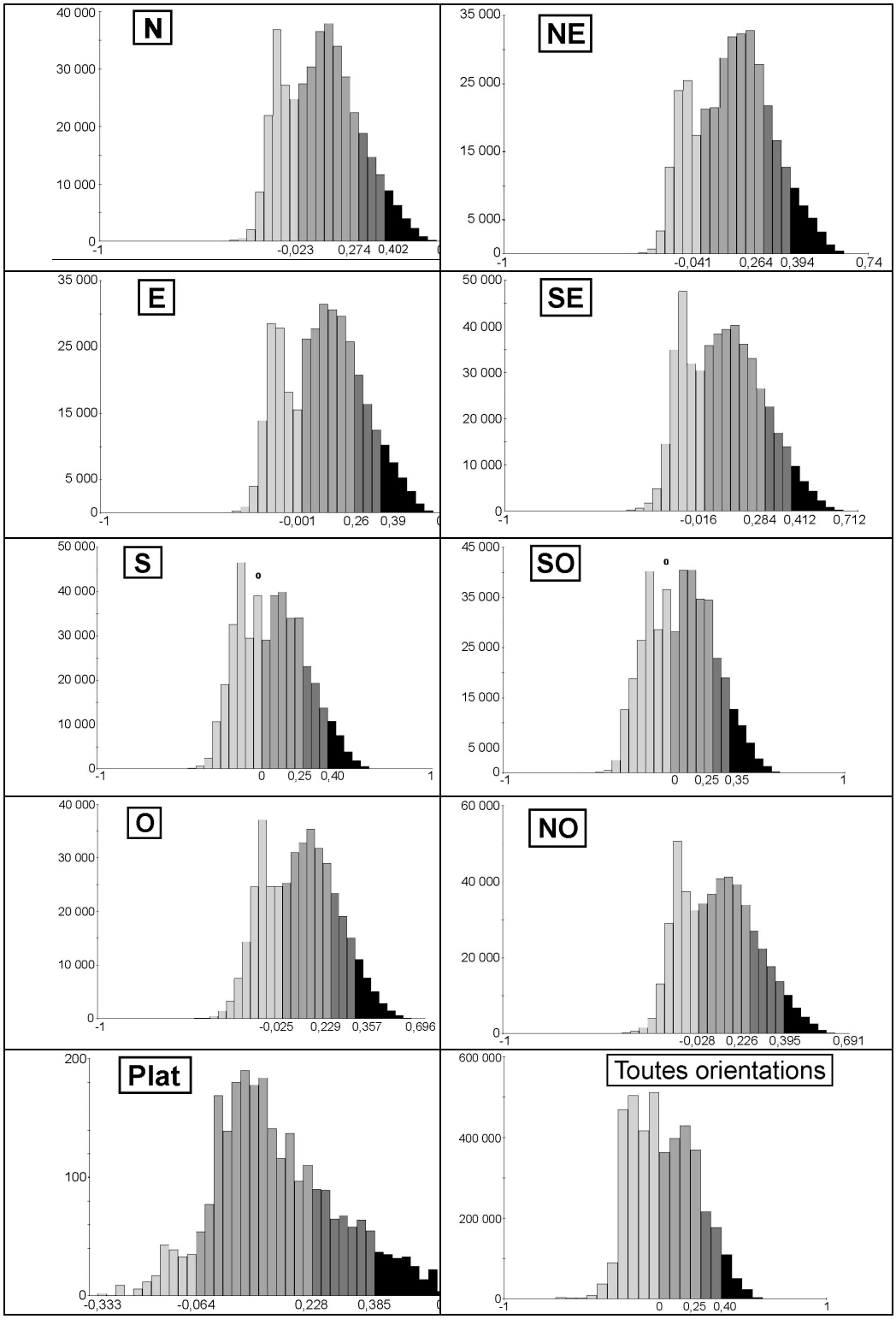


FIGURE 6 Histogrammes du NDVI des zones non glaciées. Le pic anormal est marqué par un « **o** ».
*Histogram of NDVI for non-glaciated areas. Anomalous peak marked by "**o**".*

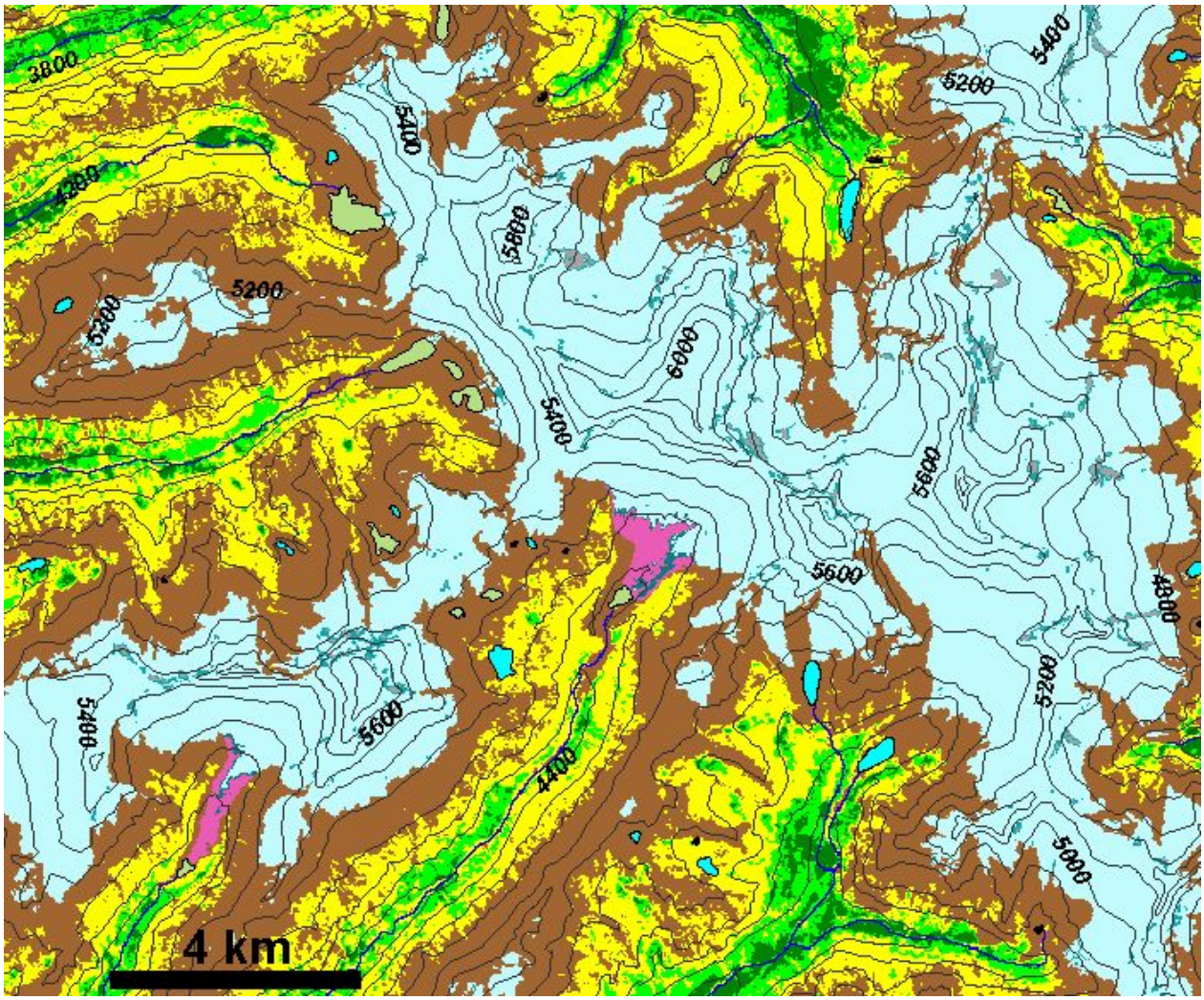




FIGURE 7 Carte de couverture du sol (extrait ; région Toclllaraju, Palcaraju, Chinchey et Pucaranra, au centre de l'image). *Map of land cover (extracts; Toclllaraju, Palcaraju, Chinchey et Pucaranra at image centre).*

TABLEAU 5 Statistiques de la carte de la couverture du sol du Parc national Huascarán. *Land cover statistics for Huascarán National Park.*

N°	*Thème*	*% surface*
1	Neige et glace	17,16
2	Mélange glace et roches	0,45
3	Affleurements rocheux à l'intérieur des glaciers	0,13
4	Glaciers rocheux	0,35
5	Mélange glaciers rocheux et glace	0,08
6	Lacs à basse turbidité	0,00
7	Lacs à moyenne turbidité	0,53
8	Lacs à haute turbidité	0,22
9	Lacs à turbidité indéterminée	0,04
10	Cours d'eau	1,06
11	Sols nus et affleurements rocheux	27,18
12	Végétation peu dense	37,88
13	Végétation dense	10,09
14	Végétation très dense	4,82
	Total (ha)	**340 186**

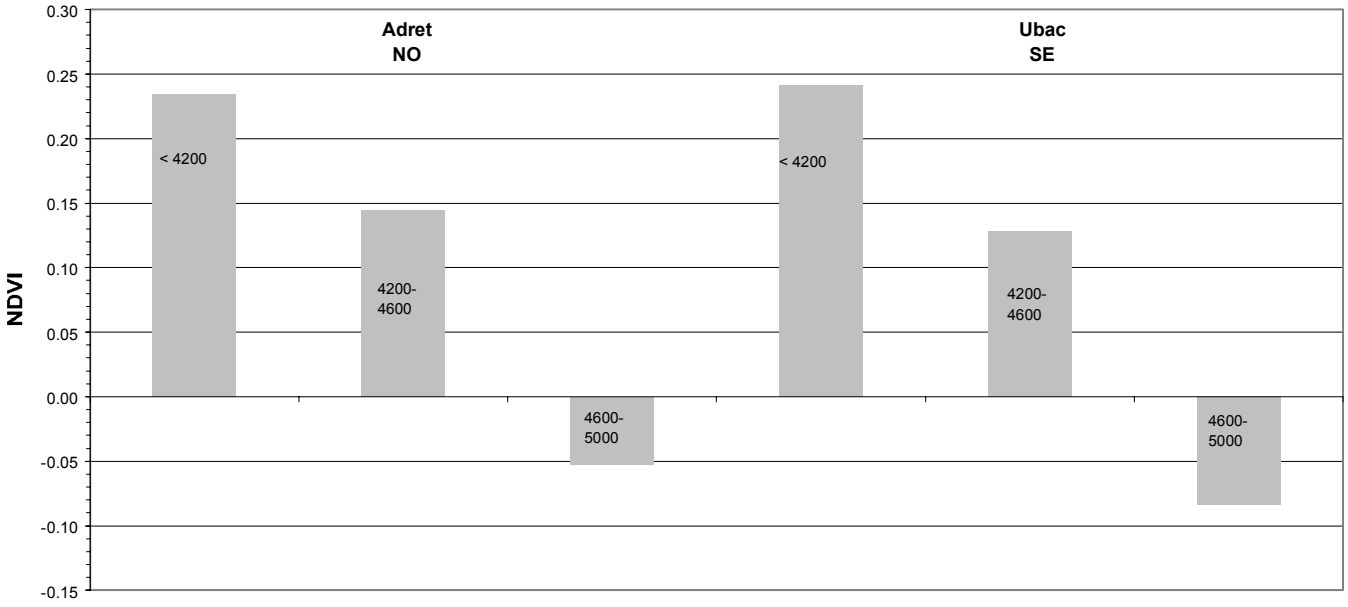


FIGURE 8 Relation entre le NDVI moyen et l'altitude (3 classes d'altitude) ainsi que l'exposition (versants NO et SE). *Relationship of mean NDVI with altitude (3 classes) and slope orientation (NW and SE).*

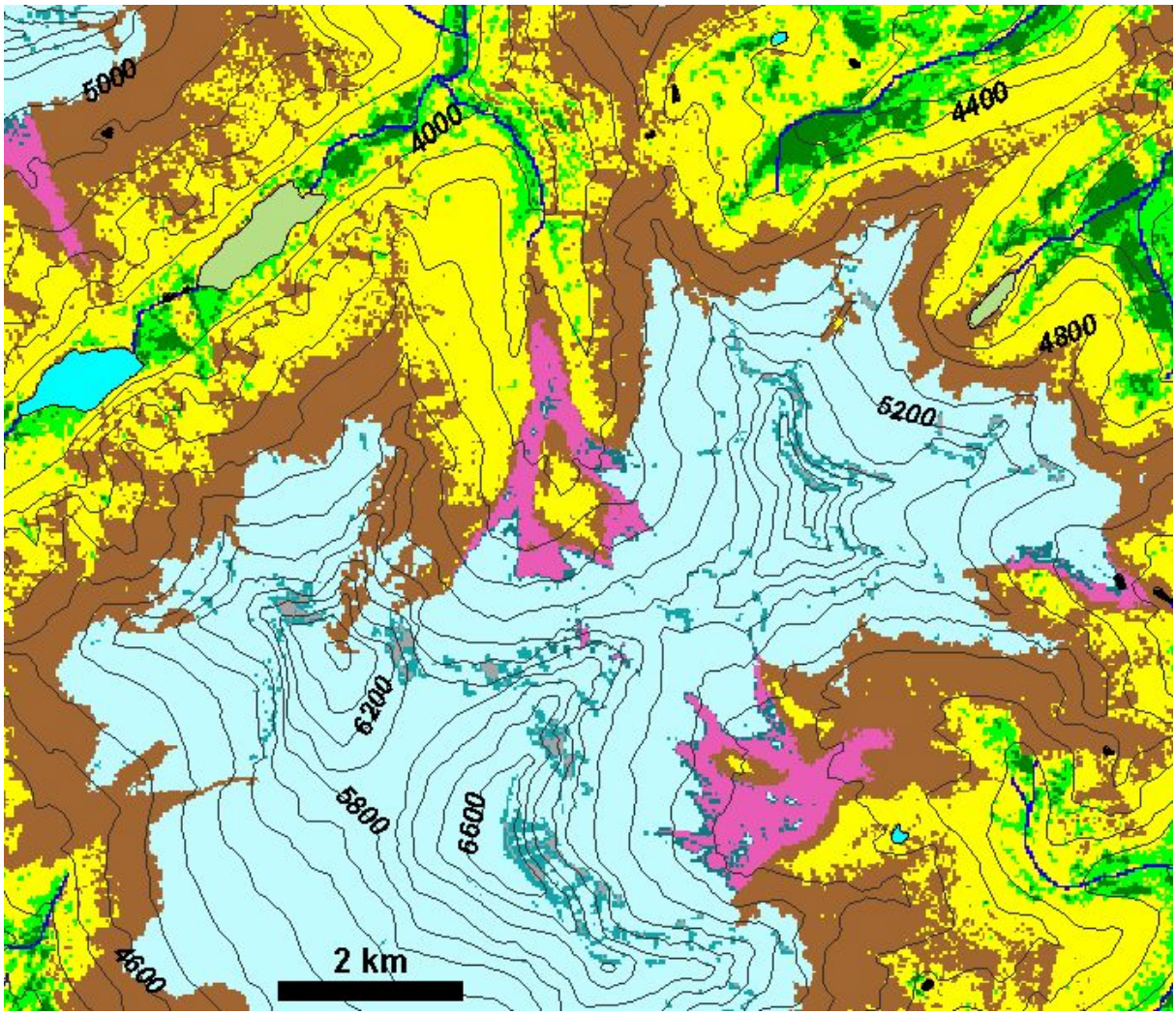




FIGURE 9 Transitions entre glaciers, glaciers rocheux et sols nus dans la région de Huascarán et Chopicalqui. *Transitions between glaciers, rock glaciers and bare soils in Huascarán et Chopicalqui regions.*

6. DISCUSSION

La carte de couverture du sol provisoire peut être évaluée en termes de fiabilité cartographique et de représentativité des associations végétales existant dans le Parc national Huascarán.

6.1. Fiabilité cartographique

Du point de vue de la géoréférence, l'imagerie satellitaire source de la carte de couverture du sol a été calée sur des cartes topographique au 1 : 100 000. C'est donc à une échelle du même ordre qu'elle doit être utilisée, en dépit d'une résolution spatiale de 28,5 m. Nous ne l'avons volontairement pas généralisée, cette opération étant irréversible : nous en laissons le soin aux usagers potentiels selon leurs besoins.

En l'absence d'un MNA de résolution suffisante, nous estimons que la segmentation du NDVI en fonction des classes d'exposition corrige l'essentiel des effets topographiques. En outre, rappelons que les trois classes de végétation choisies sont de nature ordinale. Alors que la limite entre végétation et sols nus est relativement nette (minimum inter-modal sur les histogrammes de la figure 6), celles qui séparent les classes « peu dense », « dense » et « très dense » sont arbitraires. Bien que répondant à une certaine logique, la variation de la limite de la végétation en fonction de l'exposition n'a pas pu être strictement confirmée statistiquement (grande variabilité autour des moyennes de la figure 6). Elle devra être testée sur une version future et améliorée de la carte de couverture du sol.

6.2. Interprétation

Dans cette version provisoire de la carte de couverture, les classes radiométriques définies par segmentation des indices spectraux n'ont pu être validées thématiquement que d'une manière partielle.

En ce qui concerne la couverture glaciaire, nous n'y avons pas distingué de sous-catégories (glace, neige de différente texture ; voir Hall *et al.*, 1988). La saison de prise de vue de l'image satellitaire (fin mai) limite fortement la présence de résidus neigeux en dehors des zones à substrat glaciaire. À ce titre, l'extension cartographique de la classe 1 (tableau 5) est donc représentative de l'année 1987. Comme la limite neige / non-neige est très bien marquée par le NDSI, l'estimation de la surface glacio-nivale est fiable à ± 1 pixel pour la date de l'enregistrement de l'image. Approximée par un tampon de ± 28,5 m autour de la limite, cela représente une surface de 60 359 ± 4 828 ha, soit un battement de ± 8 %. Cette valeur est relativement grande du fait de la tortuosité des limites et devra demeurer à l'esprit dans l'éventualité d'une analyse diachronique de la surface glaciaire fondée sur l'image satellitaire.

Les thèmes péri-glaciaires (tableau 5, classes 4-5) sont constitués de glaciers rocheux, avec des zones plus riches en glace morte ou alors en débris rocheux. Les différentes transitions possibles entre la glace et les zone d'altitude plus basse sont représentées sur la figure 9. On y voit, issus d'un ensellement des glaciers Huascarán et Chopicalqui, deux glaciers rocheux dont la signature se différencie clairement de celle des aires de retrait constituées de substratum rocheux et de sols nus.

Pour ce qui est des lacs, ceux qui sont directement alimentés par des glaciers ou des glaciers rocheux ont une turbidité plus élevée que le autres (figures 7 et 9).

En l'absence d'une carte phyto-sociologique du PNH, il n'a pas été possible de calculer une matrice de confusion (Hubert-Moy *et al.*, 2001) avec les résultats de la cartographie satellitaire. Nous avons donc examiné la correspondance entre les classes de densité et les associations végétales observées sur le terrain par comparaison visuelle au sein de cinq zones de contrôle. Leur localisation est reportée sur la figure 1(A-E) et leur représentation photographique sur la figure 10. On a relevé dans ces zones les associations végétales dominantes, qui sont reportées dans le tableau 6.

Le rendu par la carte de couverture des thèmes non végétalisés semble adéquat au vu des figures 10A, B et E. La végétation peu dense est principalement constituée d'herbes hautes (*Stipa ichu*, figure 10D), alors que la végétation dense est surtout buissonnante. La classe de végétation très dense ne permet pas de distinguer entre la forêt mixte à *Gynoxis* et à *Polylepis* et les herbes basses, localisées dans les fonds de vallée plus humides (figure 10C).

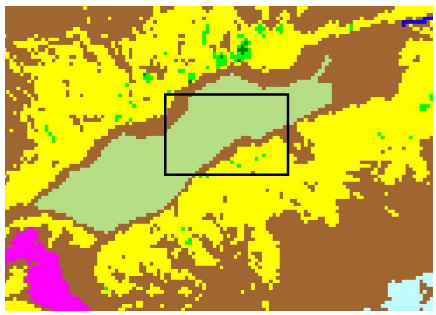
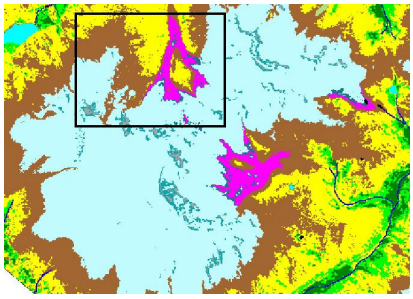
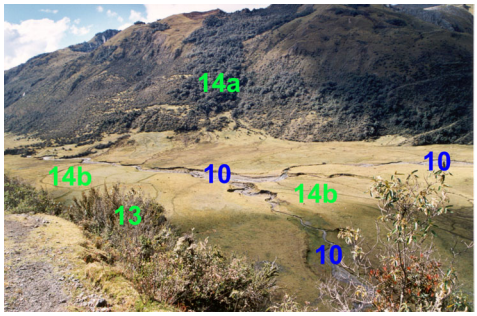
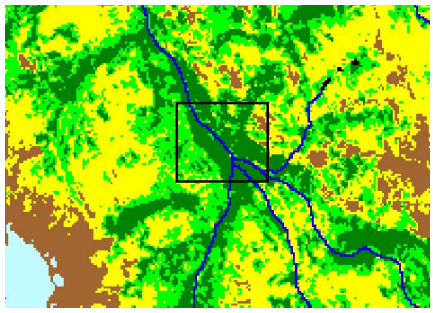
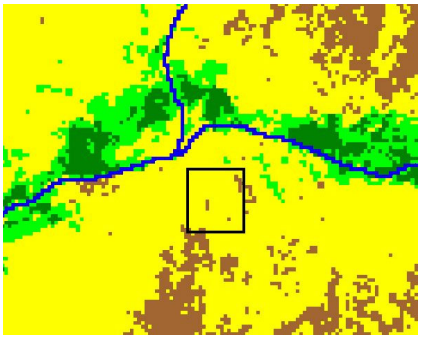
Photo	*Carte de couverture*
A) Laguna Parón 4200 m  Vue vers E-SE	
B) Nevados Huascarán S 6768 m et N 6655 m  Vue vers SO	
C) Quebrada Juitush (3900 m)  Vue vers N	
D) Secteur Carpa : Puya Raimondi à 4300 m  Vue vers E	

FIGURE 10 *(suite et légende page suivante)*

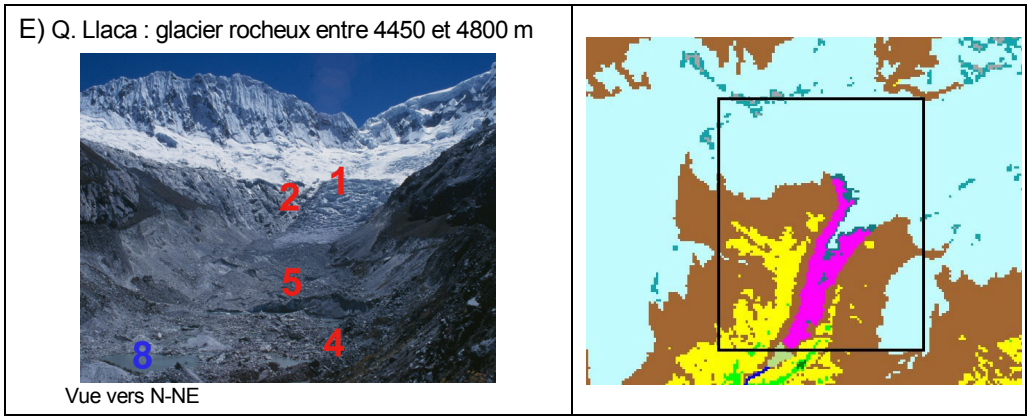


FIGURE 10 Zones de contrôle pour les classes de couverture du sol. À gauche, aspect au sol, avec les numéros de classe en rouge. À droite, localisation sur la carte de couverture. Photos W. Silverio : A (2000), B (1989), D (1987) et E (2001). C. Bugniet : C (2000). *Ground truthing areas for land cover classes. Left: view from the ground, with class numbers in red. Right: extract of land cover map. Photos W. Silverio : A (2000), B (1989), D (1987), E (2001) et C. Bugniet : C (2000).*

TABLEAU 6 Correspondance entre les classes de densité et les associations végétales. *Correspondence between vegetation density classes and associations. Species names according to Kolff and Kolff (1997) and Huascarán National Park (1990).*

N°	*Classe*	*Interprétation*	*Espèces**
12	Végétation peu dense	Herbes hautes	Prédominance : *Stipa ichu* (*ichu, ocsha*) Autres espèces *Puya raimondi* (*cuncush*), etc.
13	Végétation dense	Buissons et forêt mixte	Buissons : *Escallonia resinosa* (*chachacoma*), *Oreocallis grandiflora* (*tsacpa*), *Barnadesia dombeyana* (*qontsi casha*), etc.
14	Végétation très dense	Forêt mixte (14a) et/ou Herbes basses (14b)	Forêt mixte : *Gynoxis sp.* (*japru*) , *Polylepis* (*quenual*), *Buddlejia incana* (*quishuar*), *Tristerix longibracteatus* (*pupa*), *Passiflora trifoliata* (*purush*), etc. Herbes basses : *Plantago rigida* (*tsampa*), *Distichia muscoides* (*qachqa*), etc.

* *Noms scientifiques des espèces d'après Kolff and Kolff (1997) et Parque Nacional Huascarán (1990).*

7. CONCLUSIONS

La carte de la couverture du sol présentée dans ce travail est la première du genre consacrée au Parc national Huascarán. Les effets topographiques sur l'imagerie satellitaire, dus au fort relief de la région, n'ont pas pu être corrigés formellement en l'absence d'un modèle numérique d'altitude adéquat. Nous avons donc eu recours aux indices NDVI et NDSI au sein d'une procédure de segmentation tenant compte de l'orientation des versants.

Au vu des premières vérifications de terrain, la représentation cartographique peut être considérée comme bonne pour la couverture neigeuse, les glaciers rocheux et les lacs, et satisfaisante pour la végétation. La couverture du sol du PNH se répartit entre la végétation (53 % de la surface), le substratum rocheux, les glaciers rocheux et les sols nus (27 %) ainsi que la glace et neige (17 %). Ces proportions sont représentatives de la situation en 1987. Notre carte de couverture du sol représente donc une base à incorporer dans un système d'information territoriale, en vue de futures comparaisons multidates, plus particulièrement dans le domaine de l'évolution glaciaire et des aléas qui lui sont liés (Silverio and Jaquet, 2002). Elle pourra aussi être comparée aux couvertures annuelles qui seront élaborées sur la base des données du capteur MODIS/TERRA (Hodges *et al.*, 2001).

Références

Nous remercions le personnel du Parc national Huascarán pour les informations et documents mis à notre disposition, ainsi que le rédacteur de

la revue et les deux évaluateurs, dont les remarques nous ont permis d'améliorer une première version du manuscrit.

Références

Bonn, F. et Rochon, G. (1993) Précis de télédétection, volume 1 : principes et méthodes. Presses de l'Université de Québec et AUPELF, Sainte-Foy, 485 p.

Caloz, R. et Collet, C. (2001) Précis de télédétection, volume 3 : Traitements numériques d'images de télédétection. Presses de l'Université de Québec et AUF, Sainte-Foy, 386 p.

Cihlar, J. (2000) Land cover mapping of large areas from satellites : status and research priorities. International Journal of Remote Sensing, vol. 21, n° 6-7, p. 1093-1114.

Colby, J.D. (1991) Topographic Normalization in Rugged Terrain. Photogrametric Engineering and Remote Sensing, vol. 57, n° 5, p. 531-537.

Dozier, J. (1989) Spectral signature of Alpine snow cover from Landsat Thematic Mapper. Remote Sensing of Environment, vol. 28, p. 9-22.

Dymond, J.R. and Shepherd, J.D. (1999) Correction of the Topopgraphic Effect in Remote Sensing. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 37, n° 5, p. 2618-2619.

ERDAS (1999) Field Guide. Erdas, Inc., Atlanta, Georgia, 5ème édition, 672 p.

Giuliani, G. (2001) Traitement et interprétation de l'imagerie satellitaire multispectrale des lacs subalpins. Diplôme d'études supérieures en sciences naturelles de l'environnement, Université de Genève, 274 p. Disponible sur http://www.unige.ch/sciences/terre/geologie/frame/work_fr.htm

Hall, D.K., Chang, A.T.C. and Siddalingaiah H. (1988) Reflectances of Glaciers as Calculated Using Landsat-5 Thematic Mapper Data. Remote Sensing of Environment, vol. 25, p. 311-321.

Hodges, J. C. F., Friedl, M. A., and Strahler, A. H. (2001) The MODIS Global

Land Cover Product: New Data Sets for Global Land Surface Parameterization,

Proceedings of the Global Change Open Science Conference, Amsterdam, 2001. http://edcdaac.usgs.gov/modis/mod12q1.html.

Hubert-Moy, L., Cotonnec, A., Le Du, L., Chardin, A. et Perez, P. (2001) A Comparison of parametric classification procedures of remotely sensed data applied on different landscape units. Remote Sensinf of Environment, vol. 75, p. 174-187.

Jaquet, J.-M., Tassan, S., Barale, V. et Sarbaji, M. (1999) Bathymetric and bottom effects on CZCS chlorophyll-like pigment estimation : data from the Kerkennah Shelf (Tunisia). International Journal of Remote Sensing, vol. 20, n° 7, p. 1343-1362.

Kolff, H. and Kolff, K. (1997) Wildflowers of the Cordillera Blanca. The Mountain Institute, Lima, 284 p.

Lambiel, C. (2000) Le permafrost. http://www.unil.ch/igul/RECHERCHE/PERMAFROST/Def_permaf.html

Parque Nacional Huascarán (1990) Plan Maestro, Generalidades y diagnostico. Parc national Huascarán, document interne, 162 p.

Sandmeier, S. (1995) A Physically-Based Radiometric Correction Model, Correction of Atmospheric and Illumination Effects in Optical Satellite Data of Rugged Terrain. Remote Sensing Series, vol. 26, Remote Sensing Laboratories, Department of Geography, University of Zurich, 42 p.

Sidjak R. W. and Wheate R. D. (1999) Glacier mapping of the Illecillewaet Icefield, British Columbia, Canada, using Landsat TM and digital elevation model data. International Journal of Remote Sensing, vol. 20, n° 2, p. 273-284.

Silverio, W. (2001) Élaboration d'un SIG pour la gestion d'une zone protégée de haute montagne : application au Parc national Huascarán, Pérou. Mémoire de spécialisation en géomatique, Université de Genève, 112 p.

Silverio, W. and Jaquet, J.-M. (2002) Land cover changes in Cordillera Blanca (Peru) : Glacial retreat, avalanches and mining development. In « Atlas of Global Change », UNEP GRID - Sioux Falls (USA).

UNESCO (2002) Description des caractéristiques du Parc national Huascarán, comme faisant partie du patrimoine mondial. http://www.wcmc.org.uk:80/protected_areas/data/wh/huascara.html