

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Juliana Podgórskiego
p.t. „Badanie procesów zachodzących na powierzchni lodowca andyjskiego w dobie intensyfikacji
zmian klimatu w oparciu o metody teledetekcyjne”

Trzon przedstawionej do recenzji pracy doktorskiej stanowią trzy wieloautorskie artykuły naukowe, w którym doktorant jest wiodącym autorem. Jego udział stanowi odpowiednio 75%, 60%, 60%. Dwa artykuły ukazały się w *Remote Sensing* i jedna w *Science of the Total Environment*. Są to czasopisma o wysokiej punktacji i wysokim IF. Artykuły są ze sobą powiązane tematycznie (dotyczą współczesnego andyjskiego środowiska glacialnego) i nie ulega wątpliwości, że mogą być podstawą do ubiegania się mgr. Juliana Podgórskiego o stopień doktora w dyscyplinie nauki o Ziemi i środowisku.

Zestaw artykułów obejmuje:

1. Podgórski, J., Pętlicki, M. 2020. Detailed Lacustrine Calving Iceberg Inventory from Very High Resolution Optical Imagery and Object-Based Image Analysis. *Remote Sensing* 12, 1807.
2. Podgórski, J., Kinnard, C., Pętlicki, M., Urrutia, R. 2019. Performance Assessment of TanDEM-X DEM for Mountain Glacier Elevation Change Detection. *Remote Sensing* 11, 187.
3. Podgórski, J., Pętlicki, M., Fernandez, A., Urrutia, R., Kinnard, C. 2023. Evaluating the impact of the Central Chile Mega Drought on debris cover, broadband albedo, and surface drainage system of a Dry Andes glacier. *Science of the Total Environment* 905, 166907.

Artykuły poprzedzone są rozległym opisem ciągu tematycznego jaki tworzą. Opis ten składa się ze streszczenia, wprowadzenia, streszczenia poszczególnych publikacji oraz rozdziału podsumowującego. Całość napisana jest w wersji polskojęzycznej i anglojęzycznej. Zawiera w 17 rycin, w skład których wchodzi 29 map, 27 wykresów, 2 ideogramy oraz 5 tabel. Są to ilustracje zaczerpnięte z ww. artykułów, nieznacznie zmodyfikowane. W artykułach znajdujemy łącznie aż 34 ryciny.

Moim zdaniem tytuł rozprawy doktorskiej jest trochę niezgrabny, gdyż nie powinien koncentrować się na czynności „badania” lecz podkreślać przedmiot badań.

Uwagi do **rozdziału 1 (Wprowadzenie)**

Rozdział zawiera wprowadzenie do tematyki współczesnej recesji lodowców na świecie i jest generalnie napisany poprawnie. Moja drobne uwagi są następujące.

- W roz. 1.1 (*Motywacja podjęcia badań*) Autor pisze, że na akumulację lodowca składa się *akumulacja śniegu i lodu wskutek opadów*, pomijając tym samym akumulację z lawin i resublimację.
- Niektóre zdania są niejasne, np. „*Wśród lodowców o powierzchni powyżej 2 km² 44% posiada ograniczoną pokrywę osadową o powierzchni ponad 0,1 km², a 15% znaczną pokrywę osadową (powyżej 1 km²).*” Po pierwsze, określenie „*ponad 0,1 km²*” nie stoi w sprzeczności z określeniem „*powyżej 1 km²*”, a po drugie zupełnie nie wiadomo na podstawie jakiej próby statystycznej to stwierdzono.
- Dalej pisze Autor: *Gruz i osady pokrywają ponad 7% powierzchni lodowców górskich na Ziemi.* Zdanie to jest nielogiczne, bo gruz to też osad.
- Następnie czytamy: *Badanie oparte na modelowaniu numerycznym pokazało, że lodowce, na których szybko akumulują się osady, są dłuższe a ich czoła są cieńsze i płyną wolniej.* Zachodzi pytanie: dłuższe od czego i z jakiego powodu miałyby być dłuższe, skoro ich czoła ulegają recesji?

Rozdział 1.2 (*Obszar badań*) napisany jest w zasadzie jako rozszerzenie poprzedniego rozdziału.

W rozdziale 1.3 (*Cele pracy*) Autor stawia podstawowe pytanie badawcze niniejszej dysertacji: *Jakie procesy zachodzą na powierzchni lodowca górskiego pod wpływem pustynnienia – ewolucji lokalnego klimatu ku cieplejszemu i bardziej suchemu?*

- Uważam, że w świetle tego co zostało już napisane w poprzednich rozdziałach tak postawione pytanie jest dość banalne (znamy już na nie odpowiedź). Podobnie banalna jest hipoteza robocza: *Długotrwała susza wywołuje zmianę charakteru interakcji pomiędzy powierzchnią lodu, wodą roztopową, materiałem skalnym a atmosferą... etc.* W świetle tego co przeczytałem w poprzednich rozdziałach wydaje się ona zbyt oczywista. Moim zdaniem, należało pytanie badawcze skonstruować nieco inaczej, a mianowicie *Do jakiego stopnia zaszły zmiany w przebiegu procesów glacialnych i hydrologicznych ...* A hipotezę bardziej szczegółowo.

Bardzo ciekawy wydaje się poboczny cel badań jaki była ocena skuteczności obiektowej analizy obrazu i uczenia maszynowego w kartowaniu lodu lodowcowego i zalegających na nim osadów. Na tym etapie lektury niejasna jest jednak zasadność analizowania gór lodowych nie związanych z badanym lodowcem. Dopiero w dalszej części pracy znajdujemy uzasadnienie.

Rozdział 1.4 (*Dobór lodowców*) zawiera rzetelną charakterystykę lodowców, ale szkoda, że Autor nie pisze, choćby krótko o wykształceniu przedpola lodowca Universidad.

- Czy na obrazie lotniczym widać morenę z małej epoki lodowej i wały recesyjnej moreny czołowej?

Mam następujące uwagi do części Ryciny 1.1D:

- Co było wyznacznikiem czoła lodowca? W sytuacji tak dużego przykrycia osadami wyznaczenie przebiegu czoła jest bardzo kłopotliwe. Moim zdaniem, Autor do lodowca włączył część jego przedpola – jasny kolor wskazuje raczej na sandr lub morenę denną.
- Ponadto, błędnym jest rysowanie górnej granicy cyrku poniżej górnej krawędzi lodowca z 2013 r. Do cyrku lodowcowego zaliczamy wszak także ścianę podciętą przed lodowiec, gdy zajmował on większy obszar.
- Dziwi stwierdzenie, że jezioro przed czołem lodowca San Quintín obecnie jest największym proglacialnym jeziorem otaczającym Północne Patagońskie Pole Lodowe. Czyż nie jest min sąsiednie jezioro przed czołem lodowca San Rafael?

Przedstawiona do recenzji praca doktorska opiera się wyłącznie na badaniach teledetekcyjnych. W rozdziale 1.5 (*Dobór metod*) czytamy o zastosowanych metodach obróbki obrazów satelitarnych i lotniczych. Do kartowania facji lodowcowych wykorzystano Obiektową Analizę Obrazów oraz numeryczne modele terenu (NMT). Autor przeprowadził nadzorowaną klasyfikację obiektową obrazu przy pomocy algorytmu uczenia maszynowego Losowych Lasów Decyzyjnych. Stworzył wskaźnik spektralny wyczulony na obecność materiału skalnego na powierzchni lodu i śniegu.

Tempo obniżania się powierzchni lodowca Universidad i zmiany sieci drenażu opracowano poprzez porównanie NMT z różnych lat. Wykorzystano w tym celu satelitarne obrazy radarowe (TanDEM-X, SRTM, ASTER), lotniczy skaniny laserowy oraz obrazowanie z bezzałogowego statku powietrznego.

Stworzono dwie mapy strumieni supraglacialnych, co dało możliwość obliczenia gęstości drenażu oraz wykazania zmian organizacji średniego rzędu strumieni (czyli zmiany w rozwinięciu sieci drenażu).

Uwagi do **rozdziału 2** (*Streszczenie publikacji*)

Jest to zasadniczy rozdział, gdyż przedstawia w dokładniejszy sposób treść artykułów będących podstawą niniejszej dysertacji. Niechronologiczna kolejność przedstawionych artykułów (artykuł nr 1 jest z 2020 a nr 2 jest z 2019) może dziwić. Uzasadnieniem jest to, co Autor pisze pod koniec streszczenia artykułu 1: *Duża waga refleksji jako kryterium klasyfikacji algorytmem Losowych Lasów Decyzyjnych położyła fundament pod zastosowanie opisanej w Artykule I metody do kartowania obszarów innych niż jezioro proglacialne.*

Artykuł nr 1

Głównym metodycznym wyzwaniem artykułu nr 1 było wyodrębnienie na obrazach satelitarnych w jez. San Quintin gór lodowych zawierających osady glacialne z tła jakim była powierzchnia wody, w której zawieszono były osady tego samego typu. Obecność osadów w lodzie gór lodowcowych oraz w wodzie jeziora uniemożliwiła klasyfikację obrazu wyłącznie na podstawie odbiciowości analizowanych powierzchni.

W artykule wykorzystano wysokorozdzielcze zdjęcie satelitarne z satelity WorldView-2 oraz NMT wytworzony na podstawie zdjęć stanowiących stereoparę. Po dokonaniu ortorektyfikacji i wyostrzeniu otrzymano obraz o rozdzielczości 0,5 m/piksel. Na NMT wyznaczono ręcznie obszar wody nie pokrytej lodem. To pozwoliło na stworzenie modelu wysokości względnych (wNMT).

Obrazy satelitarne i wNMT podzielono na segmenty w programie eCognition. Analizowane obiekty podzielono na 4 typy: „woda”, „czysty lód”, „lód z wtopionymi osadami”, „gruz lodowy” oraz „cień”. Zastosowano klasyfikację nadzorowaną opartą na uczeniu maszynowym (algorytm Losowych Lasów Decyzyjnych). Określono zbiór treningowy oraz następujące parametry charakteryzujące dany segment: wartości odbiciowości, wskaźnik spektralny NDSI, miary tekstury Haralicka, kontrast graniczny segmentu w kanale panchromatycznym oraz wysokości względne.

Z powodu wzajemnego częstego stykania się gór lodowych powstały segmenty obejmujące więcej niż jedną górę lodową. W związku z tym zastosowano w kolejnym kroku segmentację wododziałową bazującą na analizie konturów w skali szarości. W celu oceny dokładności uzyskanego obrazu porównano go do mapy ręcznie zdigitalizowanych gór lodowych. Następnie przeanalizowano góry lodowe na podstawie ich powierzchni przekroju na poziomie wody oraz ich objętości.

- Autor nie podaje tu informacji, czy chodzi o objętość tylko tych części gór lodowych, które wystają z wody. Natomiast w artykule, którego dotyczy niniejszy opis, czytam, że obliczono całkowitą objętość gór lodowych zakładając gęstość lodu 900 kg/m^3 i gęstość wody 1000 kg/m^3 . Jest to oczywiście duże uproszczenie. W celu wyliczenia całkowitej wysokości góry lodowej wysokość względna została pomnożona przez 9. Jest to ponownie duże uproszczenie, gdyż góra lodowa nie jest kulą lecz ma nierówną powierzchnię.

Liczba gór lodowych wykrytych przez klasyfikację wyniosła 3184, co jest nieznacznie mniejszą liczbą w stosunku do ręcznego kartowania (3213 gór). Częstotliwość występowania gór w poszczególnych rozmiarach była również zbliżona poza najmniejszymi górami dla których wystąpiło istotne niedoszacowanie. Rozkład statystyczny najlepiej pasujący zarówno do powierzchni gór lodowych jak i do ich objętości to rozkład logarytmiczny normalny.

Pierwszym wnioskiem jakie wyciągnięto z pracy jest to, że klasyfikacja obiektowa Losowym Lasem Decyzyjnym prawidłowo wykrywa góry lodowe w środowisku, w którym obiekty (poszczególne góry lodowe) można łatwo wyróżnić z tła powierzchni wody. Znaczące trudności pojawiają się w sytuacji stłoczenia gór lodowych oraz występowania licznych małych fragmentów gór (growlerów). W większości przypadków kryterium wysokości ponad powierzchnią wody było wystarczające, żeby poradzić sobie z brakiem różnic w odbiciowości i oddzielić „brudny lód” od klasy „woda”.

W dalszej części wniosków Autor jest bardziej krytyczny i stwierdza, że próba kartowania gór lodowych ciasno upakowanych w bezpośrednim sąsiedztwie lodowca nie zakończyła się całkowitym sukcesem. Jako główną przyczynę skazuje to, że gruz lodowy przypomina bardziej ciągłe pole jasnego lodu niż zbiór oddzielnych gór lodowych. Poza tym, granice między poszczególnymi górami lodowymi były trudne do wyróżnienia nawet poprzez wizualną ocenę obrazu.

Na zakończenie Autor stwierdza, że w środowisku jeziora proglacialnego statystyczny rozkład gór lodowych wygląda zasadniczo podobnie jak w środowisku morskiej zatoki proglacialnej, co wskazuje na uniwersalność procesów zaangażowanych w powstawanie i ewolucję gór lodowych.

- Moje drobne pytanie brzmi: czy glaciologia wyraźnie rozróżnia gruz lodowy od growlerów?

- Nie jest dla mnie jasne jakim kryterium kierowano się dzieląc obiekty na „lód pokryty osadem”, a „czysty lód”. Przecież w rzeczywistości mamy do czynienia ze stopniowym przejściem jednego w drugie. Do jakiego stopnia lód musiał być pokryty osadem, żeby otrzymać odpowiednią nazwę?
- Poza tym, sądzę, że nie chodziło tylko o osad zalegający na powierzchni lodu, lecz o odpowiednio niską odbiciowość, która może wynikać także z osadu wewnątrz lodu.

Artykuł nr 2

Celem badań było oszacowaniem zmian grubości lodowca Universidad w pierwszych latach XXI w oraz ocena wartości modelu TanDEM-X DEM do badań glaciologicznych. W tym celu model TanDEM-X DEM (postały z obrazów radarowych, średnia z pomiarów z lat 2011-14) zestawiono ze starszymi modelami radarowymi: SRTM (pomiar w 2000 r) i ASTER (pomiar w 2003 r). Rozdzielczość tych trzech modeli wynosiła 12 i 30 m/piksel. Dodatkowo wykorzystano dokładny referencyjny model (1 m/piksel) powstały z lotniczego skaningu laserowego (ALS) przeprowadzonego w 2013 r.

/

Na NMT wyznaczono obszar lodowca oraz strefę wokół niego zakładając brak zmienności rzeźby terenu w okresie wykorzystanego obrazowania satelitarnego. Skorygowane NMT porównano ze sobą w celu obliczenia średniej zmiany miąższości lodowca w okresie 2000 – 2013 r. Utratę masy obliczono jako iloczyn średniej zmiany wysokości oraz gęstości lodu, przyjętej na poziomie $850 \pm 60 \text{ kg/m}^3$

- Uważam, że założenie braku istotnych zmian w rzeźbie otoczenia lodowca w tym okresie jest problematyczne i może stanowić źródło błędu. W ciągu 13 lat paraglacjalne procesy stokowe, uwarunkowane zanikiem podparcia glacialnego, są w stanie znacząco przekształcić przedpole lodowca, wały morny bocznej oraz stoki żłobu lodowcowego. Czy zostało to w jakikolwiek sposób sprawdzone?

W wynikach, Autor pisze, że niewielki pionowy wektor przesunięcia wskazał na podobną dokładność pionową wykorzystanych modeli radarowych. Duża różnica wysokości pomiędzy TanDEM-X DEM a modelem referencyjnym ALS uwidoczniły się na stromych stokach otaczających lodowiec, szczególnie tych o nachyleniu powyżej 40° .

W latach 2000 – 2013 powierzchni lodowca obniżyła się średnio o 6,77 m, co można przeliczyć na ubytek 0,44 m ekwiwalentu wodnego rocznie. Największą utratę masy zaobserwowano poniżej lodospadów (3,46 m rocznie) i w strefie czołowej.

Porównanie modeli SRTM i ALS wyraźnie uwidacznia rolę moreny powierzchniowej w hamowaniu topnienia lodowca. Obniżenia na lodowcu pokrywają się ze strefami odsłoniętego lodu, co widać także na obrazie wielospektralnym. Autor pisze dalej, że na mapach zmiany wysokości powierzchni lodowca nie uwidaczniają się charakterystyczne, łukowe ślady ogiw.

- Recenzent dostrzega jednak na ryc. 2.7 łukowate kształty bezpośrednio pod lodospadem. Czy nie jest to górna część pola z ogiwami?

Dalej czytamy, że podnoszenie się powierzchni lodowca zaobserwowano jedynie w najwyższej części strefy akumulacji oraz w niewielkiej strefie bezpośrednio powyżej lodospadu w zachodniej strefie akumulacji. Autor interpretuje to jako oznakę akumulacji śniegu w górnych częściach pola firnowego oraz jako skutek miejscowego kompresyjnego ruchu lodu bezpośrednio nad lodospadem.

- Trochę to dziwne, że Autor określa morenę powierzchniową lodowca terminem „gruz”. Wszak skład mechaniczny pokrywy supraglacjalnej nie był badany. Gruz to utwór geologiczny składający się przede wszystkim z nieobtoczonej frakcji kamienistej. Odpowiadałoby to morenie supraglacjalnej transportu pasywnego (dostawa z lawin bez obróbki wewnątrz lodowca). Natomiast w tym przypadku absolutnie nie można wykluczyć udziału bardziej rozdrobnionego i obtoczonego materiału skalnego.

- Zastanawiam się nad innym, bardziej prozaicznym wytłumaczeniem miejscowego podwyższenia się powierzchni lodowca – jak pisze Autor - bezpośrednio nad lodospadem. Otóż ryc. 2.7 pokazuje, że w tej części lodowca występują naprzemienne pasy podwyższenia i obniżania powierzchni. Czy nie jest to efekt przesuwania się seraków i szczelin w obrębie lodospadu?

Artykuł 3

Na podstawie lotniczych i satelitarnych zdjęć z lat w latach 2013-2022 (okres megasuszy) opisano zmiany albedo, pokrywy osadowej, sieci strumieni i zasięgu lodowca Universidad. Badania prowadzono w 6 obszarach: 1) końcowy fragment jezora, 2) strefę ablacji poniżej lodospadów, 3) całość zachodniego cyrku lodowcowego, 4) wycofujący się fragment zachodniego cyrku lodowcowego, 5) południowy pomniejszy cyrk lodowcowy oraz 6) całość lodowca.

Zdjęcie z satelity Landsat 8 posłużyło do opracowania wskaźnika spektralnego do wykrywania obecności materiału skalnego na powierzchni lodowca: *Glacial Rock Abundance Index* (GRAI). Przy użyciu algorytmu nadzorowanej klasyfikacji pikselowej utworzono mapę udziału lodu i gruzu w każdym z pikseli lotniczego wysokorozdzielczego zdjęcia hiperspektralnego. Wynik tej klasyfikacji zagregowano do rozdzielczości zdjęcia Landsat 8 OLI (30 m/piksel) i przyrównano do obrazu GRAI opartego o zdjęcie Landsat 8 OLI. Na tej podstawie wyznaczono empiryczny model relacji między wartością GRAI a udziałem materiału skalnego w pikselu obrazu z Landsat 8 OLI.

Pokrycie powierzchni na lodowcu kartowano korzystając ze zdjęć satelitarnych World View 2 i Pleiades. Zastosowano obiektową klasyfikację obrazów jak w *Artykule I*. Wyznaczono obszary pokryte gruzem, śniegiem, czystym lodem lodowcowym oraz lodem z wtopionymi osadami.

Zasięg lodowca oraz zasięg pokrywy śnieżnej wyznaczono poprzez wizualną analizę serii zdjęć z satelitów RapidEye-1 oraz Dove. Dzięki temu uzyskano informacje o zmieniającym się zasięgu lodowca, o zmianie w wysokości linii równowagi (ELA) oraz współczynnika strefy akumulacji (AAR).

Stworzono mapy strumieni supraglacialnych i na tej podstawie obliczono gęstość strumieni oraz ich średni rząd. W celu wykazania trendu zmian sieci drenażu wykorzystano algorytm Lokalnych Wskaźników Zależności Przestrzennej (LISA).

Zastosowane metody pozwoliły Autorowi wykazać, że w 2014 r. wysokość linii równowagi bilansowej na lodowcu wrosła w stosunku do 2013 r o 200 m i pozostała powyżej 3700 m n.p.m. do 2023 r. poza okresem 2016-2018 r, kiedy to obniżyła się do ok 3526 m n.p.m. W 2020 r. ELA przekroczyła 4000 m n.p.m. Wartość wskaźnika AAR wyniosła 0,68 w 2013 r., w 2014 r. spadła poniżej 0,50 a w 2023 r. osiągnęła jedynie 0,10. Rok wcześniej odnotowano najniższą wartość, bo zaledwie 0,04. Wykazano statystycznie istotną korelację na poziomie 0,6 pomiędzy AAR, a wartością wskaźnika oceanicznego El Niño dla zimy roku poprzedzającego.

W analizowanym okresie pokrywa osadowa na powierzchni lodowca rozszerzyła się. Największy udział pokrywy osadowej odnotowano w najniższej części lodowca oraz bezpośrednio poniżej lodospadów. W zachodniej strefie akumulacji wzrost udziału skał zaobserwowano jedynie w wąskim fragmencie na krawędziach tego obszaru.

- Dalsza część tekstu dotycząca pokrywy osadowej jest dla mnie niejasna, np. jak rozumieć zdanie: *„Albedo powierzchni lodowca oraz albedo powierzchni w obrębie obszaru zainteresowania były do siebie podobne we wszystkich OZ”* skoro rozszerzała się pokrywa osadowa?
- Kilka zdań jest napisanych w sposób chaotyczny, ze byt daleko posuniętymi skrótami myślowymi, Np. zdanie *„Trend przykryty został dużą liczbą pikseli z zerowym lub bliskim zera udziałem skał w pikselach”*. Jak należy rozumieć zdanie: *„Końcowy fragment jezora miał niskie albedo, z niewielką różnicą między OZ a powierzchnią lodowca”*. Jak mam rozumieć różnicę między OZ (czyli obszarem zainteresowania) a powierzchnią lodowca?

W skali konturu całego lodowca wykryto wysoką pozytywną korelację między rocznymi i skumulowanymi

sumami stopniodni a miarami udziału skał w pikselach, natomiast ujemną korelację ze średnim albedo powierzchni lodowca i sumą opadów.

- Dla recenzenta nie jest jasne, czy chodzi o opad śniegu, czy jakkolwiek opad atmosferyczny.

Zaobserwowano wzrost gęstości strumieni supraglacialnych w środkowej części jezora i dalej w kierunku wschodniego cyrku lodowego. Najmniejszą zmianę gęstości strumieni odnotowano na silnie uszczelinionym obszarze poniżej zachodniego lodospadu i w we wschodniej stronie dolnej części jezora. Dalej Autor pisze, że „*Miejscowe wzrosty gęstości strumieni obserwowane są na sekcjach lodu bezpośrednio sąsiadujących z morenami*” oraz, że „*zaobserwowano wzrost średniego rzędu strumieni w obszarach odsłoniętego lodu i spadek na morenach*”.

- Nie jest dla mnie jasne, czy chodzi tu o pasy moren środkowych, czy o wały moren bocznych, czy może moren czołowych. Szkoda, że nazwy moren pojawiają się dopiero w roz. 3, czyli w podsumowaniu.
- W rozdziale poświęconym trzeciemu artykułowi (2.3) pojawia się rycina 2.13 na którą Autor niestety nie powołuje się w tekście. Przedstawia ona facje lodowcowe i pokrywę osadową. Jedną z wydzielonych facji jest „*lód błękitny*”. Co to za facja? Powinno to być wyjaśnione.

W dalszej części Autor stwierdza, że zaproponowany w artykule wskaźnik spektralny GRAI umożliwia wykrywanie pokrywy osadowej na powierzchni lodowca, jak i na „*powierzchni skalnych odsłanianych przez regresję*”, ale nie umożliwia rozróżnienie między nimi.

- Rozumiem, że pod pojęciem „*powierzchnia skalna*” kryje się lita skała. Czy nie należy tego rozszerzyć na strefę luźnych osadów glacialnych i fluwioglacialnych deponowanych przed czołem lodowca oraz wzdłuż jego bocznych krawędzi?

Jak pisze Autor, wskaźnik spektralny GRAI lepiej niż albedo pozwala odróżnić ciemną powierzchnię odsłoniętego lodu z wtopionymi weń osadami od faktycznej obecności osadów i gruzu. Ciemna spektralnie powierzchnia lodu z wtopionymi osadami odbija ograniczoną część światła słonecznego, ale odróżnia się od powierzchni skalnej na obrazie GRAI.

- Trochę to jest niejasne. Sądzę, że Autor ma tu na myśli morenę supraglacialną a nie powierzchnię litych skał podłoża.

Spadek gęstości sieci drenażu i średniego rzędu strumieni na morenach Autor tłumaczy: suszą (zmniejszoną dostępnością wody opadowej) oraz wzrostem wysokości względnej moren. Osuszaniu się moren towarzyszył wzrost gęstości drenażu na odkrytym lodzie.

Dwa małe cyrki lodowe na zachód od głównego jezora w 2013 r. były z nim jeszcze połączone, natomiast na obrazach z 2023 r są już rozłączone. Rok 2021 był ostatnim, w którym zaobserwowano w nich pokrywę śnieżną pod koniec sezonu ablacji. Można z tego wnioskować, że małe lodowce są bardziej wrażliwe na bodźce klimatyczne niż lodowce o większych rozmiarach.

Reasumując: ciemnienie powierzchni głównych cyrków lodowych spowodowane było zanikiem pokrywy śnieżnej oraz firnu. W strefie poniżej lodospadów za spadek albedo powierzchni lodowca odpowiadała akumulacja gruzu. Tam, oraz wokół małych cyrków lodowych, zachodziła najszybsza regresja krawędzi lodowca.

Uwagi do **rozdziału 3** (*Realizacja celów i podsumowanie wniosków*)

W podrozdziale 3.1. (*Realizacja celu głównego i celów szczegółowych*) Autor próbuje spojrzeć na wyniki swoich badań całościowo i przeprowadza dyskusję (np. na temat dwustronnej roli wód supraglacialnych w kształtowaniu albedo lodowca). Jest to ciekawy rozdział, najbardziej przyrodniczy, pozbawiony już wątków metodologicznych.

- Brakuje mi tu jednak szerszego odniesienia się do literatury. Autor sporadycznie konfrontuje wyniki swoich badań z wynikami przeprowadzonymi przez innych glaciologów w górach wysokich.

Dalej czytam: „Wzrost temperatury powietrza oraz spadek sum opadów to czynniki kształtujące zmiany obserwowane na powierzchni lodowca Universidad. Czynniki te powodują zwiększenie intensywności topnienia lodu, uruchomienie osadów na otaczających lodowiec stokach i redukcję pokrywy śnieżnej utrzymującej się do końca sezonu ablacji.”

- Moje pytanie brzmi: czy wiadomo jak wygląda dynamika paraglacialnych procesów stokowych w badanej dolinie? Czy są jakiegokolwiek badania w tym temacie? Jak wygląda spawa degradacji wieloletniej zmarzliny? Autor pod koniec roz. 3.1 wspomina o andyjskich lodowcach gruzowych... Lawiny, osuwiska, spływy błotne, mogą dostarczać materiał stokowy na powierzchnię lodowca i stanowić istotny element systemu glacialnego.
- Szkoda, że Autor nie zaznaczył na mapie miejsc potencjalnej dostawy materiału stokowego na powierzchnię lodowca (większe żleby, usypiska, etc.).
- Nie bardzo mogę zgodzić się ze stwierdzeniem Autora, że „Całościowy obraz ewolucji lodowca Universidad w warunkach ekstremalnej suszy pokazuje dywergencję trendów na różnych fragmentach lodowca... W obrębie lodowca Universidad wyróżnić można trzy środowiska o odmiennych wzorcach reakcji na zmiany klimatu: strefę ablacji, strefy akumulacji w głównych cyrkach lodowych oraz pomniejsze cyrki lodowe. Wszak we wszystkich tych środowiskach zmniejsza się objętość lodu lodowcowego lub śniegu oraz wzrasta powierzchnia, na której zalegają osady. Czy zatem określenie „dywergencja trendów” jest uprawnione?
- Autor napomyka, że NMT pozwoliły na wykrycie studni w lodowcu. Szkoda, że ich rozmieszczenie nie zostało poddane analizie przestrzennej, nie wykazano ewentualnej zmienności ich występowania w czasie.

Podrozdział 3.2 (*Realizacja celów pobocznych*) podzielony jest na dalsze dwa podrozdziały. Tytuł pierwszego z nich (3.2.1) brzmi *Cele metodyczne*. Znajdujemy tu rozważania na temat zalet i wad zastosowanych metod.

- Niekiedy zdania zawierają zbyt daleko posunięte uproszczenia, błędy językowe, np. „Na terenie obejmującym lodowiec Universidad w procesie tworzenia TanDEM-X DEM wykorzystana została niewielka liczba NMT cząstkowych wykonanych zimą.” Po pierwsze NMT zostały wykorzystane w pracy kameralnej a nie na terenie lodowca. Po drugie, nie jest istotne w jakiej porze roku stworzono NMT lecz w jakiej porze roku wykonano obrazowanie satelitarne.

Autor podkreśla, że TanDEM-X DEM ma wyższą precyzję i dokładność od starszych NMT ASTER i SRTM zatem lepiej nadaje się do badań zmian powierzchni Ziemi.

W dalszej kolejności znajdujemy rozważania nad przydatnością klasyfikacji obiektowej opartej na uczeniu maszynowym algorytmu Losowych Lasów Decyzyjnych. W przypadku jeziora San Quintín problematyczne okazało się spektralne podobieństwo wody z zawiesiną osadów z powierzchnią gór lodowych. Zastosowana metoda pozwoliła oszacować liczbę gór lodowych i umożliwiła pomiar ich powierzchni na poziomie lustra wody. Na obszarach, w których góry lodowe stykały się ze sobą przydatna okazała się metoda segmentacji wododziałowej.

Segmentacja zdjęcia wysokorozdzielczego oraz algorytm Losowych Lasów Decyzyjnych umożliwiły także wyznaczenie zasięgu pokrywy śnieżnofirnowej na lodowcu Universidad oraz odróżnienie powierzchni pokrytej gruzem od powierzchni odsłoniętego lodu z wtopionymi osadami.

Zaproponowany wskaźnik GRAI umożliwił ilościową ocenę obecności materiału skalnego na powierzchni lodowca i jej zmienność w czasie. Autor podkreśla zaletę tego wskaźnika polegającą na dużej wrażliwości na różnicę między powierzchnią skalną, a odsłoniętym lodem.

W podrozdziale 3.2.2 (*Poboczne cele glaciologiczne*) Autor rozważa statystyczny rozkład gór lodowych w jeziorze San Quintín oraz wskazuje na podobieństwa i różnice między zamkniętym jeziorem proglacjalnym a zatoką morską. W dalszej części Autor odnosi się do matematycznego związku jaki został zaproponowany do określenia zależności pomiędzy polem powierzchni góry lodowej na wysokości lustra wody a jej objętością.

W konkluzji czytamy, że badanie jezioro jest niestabilne z powodu szybkiej regresji lodowca San Quintín. Spodziewany jest zwiększony dopływ gór lodowych do jeziora wskutek dalszej dezintegracji lodowca, a postępujący wzrost temperatury przyczyni do szybkiego topnienia gór lodowych. Zdaniem Autora wzmocni to ich log-normalny rozkład statystyczny, co oznacza mniejszy udział najmniejszych gór lodowych w populacji w porównaniu z prawem potęgowym uznawanym za typowy rozkład wielkości gór lodowych w środowisku morskim.

Wniosek końcowy

Reasumując, praca przedstawia ciekawe podejście metodologiczne i jest wartościowym opracowaniem współczesnych procesów glacialnych na trudno dostępnym andyjskim lodowcu Universidad i w proglacjalnym jez. San Quintín. Prezentuje ona ogólną wiedzę teoretyczną, umiejętność stosowania metod teledetekcyjnych i geostatystycznych, umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej oraz formułowania poprawnych wniosków. Moje krytyczne uwagi merytoryczne nie są zasadnicze, a pozostałe dotyczą głównie kwestii językowych i nie umniejszają ogólnej dobrej oceny recenzowanej pracy. Uważam, że rozprawa doktorska mgr. Julian Podgórskiego pt. „*Badanie procesów zachodzących na powierzchni lodowca andyjskiego w dobie intensyfikacji zmian klimatu w oparciu o metody teledetekcyjne*” spełnia warunki określone w ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz. U. 2018, poz. 1668 z późniejszymi zmianami). Na tej podstawie wnioskuję o dopuszczenie mgr. Juliana Podgórskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.