



## Bakalářská práce

# Negativní důsledky změny klimatu na hydrologické poměry v regionu Cuzco (Peru)

*Studijní program:*

B0114A300070 Zeměpis se zaměřením na vzdělávání

*Studijní obory:*

Zeměpis se zaměřením na vzdělávání  
Dějepis se zaměřením na vzdělávání

*Autor práce:*

**Filip Šnajdr**

*Vedoucí práce:*

RNDr. Jan Kocum, Ph.D.  
Katedra geografie

Liberec 2023



## Zadání bakalářské práce

# Negativní důsledky změny klimatu na hydrologické poměry v regionu Cuzco (Peru)

<i>Jméno a příjmení:</i>	<b>Filip Šnajdr</b>
<i>Osobní číslo:</i>	P20000072
<i>Studijní program:</i>	B0114A300070 Zeměpis se zaměřením na vzdělávání
<i>Specializace:</i>	Zeměpis se zaměřením na vzdělávání Dějepis se zaměřením na vzdělávání
<i>Zadávající katedra:</i>	Katedra geografie
<i>Akademický rok:</i>	2023/2024

## Zásady pro vypracování:

### Cíle:

1. Literární rešerše týkající se problematiky změny klimatu a vodního deficitu v území. Rešerše dostupných zdrojů informací o důsledcích klimatických změn na centrální část Peru vč. regionu Cuzco.
2. Vymezení a fyzicko-geografická charakteristika zájmové oblasti v provincii Cuzco vč. povodí jezera Piuray se zaměřením na místní hydrologické poměry a historické, stávající a budoucí využití území.
3. Analýza klimatických poměrů a hydrologického režimu v povodí jezera Piuray na základě dostupných časových řad.

### Metody:

1. Podrobná literární rešerše studované problematiky z dostupných českých a zahraničních zdrojů.
2. Analýza dostupných mapových podkladů a vrstev GIS.
3. Statistická analýza dostupných hydrologických a klimatických časových řad a dat z vlastního monitoringu (hydrologická a klimatická stanice).

*Rozsah grafických prací:*

*Rozsah pracovní zprávy:*

*Forma zpracování práce:*

tištěná/elektronická

*Jazyk práce:*

čeština

### **Seznam odborné literatury:**

Veettil, B.K., Wang, S., Simões, J.C., Ruiz Pereira, S.F. and de Souza, S.F., 2018. Regional climate forcing and topographic influence on glacier shrinkage: eastern cordilleras of Peru. *Int. J. Climatol*, 38: 979-995. <https://doi.org/10.1002/joc.5226>

Drenkhan, F., Guardamino, L., Huggel, C., Frey, H., 2018. Current and future glacier and lake assessment in the deglaciating Vilcanota-Urubamba basin, Peruvian Andes. *Global and Planetary Change*, Volume 169, Pages 105-118, ISSN 0921-8181. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2018.07.005>.

Perry, L.B., Seimon, A. and Kelly, G.M., 2014. Precipitation delivery in the tropical high Andes of southern Peru: new findings and paleoclimatic implications. *Int. J. Climatol*, 34: 197-215. <https://doi.org/10.1002/joc.3679>

Salzmann, N., Huggel, C., Rohrer, M., Silverio, W., Mark, B. G., Burns, P., and Portocarrero, C., 2013. Glacier changes and climate trends derived from multiple sources in the data scarce Cordillera Vilcanota region, southern Peruvian Andes, *The Cryosphere*, 7, 103-118, <https://doi.org/10.5194/tc-7-103-2013>

Lindner, M., Maroschek, M., Netherer, S., Kremer, A., Barbatj, A., Garcia-Gonzalo, J. et al., 2010. Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *Forest Ecology and Management*, 259, 698-709.

Hanel, M., Vizina, A., Máca, P., & Pavlásek, J., 2012. A multi-model assessment of climate change impact on hydrological regime in the Czech Republic. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 603, 152-161.

Cílek, V., et. al., 2017. *Voda a krajina: kniha o životě s vodou a návratu k přirozené krajině*. 1. vyd., Praha: Dokořán. ISBN 978-80-7363-837-5

*Vedoucí práce:*

RNDr. Jan Kocum, Ph.D.

Katedra geografie

*Datum zadání práce:*

27. září 2023

*Předpokládaný termín odevzdání:* 24. dubna 2024

L.S.

prof. RNDr. Jan Pícek, CSc.  
děkan

doc. RNDr. Kamil Zágoršek, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Liberci dne 5. října 2023

## Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.



## **Anotace**

Cílem bakalářské práce je analyzovat průběh environmentálních změn v důsledku klimatické změny v regionu Cuzco. K tomu budou využity již publikované studie v zájmové oblasti a interpretace vlastních unikátních datových řad. Výsledkem je pak jejich kritické zhodnocení a predikce trendů, jež může být využita k tvorbě adaptačních plánů.

Klíčová slova: Klimatická změna, Cuzco, Peru, Andy

## **Annotation**

This bachelor's thesis aims to analyze the development of environmental changes caused by climate change in the Cusco region in Peru. For that, already-published studies will be used along with the interpretation of new unique data sets. The result will then be its critical evaluation and prediction of possible trends, that could be used in adaptation plans.

Keywords: Climate change, Cusco, Peru, Andes

# Obsah

Seznam obrázků.....	7
Seznam tabulek.....	7
1 Úvod.....	8
2 Změna klimatu v regionu Peruánských And.....	10
2.1 Rizika změny klimatu.....	10
2.2 Hydrologický význam podzemních vod.....	12
2.3 Role ledovců v hydrologii území.....	13
2.3.1 Ledovce v oblasti Cordillera Vilcanota.....	15
2.3.2 Ledovce v oblasti Cordillera Urubamba a Cordillera Vilcabamba.....	16
2.3.3 Význam ledovců v zájmovém regionu.....	17
3 Vymezení a význam regionu Cuzco.....	18
3.1 Demografické parametry.....	19
3.2 Projekt mezinárodního letiště Chinchero.....	21
4 Hydrometeorologické poměry zájmového regionu.....	24
4.1 Meteorologické podmínky.....	26
4.2 Hydrologické poměry.....	28
4.3 Nejistota v hydrometeorologii.....	30
5 Závěr.....	32
6 Seznam použitých zdrojů.....	34
6.1 Odborné články.....	34
6.2 Knihy.....	35
6.3 Kvalifikační práce.....	36
6.4 Internetové zdroje.....	36

## Seznam obrázků

Obrázek 1: Obecný přehled pánve Vilcanota–Urubamba–Vilcabamba (Drenkhan et al., 2018, s. 107) .....	14
Obrázek 2: Hustota obyvatel podle sčítání lidu v roce 2017 (INEI, 2017).....	19
Obrázek 3: Poloha připravovaného letiště vůči městu Cuzco (zdroj: OpenStreetMap®).....	22
Obrázek 4: Relativní poloha jezera Piuray k metropolitní oblasti Cuzca (zdroj: OpenStreetMap®)	24
Obrázek 5: Ukázka měření srážek včetně kumulativního zápisu dat ke 22. 11. 2023 (FIEDLER AMS s.r.o.).....	25
Obrázek 6: Ukázka měření vlhkosti vzduchu ke 22. 11. 2023 (FIEDLER AMS s.r.o.).....	26
Obrázek 7: Ukázka měření anemometrem (FIEDLER AMS s.r.o.).....	26
Obrázek 8: Klimagram Meteo Piuray 2021/2022 (zdroj dat: FIEDLER AMS s.r.o., vlastní zpracování).....	27
Obrázek 9: Klimagram Meteo Piuray 2022/2023 (zdroj dat: FIEDLER AMS s.r.o., vlastní zpracování).....	27
Obrázek 10: Vývoj výšky hladiny v letech 2021–2023 (zdroj dat: FIEDLER AMS s.r.o., vlastní zpracování).....	28
Obrázek 11: Průměrné denní teploty v oblasti Piuray 2021–2023 (zdroj dat: FIEDLER AMS s.r.o., vlastní zpracování).....	29

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Vývoj objemu ledovců v pohoří Cordillera Vilcanota (Salzmann et al., 2013, s. 104)....	15
---	----

# 1 Úvod

Obor fyzické geografie se, možná trochu nenápadně, dostal v posledních dekáдах do popředí veřejného mínění v rámci moderní západní společnosti, a to proto, že zkoumá mnohdy negativní vývoj krajinné sféry a s tím související důsledky pro život obyvatel. Dotýká se tak ekologie, jež je předmětem zájmu, diskuzí i politických kampaní právě tohoto století. Jak již z názvu vyplývá, konkrétním námětem je zde fenomén klimatická změna, přesněji řečeno její dynamický vývoj a spojování s lidskou činností. Do přirozeného vývoje atmosféry zasahují totiž stále častěji a s větší intenzitou antropogenní faktory.

Negativní dopady tohoto jevu na životní prostředí jsou záležitostí globální a budou se i nadále týkat životů všech lidí na Zemi. Protože se však důsledky ve světě odrážejí nerovnoměrně, jsou některé oblasti již v dnešní době postiženy mnohem výrazněji než jiné. Byť se mohou zdát jednotky stupňů Celsia v rámci i stovek let zanedbatelná, představují obrovské změny právě v případě zaledněných oblastí. Jako příklad je v této práci použita právě hustě zalidněná horská lokalita v Peru, jež se musí pro zdroj pitné vody spoléhat právě na ledovce.

Zajímavost tématu tkví i ve skutečnosti, že dochází k propojení s humánněgeografickou disciplínou, nejen kvůli zmíněné lidské aktivitě jakožto spolučiniteli globálního oteplování, ale také kvůli demografické složce oboru. Jedná se totiž o oblast, kde vedle obav o zásobování pitnou vodou rovněž poměrně rychle roste počet obyvatel a infrastruktury z důvodu turistické atraktivity oblasti. Kontroverzní otázkou zůstává výstavba nového mezinárodního letiště nedaleko Cuzca a především nedaleko jednoho z jeho hlavních zdrojů vody, jezera Piuray.

Protože byly v rámci projektu, na kterém se podílí Univerzita Karlova v Praze i Technická univerzita v Liberci, instalovány v tomto regionu stanice pro měření hydrologických a meteorologických dat, je umožněn prostřednictvím této práce přístup k unikátním datům pro zkoumání projevu změny klimatu v takto exponovaném území.

Jedním z cílů této práce je mimo jiné analýza datových výstupů z automatických měřicích stanic. Vzhledem k povaze celé vědní disciplíny, jež je fyzická geografie, je však nutno užít data z dlouhodobějšího hlediska. Pro cíle této práce bude tohoto úkolu dosaženo převážně s využitím již publikovaných článků, mapujících ústup ledovců, kvantitativní a kvalitativní změny zásob pitné vody a jejich možné dopady na životní podmínky zdejšího obyvatelstva. V případě zdrojů pro 3 oblasti jihoamerických států jde o zdroje výhradně v anglickém či španělském jazyce. Ty proto tvoří drtivou většinu podkladů této bakalářské práce.

Kombinací těchto dvou postupů bude snad možné dojít k co nejpřesnějším interpretacím vývoje situace, predikci budoucích scénářů a případně k adaptačním opatřením na problémy související s novými podmínkami zásobování vodou. Práce je rozdělena na obecnou charakteristiku a vývoj regionu, představení problému nového letiště, dosavadního poznání hydrologických podmínek na základě již provedených vědeckých prací, nejistotu v hydrometeorologickém měření a nakonec na prvotní analýzu námi získaných dat.

Hlavním cílem práce je tedy komplexní pohled na problematiku deglaciace v podmínkách střední části Peru v souvislosti s postupující klimatickou změnou. Tento přístup je konfrontován s vlastními daty získanými z automatické klimatické a hydrologické stanice, které byly na konci roku 2021 umístěny v jedné z nejvíce zranitelných oblastí, a to i v kontextu s aktuální výstavbou nového mezinárodního letiště nedaleko hlavního zdroje pitné vody pro obrovskou aglomeraci obyvatel. Region Cuzco disponuje významnou turistickou atraktivitou, prožívá intenzivní environmentální změny a představuje tak optimální oblast pro studium dopadů změny klimatu.

Tato práce je prací na pomezí fyzické a humánní geografie, protože její výsledky mohou přispět k reálnějšímu pohledu na možné alternativy opatření, která by měla pomoci k eliminaci budoucích nevyhnutelných důsledků spojených se změnou klimatu, jež prožíváme v posledních dekadách.

## 2 Změna klimatu v regionu Peruánských And

Obydlené části Peruánských And jsou obecně spíše aridním prostředím. Hory tvoří na své západní straně srážkový stín, protože vysoké masívy způsobují velké množství orografických srážek na východní straně. To jsou situace, kdy se stoupající vzduch stihne ochladit do té míry, že relativní vlhkost přesáhne 100 % a začne tedy pršet dříve, než se bublina vzduchu dostane za hřeben. Tyto oblasti pak budou spoléhat pouze na srážky tvořené evaporací z vodních ploch.

Klíčovou roli právě pro zmiňované vodní plochy hrají podzemní vody a ledovce, z čehož druhý případ je v tropech specifikum právě And. Vývoj ledovcových jezer bude důležitou záležitostí současných a budoucích výzkumů. Klimatická změna a z ní plynoucí ústup ledovců má na svědomí v podstatě neustálou tvorbu nových, případně zvyšování objemu těch stávajících. Výzkum z roku 2016 porovnává počet a plochu jezer v pánvi Vilcanota-Urubamba s rokem 1988: byl zjištěn nárůst z plochy 23,3 km<sup>2</sup> a počtu 460 jezer v roce 1988 na plochu 26,9 km<sup>2</sup> v 544 jezerech (Drenkhan et al., 2018, s. 110). Jde tedy během necelých třiceti let o 15,5% nárůst v případě plochy a 18,3% v ploše.

Zdroje vody jsou v Peruánských Andách ovlivňovány člověkem obecně jak v měřítku globálním, tak i z regionálního a lokálního hlediska. Globální se týká především klimatické změny a s ní související zrychlené tání ledovců, regionální a lokální pak s provozem vodních elektráren či těžebního průmyslu (Oshun et al., 2021, s. 1,2). Největší kontroverze lokálního hlediska zejména pro kvalitu pitné vody bude představovat budování nového letiště pro Cuzco, jemuž je v této práci věnovaná samostatná kapitola.

Dostatek vody nekomplikují však jen fyzickogeografické faktory, jimiž se řada i zde použitých prací zabývá. Mnoho z nich nebere tolik v úvahu demografické faktory jako především růst počtu obyvatel a jimi pak obecně zvýšenou spotřebu vody (Goyburo et al., 2023, s. 2). Důvodem pro absenci výzkumů tohoto rázu může být nedostatek dat a složitost jejich opatřování. To ovšem vyústí v tvoření nekompletních či nedostatečně přesných plánů vedení státu pro adaptaci na klimatickou změnu (Goyburo et al., 2023, s. 2). Je tedy na místě snaha prázdná místa výzkumů vyplňovat.

### 2.1 Rizika změny klimatu

Způsob, jakým se bude i nadále projevovat změna klimatu na hydrologických podmínkách a koneckonců samotném počasí, je v zásadě založen na celkem jednoduché fyzice. Vzduch

v atmosféře má schopnost udržet určité množství vody, jež se dá vyjádřit absolutním číslem ( $\text{gm}^{-3}$ ), nicméně z klimatického hlediska je mnohem více směrodatná vlhkost relativní, tedy procentuální zastoupení vodní páry v dané vzduchové bublině. Tato schopnost je závislá na teplotě vzduchu, přičemž za stejné absolutní hodnoty množství vody se se zvyšující se teplotou vzduchu relativní hodnota snižuje. V případě dosažení 100 % relativní vlhkosti vzduchu dochází ke kondenzaci a tedy následně ke srážkám. Kvůli této nepřímé úměrnosti je však velice podstatný každý stupeň Celsia, hrozba globálního oteplování přichází proto zdánlivě nenápadně.

Problém je tedy ve změně teploty vzduchu, ve velmi vlhkých místech (například nad oceány) bude teplo navíc „využito“ vodním výparem, nicméně v už suchých oblastech se bude oteplováním snižovat relativní vlhkost a tedy úhrn srážek (Hall et al., 2008 s. 30). Zároveň však bude teplejší vzduch se snižováním frekvence zvyšovat potenciál intenzity srážek, jinými slovy s globálním oteplováním bude pršet méně často, ale o to silněji. Z toho pramení právě problém prohlubování dvou opačných extrémů, jednak sucha kvůli prodlužujícím se intervalům srážek a následný ničivý potenciál deště, především totiž možná eroze půdy.

V případě řešeného území v Peru se globální oteplování a následné tání ledovců projeví také na zásobování ledovcových jezer, kde budou vznikat environmentální rizika jako náhlá vyprázdnění ledovcových jezer nebo-li GLOF (Bates et al., 2008, s. 20). Řadí se mezi nejrychlejší a nejmocnější geomorfologické činitele v pohořích ztrácejících ledovou plochu, kdy propuštěným objemem a kulminační hodnotou přesahují ostatní typy povodní (Emmer et al., 2021 s. 1).

V Andách obecně je těchto jezer spousta a jsou zároveň nesmírně důležitým zdrojem pitné vody pro místy velice početné obyvatelstvo, obzvláště v dlouhém suchém období mezi červnem a listopadem. Tyto povodně způsobené náhlým vyprázdněním jsou katastrofou na jednu stranu kvůli potenciálním obětem na životech bezprostředně po vypuknutí, jde však především o dlouhodobé následky kvůli nedostatku vody v následujících letech.

Klimatickou změnou negativně ovlivněné zásobování pitnou vodou představuje o to větší riziko pro obyvatelstvo žijící v pánvích, kde se musí spolehnout právě na vodu z tání ledovců či sněhové pokrývky. O to více utrpí chudší oblasti, kde se do zásobování vodou negativně zapojí i socioekonomické faktory (Bates et al., 2008, s. 71). Oba tyto předpoklady jsou bohužel spjaty právě s regionem Cuzco.

Kromě okamžitých ztrát je třeba mít na paměti i možná rizika přenosu chorob, které se například v bohatých zemích sice projevit nemusí, nicméně regiony s chudší infrastrukturou mají tendence zvýšeného výskytu střevních onemocnění právě po povodních (Bates et al., 2008, s. 68).

Rovněž se dále více prokazuje dlouhodobě negativní dopad na mentální zdraví jedinců, kteří prožili environmentální katastrofy včetně povodní, ve formě úzkosti až depresí (Bates et al., 2008, s. 68).

## 2.2 Hydrologický význam podzemních vod

Byť jde v rámci celkového množství vody na Zemi o mizivé zastoupení, asi 0,06 %, je tato frakce kriticky důležitá, neboť i tak představuje 98 % vody, kterou mohou lidé reálně využít (Zaporozec a Miller in Schwartz a Zhang, 2003, s. 1). Z hlediska samotné kvality pitné vody jde v případě podzemních vod o zdroj zpravidla vyšší hodnoty. Jeho obnova je podmíněna vsakem povrchové vody, především úhrnem srážek a táním sněhové pokrývky, v menším měřítku také díky nadzemním vodním plochám (řeky a jezera). Dochází tak k dělení způsobů obnovy vodního stavu, jde buď o rozptýlený či zaměřený, v obou případech je zde však velká závislost na klimatu a jeho kombinaci s konkrétním zemským povrchem a geologickými podmínkami (Taylor et al., 2012, s. 322).

Stabilita obnovy, jež je v podstatě definována poměrem odtoku a následnou redistribucí vody ve zvodních, bude i nadále úzce souviset se změnou klimatu. Tvorba samotného odtoku je hned zpočátku omezena jednak intercepací (zachycení částí spadlých srážek vegetací) a následnou evaporací a transpirací (Kocum, 2012, s. 19). Intenzita a frekvence srážek spadlých přímo na povrch země a propustnost půdy pak určují schopnost infiltrace vody do půdy, tedy potenciální dosažení hladiny podzemních vod gravitační silou. Zejména v delším měřítku ovlivňuje kromě proměnlivosti povrchu tedy celý proces i proměnlivost klimatická, včetně jejích extrémů (například povodně či sucha), jako je například El Niño – Jižní oscilace (ENSO) (Taylor et al. 2012, s. 322).

Právě ve vyšších polohách globální oteplování mění prostorové a časové rozložení sněhové a ledové pokrývky, neboť více zimních srážek spadne jako déšť a dochází k dřívějšímu tání. Horské zvodnice pak kvůli tomu vykazují časové a případně hodnotové změny v hladinových maximech, nicméně následuje kumulativně delší období základního odtoku, opožděného podzemního odtoku (Taylor et al. 2012, s. 323). Klimatická změna dále přispívá například i prostřednictvím antropogenních faktorů. Protože obnova vody v povrchových zdrojích probíhá kvůli klimatické změně pomalejším či minimálně méně pravidelným tempem, je mnohem více čerpáno z těch podzemních (Bates et al., 2008, s. 36).

Právě podzemní voda je však zároveň důležitým zdrojem pro řeku Vilcanota, horní část toku řeky Urubamba, která pak společně s jezerem Laguna Piuray tvoří 90 % zásob pitné vody pro Cuzco (Goyburo et al., 2023, s. 4).



## 2.3 Role ledovců v hydrologii území

Role ledovců jakožto vodního zdroje je obzvláště relevantní v případě vnějších tropů. Klimatická změna, která v současné době výrazně podporuje jejich recesi, je zde ještě o to víc závažná v podmínkách střídajících se mezi obdobími dešťů a obdobími sucha. I malé změny v klimatu se dost nápadně odráží právě na stavu ledovců. Následný ústup ledovců potom sice krátkodobě zvýší hladinu a průtok řek zásobených tímto způsobem, nicméně se toto negativně projeví v dlouhodobém hledisku, kdy přísun ledovcové vody výrazně klesne (Bates et al., 2008, s. 30).

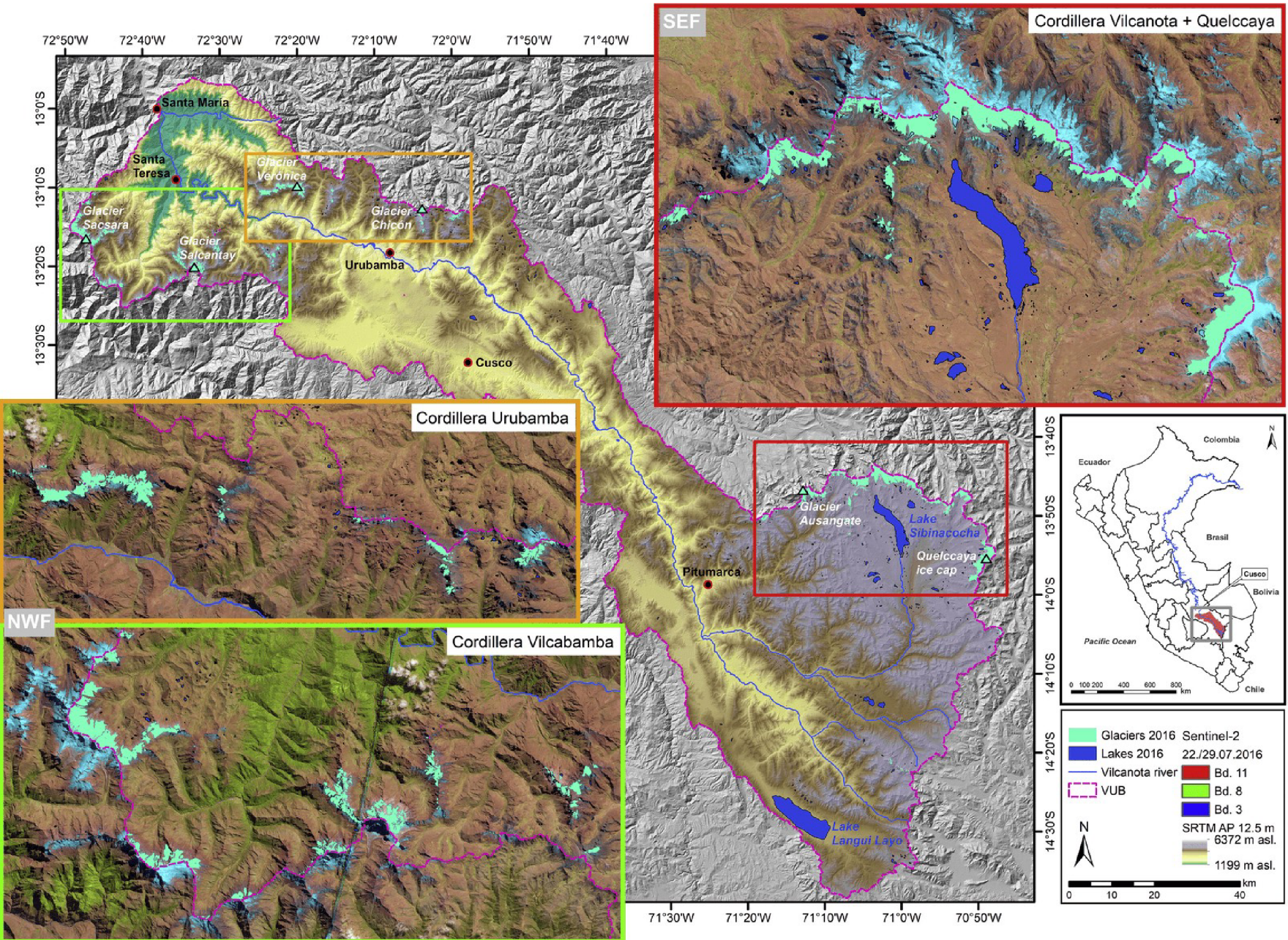
Právě suchých obdobích jsou ledovce podstatným zdrojem jednak pitné vody pro obyvatelstvo, ale kromě toho také pro funkci vodních elektráren, neboť obstarávají 54 % celé produkce energie v Peru (Drenkhan et al., 2015, s. 724). V povodí Vilcanoty se nachází obnovená hydroelektrárna Machu Picchu po jejím zničení v roce 1998 a v nižší části toku elektrárna Santa Teresa v provozu od roku 2015 (Bello et al., 2023, s. 3).

V podstatě všechny ledovce nacházející se v tropech se zároveň nachází v Andách a téměř 70 % z nich se nachází v Peru (Veettil et al., 2017, s. 979). Zde je většina ve dvou velkých ledovcových pohořích: Cordillera Blanca a Cordillera Vilcanota. Pohoří Cordillera Blanca je dlouhé asi 180 km a nachází se zhruba mezi 8°S a 10°S. Nejvyšším bodem je jižní vrchol hory Nevado Huascarán ve výšce 6 768 m n. m. (Schauwecker et al., 2014, s. 86). Tato oblast je rovněž ohrožena klimatickou změnou a čelí problému ústupu ledovců. Výzkumů je na toto téma celá řada, avšak pro problematiku této práce budou potřebné pouze pro případné srovnání.

Region Cuzco se nachází v pánvi Vilcanota–Urubamba, jejíž hranice Drenkhan et al. vtyčují od vrcholu Abra La Raya (5 443 m n. m.) zhruba 400 km do oblasti Santa María (1 180 m n. m.) kde se přítok Huamanmarca vlévá do řeky Urubamba (2018). Plocha pánve takto dosahuje 11 048 km<sup>2</sup> a nachází se v ní ve směru povodí zaledněné pohoří: Cordillera Vilcanota, Quelccaya (v podstatě samostatný ledovec), Cordillera Urubamba a Cordillera Vilcabamba (Drenkhan et al., 2018, s. 106).

Následuje stručný výčet nejvýznamnějších výzkumů, jež byly provedeny na zmíněných pohořích v pánvi Vilcanota–Urubamba. Tyto výzkumy byly vedeny převážně na bázi dálkového průzkumu Země. Pro nejpřesnější určení a měření ledovcové plochy je třeba snímky pořizovat ke konci období sucha, kdy se minimalizuje šance výskytu přechodné sněhové pokrývky a kdy jsou akumulární a ablační zóna nejvíce v rovnováze (Veettil et al., 2018, s. 982).





Obrázek 1: Obecný přehled páne Vilcanota–Urubamba–Vilcabamba (Drenkhan et al., 2018, s. 107)



### 2.3.1 Ledovce v oblasti Cordillera Vilcanota

Byť svou rozlohou zasahuje Cordillera Vilcanota až do regionu Puno, jako zdroj vody je stále nejvýznamnější právě pro východní část regionu Cuzco (Hanshaw a Bookhagen 2014, s. 360), neboť zde také pramení řeka Vilcanota Urubamba. Nejvyšším vrcholem pohoří je Nevado Ausangate (6 384 m n. m.).

Klimaticky oblast rovněž podléhá střídajícím se vlhkým a teplým (o 1–2 °C vyšší teplota) obdobím jižního léta (říjen/listopad–březen/duběn) se suchým chladným obdobím (duběn/květen–září/říjen) (Rabatel et al. in Hanshaw a Bookhagen 2014, s. 361). Většina srážek proto spadne v období teplém. K ablaci ledovců dochází přes celý rok, neboť v těchto šířkách je konzistentně znatelný přísun slunečního záření, je ale během chladného období zpomalena, protože tehdy dochází ve větším měřítku k sublimaci (Rabatel et al. a Vuille et al. in Hanshaw a Bookhagen 2014, s. 361).

Ke klimatickým podmínkám oblasti je třeba ještě připomenout meziroční jevy jako El Niño a La Niña, jejichž efekt na počasí je v této oblasti velice znatelný, El Niño – Jižní oscilace má na svědomí oteplení a snížení srážek, zatímco roky ovlivněné jevem La Niña bývají chladnější a vhlčí (Hanshaw a Bookhagen 2014, s. 361).

Vývoj pohoří Cordillera Vilcanota od poloviny 20. století dobře shrnuje Salzmann a kolektiv v článku v deníku *The Cryosphere* (2013):

*Tabulka 1: Vývoj objemu ledovců v pohoří Cordillera Vilcanota (Salzmann et al., 2013, s. 104)*

Year	Glacier area (km <sup>2</sup> )	Percent of initial area (%)	Total glacier volume (km <sup>3</sup> , $\tau = 1$ bar)	Total glacier volume (km <sup>3</sup> , $\tau = 1.2$ bar)
1962	440	100	17.0	20.4
1985	444	101		
1996	344	78		
2006 <sub>10%</sub>	297	68	10.3	12.4
2006 <sub>20%</sub>	297	68	9.2	11.0

Rozdíly mezi roky 1962 a 1985 jsou marginální a lze v jejich případě brát v úvahu výkyvy běžného rázu, neboť byly pro daná měření použité jiné metody a jinak pořízené snímky. Ještě před přelomem 20. století však lze sledovat úbytek plochy a tedy zřejmého objemu ledovců již o desítky

procent. V porovnání za podobné období je to podstatně větší rozdíl než bylo zjištěno v případě Alp v Evropě, zatímco mezi lety 1985 a 2006 je zde rozdíl v ploše ledovců kolem 30 % a odhadovaném objemu 40–45 %, v Alpách mezi lety 1975 a 2000 byly naměřeny rozdíly 22 % plochy a 30 % objemu (Salzmann et al., 2013, s. 112).

O další měření ústupu ledovců se ve stejné publikaci přičinila dvojice Hanshaw a Bookhagen (2014). S výsledky pořízenými v jiných částech pohoří a za lehce odlišné časové období se Salzmannovi tolik nevzdalují. Obecně udávají, že menší zaledněné části ztrácí led rychleji než ty větší, například v časovém období 1988–2010 z nejmenších zaledněných oblastí (menších než 10 km<sup>2</sup>) ustupoval led dvakrát vyšším tempem než z těch největších (větších než 20 km<sup>2</sup>) (Hanshaw a Bookhagen, 2014, s. 367). V této studii je zahrnut i ledovec Quelccaya, pro který dvojice zaznamenala úbytek ploch 19,4 km<sup>2</sup>, tedy 31 % za období tří dekad 1980–2010 (2014).

Není třeba složitých úvah k pochopení závažnosti situace, výsledky celkem jasně podporují ekologické paradigma pozitivní zpětné vazby, totiž že kvůli zmenšení povrchu ledu a tedy povrchu s vysokým albedem, bude o to víc ledový povrch dál mizet. Vede to k celkem pesimistickému výhledu budoucnosti, že ledovce budou z hor ustupovat stále zrychlujícím se tempem a to dokonce exponenciálně.

### **2.3.2 Ledovce v oblasti Cordillera Urubamba a Cordillera Vilcabamba**

Severozápadní blok zaledněných pohoří v pánvi Vilcanota–Urubamba spolu tvoří Cordillera Urubamba a Cordillera Vilcabamba – v tomto pořadí po pravé a levé straně řeky Urubamba (až do sídla Urubamba je řeka nazývána Vilcanota). Terénem jsou tato dvě pohoří oproti Cordillera Vilcanota a ledovci Quelccaya na jihovýchodě průměrně o 300 m nižší. Jejimi nejvyššími vrcholy jsou Sahuasiray (5 818 m n. m., Cordillera Urubamba) a Salcantay (6 271 m n. m., Cordillera Vilcabamba) (Drenkhan et al., 2018, s. 112). Svým charakterem se odlišují od pohoří Cordillera Vilcanota také výraznějšími svahy a celkově užší topografií, ledovce jsou zde potom mnohem vertikálněji orientovány a tenčí v objemu (Drenkhan et al., 2018, s. 112).

Ústup ledovců v těchto dvou pohořích zkoumal například B. K. Veettil a jeho kolektiv mezi lety 1985 a 2015, kdy zaznamenali úbytek 30 % plochy v případě Vilcabamby a až 56,7 % v pohoří Cordillera Urubamba (2018). Ve stejném roce publikoval svá měření Drenkhan a kolektiv z let 1988–2016 včetně přihlédnutí k tvorbě nových ledovcových jezer a prognóze do budoucna. Ti zjistili úbytek ledovcové plochy v pohoří Cordillera Vilcabamba o 40,4 % a v pohoří Cordillera Urubamba o 47,9 % (Drenkhan et al., 2018, s. 110).

Rozdíly ve výsledcích v úbytku plochy ledovců mezi pohořími na severozápadní a jihovýchodní straně pánve Vilcanota-Urubamba lze připisovat několika faktorům. Jednak to jsou zmíněné odlišné aspekty topografického a geomorfologického rázu ve tvaru reliéfu a tím pádem například tvaru ledovců. Dále zmíněný fakt výškového rozdílu, že mezi těmito dvěma oblastmi je průměrný rozdíl 300 m, což může v důsledku znamenat, že se globální oteplování u nižších severozápadních masivů projeví výrazněji a dříve (Drenkhan et al., 2018, s. 112). Pak je tu mimo jiné i zmíněná premisa, že menší ledovcové plochy ztrácí led o to rychleji, což se pravděpodobně projeví stejně jako u předchozího argumentu právě u pohoří Cordillera Vilcabamba a Cordillera Urubamba v následujících desetiletích ještě razantněji.

### 2.3.3 Význam ledovců v zájmovém regionu

Výsledky se dají také interpretovat průměrným meziročním úbytkem, který by se v těchto případech pohyboval mezi 1,2–1,6 % za rok, byť v lehce odlišných časových úsecích. Ačkoliv jde i tak o čísla znepokojivá, je vždy největší skok v úbytku ledovců až v tomto století. Je proto třeba si uvědomit, že oblast regionu Cuzco je právě z hlediska hydrologických poměrů a dostatku vody nesmírně zranitelná. V té souvislosti je také třeba pokračovat s výzkumy a z nich vždy vyvodit patřičné plány mitigace špatných hydrologických podmínek.

Co se týče množství výzkumů řešeného území, jak ostatně i většina použitých zdrojů už uvádí, je třeba zdůraznit, že jich je v porovnání s pohořím Cordillera Blanca podstatně méně. Bylo tomu tak už historicky, patrně z faktu, že oblast Cordillera Vilcanota je hůře přístupná. Je tomu však i dodnes, neboť je Cordillera Blanca součástí života mnohem více lidí a zároveň se zde nachází například i zřejmě „zajímavější“ fyzickogeografický faktor, vrchol Huascarán. Je také vůbec největším zaledněným pohořím v tropech.

To je problém zejména pro administrativu, neboť ministerstvo pro životní prostředí v Peru spolu se švýcarskou agenturou SDC již od roku 2009 vede pro regiony Cuzco a Apurímac program pro adaptaci na klimatickou změnu PACC – Pacific Adaptation to Climate Change. Program integruje vodní hospodářství, prevenci environmentálních katastrof a bezpečnost ohledně výživy (Andres, 2014, s. 2044). Pro správné plánování je proto potřeba pomocí výzkumů kvantifikovat současné hydrologické podmínky a analyzovat možné důsledky klimatické změny, avšak těch je pro danou oblast stále nedostatečné množství (Andres, 2014, s. 2044).

### 3 Vymezení a význam regionu Cuzco

Region Cuzco se nachází v jižní části Peru, v Andách. Jde o čtvrtý největší region (department) a hlavní město Cuzco bylo historicky i hlavním městem rozsáhlé Incké říše. Byť se území celého státu rozprostírá zcela v tropickém podnebném pásmu, jsou zde v rámci regionů signifikantní klimatické rozdíly. Tvar reliéfu, především elevace, z toho plynoucí srážkové stíny a hydrologické poměry, ať už vodní plochy či mořské proudy, mají za následek tvorbu řady rozdílných mezoklimat.

Celý stát se dělí na tři hlavní fyzickogeografické regiony: pobřežní část pacifiku (costa), horskou část And (sierra), jež prochází celou zemí severojižně a Amazonský les (selva) (Chevallier et al., 2011, s. 182). Cuzco je možné spolu s městem Arequipa považovat za nejdůležitější sídlo jižních Peruánských And.

Samotné město se nachází v horském údolí Huatanay, přímo pod náhorní plošinou Sacsayhuamán a kopci Picchu. Jeho urbánní část se skládá z pěti hlavních čtvrtí: Cusco, San Jeronimo, San Sebastian, Santiago a Wanchaq, periferních oblastí Poroy, Ccorca, Saylla, administrativně stále patřící departmentu a oblastmi vnější periferie Cachimayo, Pucyura a Oropesa, většina území spadá právě do údolí Huatanay (Branca a Haller, 2021, s. 2).

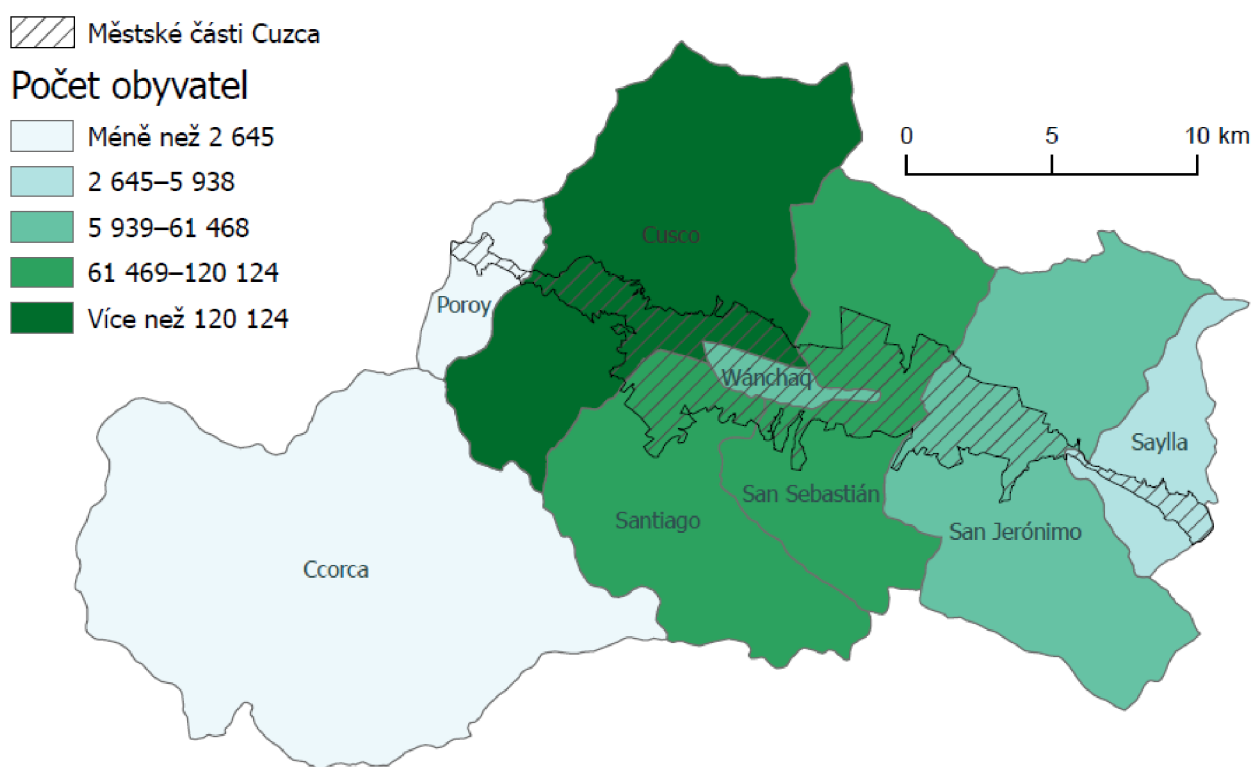
Údolí, jež bylo domovem několika osad, začala kolem roku 600 našeho letopočtu kolonizovat starověká kultura Huari. Její rozpad okolo roku 900 pak vedl k fragmentaci oblasti a mocensky se začaly prosazovat právě geomorfologicky spjaté osady v údolí dnešního města (Nowack, 2007, s. 610). Strategicky významné území se pak později stalo logicky i centrem nové nastupující velmoci Inků. Ta se etablovala v období 1200–1400 našeho letopočtu a ve čtyřicátých letech 15. století již vzniká metropolitní oblast Cuzco (Branca a Haller, 2021, s. 3).

Původní podobu města včetně historických staveb Inků a kolonistů negativně ovlivnil rychlý vzestup cestovního ruchu oblasti a s ním spojené budování dopravní infrastruktury, hotelů či restaurací, což také v mnoha případech hatí plány archeologické činnosti znehodnocováním nalezišť (Farrington, 2013, s. 87). Pokračování v této transformaci land-use bude mít zároveň negativní dopady na řešené hydrologické poměry v oblasti jak kvantitativní, tak kvalitativní. Problém zde tvoří a bude tvořit zejména výstavba nového mezinárodního letiště Chinchero, byť se zóna výstavby nachází mimo metropolitní oblast Cuzca.

### 3.1 Demografické parametry

Město je významným sídlem Peru z demografického hlediska, jelikož zde žije kolem půl milionu lidí (2017) s prognózou dalšího růstu, neboť mezi sčítáními v roce 2007 a 2017 došlo k nárůstu obyvatel o asi 110 tisíc a ve struktuře dominují lidé v produktivním věku a děti (Brinkhoff, 2020). Skokový nárůst se dá připisovat zejména migračním přílivům, neboť jde především o turistický potenciál oblasti. S tím souvisí nová výstavba domů, především v periferních čtvrtích, nejvyšší relativní nárůst obyvatel (+1 290 % oproti roku 1981) a nejrazantnější zvýšení počtu absolutního množství budov: +16 382 budov v období mezi sčítáními lidu 2007–2017 (Branca a Haller, 2021, s. 7).

#### HUSTOTA OBYVATEL ČTVRTÍ PROVINCE CUZCO V ROCE 2017



Filip ŠNAJDR, Turnov, 2023  
Zdroje: INEI, 2017; ESRI, 2016

Obrázek 2: Hustota obyvatel podle sčítání lidu v roce 2017 (INEI, 2017)

V rámci celého departmentu obyvatelstvo přesahuje 1,3 milionu a v etnickém rozložení zde na rozdíl od většiny jiných částí Peru dominuje domorodé obyvatelstvo Kečua (Quechua) – asi 77,5 % lidí a dále 19,1 % jsou mestici (Brinkhoff, 2020). Přímo ve městě Cuzco je pak poměr o něco více ve prospěch míšenců: 63,2 % Kečua a 30,1 % mesticů (Branca a Haller, 2021, s. 7).

Mimo tyto dvě hlavní skupiny jsou zde v nízkých jednotkách procent etnické menšiny bílých, Aymara a jiných.

Nejpočetnější etnickou skupinou v regionu Cuzco jsou tedy Kečuánci. Jsou to domorodí obyvatelé, kteří mluví svým vlastním jazykem kečua, byť se děti ve školách (často malotřídních), jež jsou bilingvní, učí povinně jak v jazyku kečua, tak španělsky. Na státních školách ve městě je rovněž povinná výuka katolického náboženství, na vesnicích se pak spíše prosazují evangelíci. Nicméně i přesto Kečuánci dodržují rituály jako například „vítání Matky Země“ zhruba v srpnu, kdy již může začít pršet, aby se vydařila úroda. Vyznání tudíž spíše neřeší podobně jako například svůj věk, kdy místo čísel svůj život podle vlastních tradic a vždy individuálního pocitu pouze dělí na několik fází.

Tradičně se živí zemědělstvím, dnes především v periferních oblastech regionu. Mezi typické plodiny patří brambory a celá řada jejich místních odrůd a kukuřice. Ostatní plodiny se pěstují podle individuálních lokálních podmínek, neboť je zde kvůli reliéfu řada rozdílných mikroklimat (De La Piedra, 2009, s. 114). Kromě lam v těch nejvyšších polohách a morčat, jakožto sezónních záležitostí, se jiný dobytek kvůli dlouhým obdobím sucha bez trávy nechová.

Právě během období sucha nezbývá nic jiného, než žít z uskladněné sklizně či z nakoupených potravin. Zaměstnání mohou obyvatelé periferních oblastí kromě města Cuzca hledat například v oblasti Quillabamba na plantážích kávy a kakaa (De La Piedra, 2009, s. 114) či například i v Amazonii, kde je velice aktivní těžba dřeva a zemního plynu či pěstování kávy, což zde mají v zájmu především nadnárodní korporace, které mají po dřívějších nepokojích pracovníků poměrně vysoké mzdy. Otázku negativního dopadu na životní prostředí tak Kečuánci řešit tolik nemohou.



## 3.2 Projekt mezinárodního letiště Chinchero

Rozšiřování infrastruktury pro posilování socioekonomické sféry je často dosaženo na úkor životního prostředí. Kromě okamžitých vlivů během výstavby jako jsou znečištěné ovzduší, hluk, likvidace půdy či případná kontaminace vody je třeba brát v úvahu především ty dlouhodobé. Pro hydrologické podmínky bude klíčová například likvidace zeleně.

Poněkud specifické riziko v případě dopravní infrastruktury je, že zakládá řetězový růst dalších staveb. Region Cuzco je turisticky velice zajímavý a vidíme zde i výrazný migrační přírůstek (Brinkhoff, 2020). Právě v důsledku těchto faktů bylo v roce 2017 uskutečněno rozhodnutí o stavbě nového mezinárodního letiště, nahrazujícího dosavadní velice vyutilizované Alejandro Velasco Astete International Airport (Wikipedia, 2023). Původně tak bylo zamýšleno již od roku 1978, ale kvůli politickým, ekonomickým a korupčním problémům byl projekt nesčetněkrát posunut (Connolly, 2021).

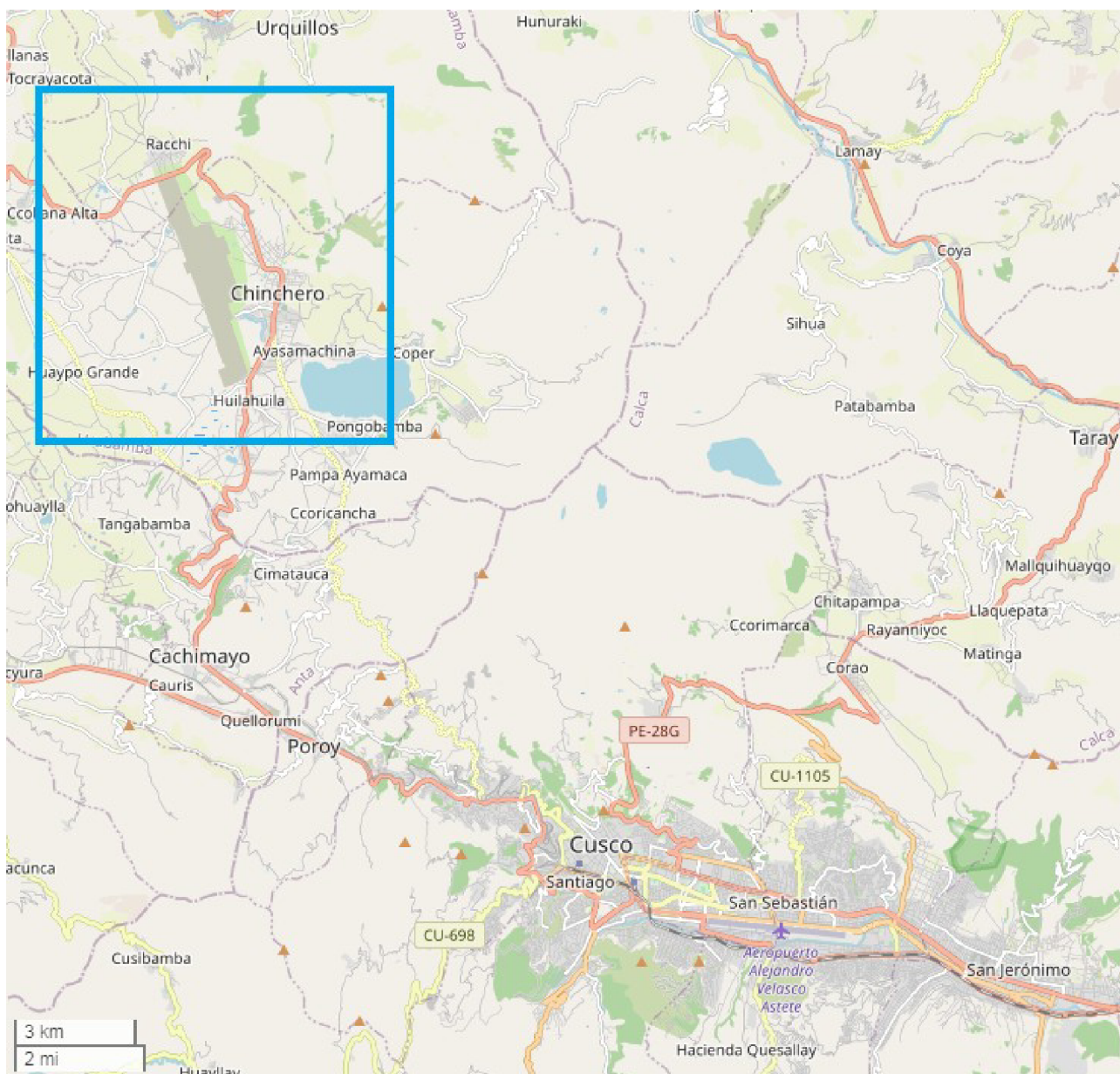
Chinchero se nachází vzdušnou čarou asi 15 kilometrů severozápadně od města Cuzco, tedy směrem původní expanze Inků z jejich hlavního města. Z toho důvodu jsou zde početná potenciální archeologická naleziště, avšak v místech, kde se již připravuje plocha pro budoucí letiště stále nebyly provedeny vykopávky (Wade, 2019, s. 568). Problém tedy svým charakterem tíží i jiné obory. Zásah do území dříve původních obyvatel rovněž vzbuzuje otázky identity krajiny (García, 2019, s. 74).

Již teď prochází oblast transformací a upouští od dřívějšího zaměření na zemědělství ve prospěch turismu (Connolly, 2021). Právě absence jiných perspektivních pracovních příležitostí mimo tyto dva sektory byla i jedním z důvodů, proč místní věří vládním slibům o novém letišti (García, 2020, s. 161). Na turismu jsou však sliby postaveny, neboť úřední činitelé udávají poměrně ambiciózní počet „6 milionů turistů ročně, kteří budou mít k památkám Inků přímější cestu“ (Wade, 2019, s. 568).

Momentálně dokáže letiště Alejandro Velasco Astete International Airport v Cuzcu zvládnout přímé mezinárodní lety pouze z Kolumbie, Bolívie a Chile, neboť je omezeno velikostí. Nově připravované letiště v Chincheru má však za cíl přijímat lety až z Evropy či Floridy (Connolly, 2021). Mezinárodní turisté se tak budou moci vyhnout přestupu v Limě.

Místní obyvatelé se na nové pracovní pozice těší, neboť právě v obdobích sucha potřebují obživu pro nákup potravin. S novým letištem bude mít kapacita v terciárním sektoru trhu práce potenciál velkého vzrůstu, v první řadě půjde mimo jiné například o převoz turistů od letiště do

města Cuzco, protože jde o vzdálenost 20–30 km a přes 300m převýšení a zatím je zde absence další infrastruktury pro turismus. Obecně lze říci, že obyvatelstvo nové letiště otevřeně vítá, navíc tamní vláda za skoupené pozemky pro stavbu zaplatila na zdejší poměry velice dobře. Projekt však pozastavila pandemie Covidu-19 a původní rok otevření 2021 byl nahrazen rokem 2025 (Connolly, 2021).



Obrázek 3: Poloha připravovaného letiště vůči městu Cuzco (zdroj: OpenStreetMap®)

Plocha navrhovaného letiště zabírá 25 km<sup>2</sup> a spadá do oblastí Chinchero a Huayllabamba, obě v provincii Urubamba, departmentu Cuzco a nachází se ve výšce 3 714–3 731 m n. m. (Soria Dall'Orso, 2020, s. 15). Pro řešenou problematiku je zde klíčové umístění mezi jezery Laguna Huaypo a především Laguna Piuray, důležitým zdrojem pitné vody pro region. Místní občanské

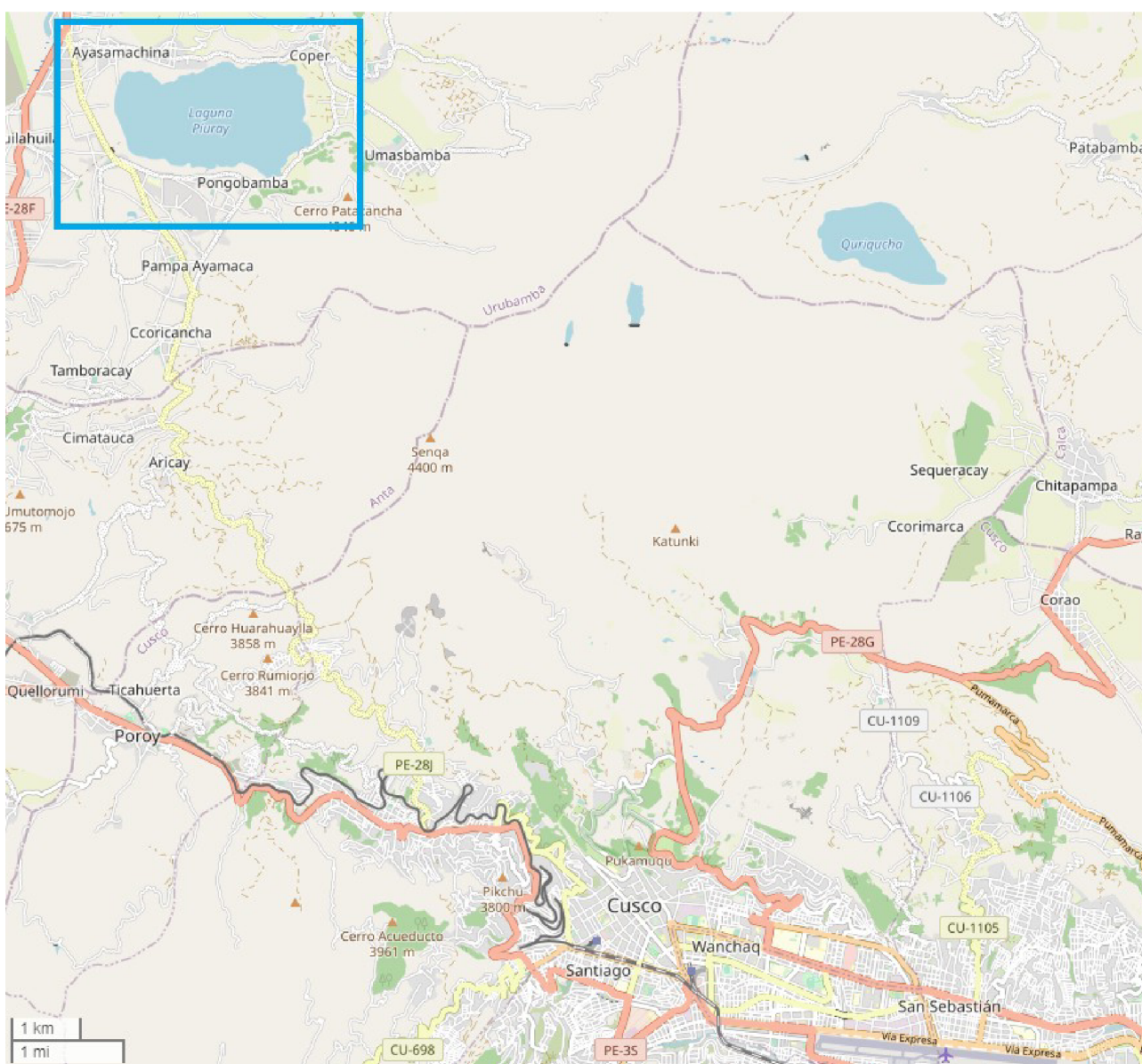
sdružení pro zachování hmotného dědictví a životního prostředí již v roce 2021 peticemi žádalo Peruánskou vládu o zastavení či přesunutí projektu, jak kvůli již dříve zmíněným archeologickým nalezištím, tak i z důvodu hrozby poškození vodních zdrojů pro celý region (Orbegozo, 2021).

Projekt bude znamenat problém již pro samotnou oblast Chinchera. I přes suchá zimní období byla doteď půda zásobena vodou z mokřadních ekosystémů, které spojují místní prameny, jezera anebo bažiny, během realizace letiště z původně 17 pramenů však všechny postupně mizí (Connolly, 2021). Z pěti druhů přírodních mokřad definovaných Ramsarskou úmluvou se mokřady v regionu Cuzco řadí do dvou hlavních systémů: jezerní a bofedaly, rašelinité mokřady, jež jsou specifickým prvkem právě And (Soria Dall'Orso, 2020, s. 16, 17).

Kromě dodatečného přísunu srážkami jsou mokřady zásobené převážně podzemními vodami a hrozba mokřadů spočívá hlavně v narušení na jejich napojení. Budování infrastruktury, jež mění reliéf oblasti, může tedy významně zasáhnout do kvality a kvantity vodních přísunů do těchto ekosystémů (Soria Dall'Orso, 2020, s. 19).

## 4 Hydrometeorologické poměry zájmového regionu

Oproti například evropskému standardu zakládání měst poblíž řek je v Peruánských Andách navíc poměrně běžná varianta užití k zásobování vodou ledovcového jezera. Tak je tomu v případě Cuzca, jež na jezero Piuray už historicky spoléhá. Nachází se asi 12 km vzdušnou čarou od města, v oblasti Chinchero. Kritické jsou proto kvantitativní, ale i kvalitativní vlastnosti této vodní plochy. V době zrychlujícího se globálního oteplování a měnících se demografických a jiných socioekonomických podmínek je třeba provádět na vodních zdrojích výzkumy důsledků těchto změn. Ty budou pak sloužit buď k mitigaci negativních vlivů zmíněných faktorů anebo minimálně k řádné adaptaci na tyto transformace.



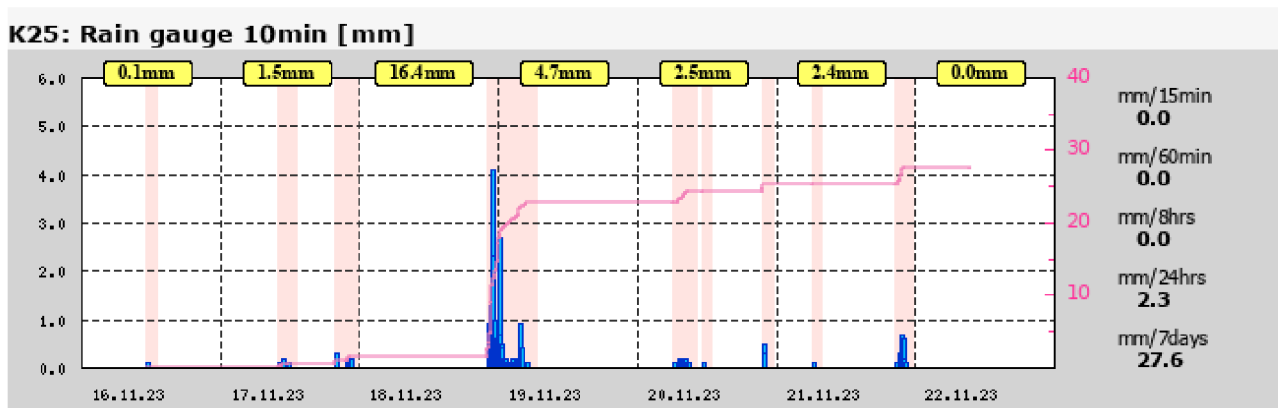
Obrázek 4: Relativní poloha jezera Piuray k metropolitní oblasti Cuzca (zdroj: OpenStreetMap®)



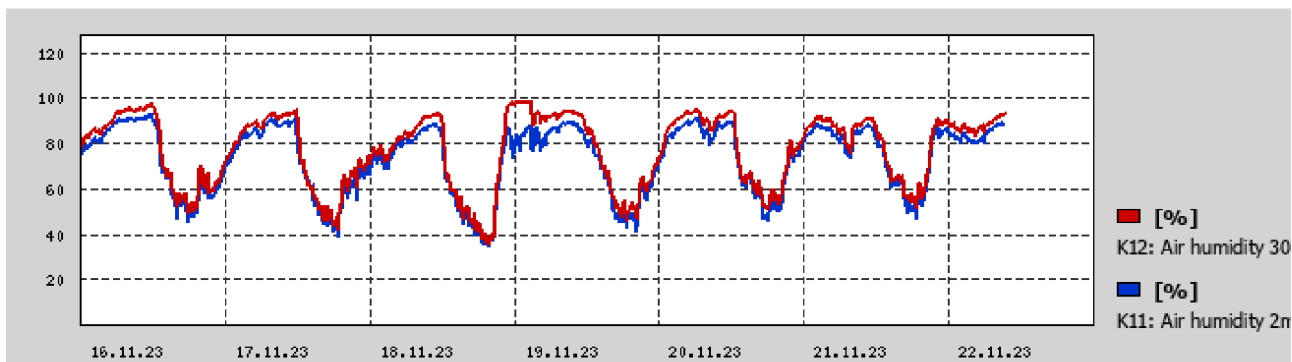
Právě pro obyvatelstvo města Cuzca a jeho západních periferií je Laguna Piuray jedním z nejdůležitějších zdrojů vody. Kromě metropolitních částí na jezero, coby zdroj vody, spoléhají komunity domorodých obyvatel oblasti Chinchero. Protože jezero Piuray zajišťuje téměř polovinu veškeré pitné vody pro samotné město, vede především organizace technických služeb SEDACUSCO snahy o zachování kvality vody (Bennett, 2018). To bude ovšem dost obtížný úkol kvůli připravovanému mezinárodnímu letišti Chinchero, jehož stavba, kromě zmíněného narušení například archeologických nalezišť, poškozují i místní ekosystém. Přímé dopady na jezero Piuray ukáže teprve čas a měření hydrologických a především hydrochemických dat.

V rámci projektu Univerzity Karlovy, který mapuje meteorologické změny v oblastech pramenů Amazonky a který vede profesor Bohumír Janský, se na podzim v roce 2021 instalovala nová klimatická stanice a dvě hydrologické stanice u jezera Piuray. Projekt se zabývá měřením dopadů klimatické změny na ústup ledovců a vodní zdroje pro obyvatelstvo. K měření užívá přístrojů a služeb českobudějovické firmy FIEDLER AMS s.r.o.

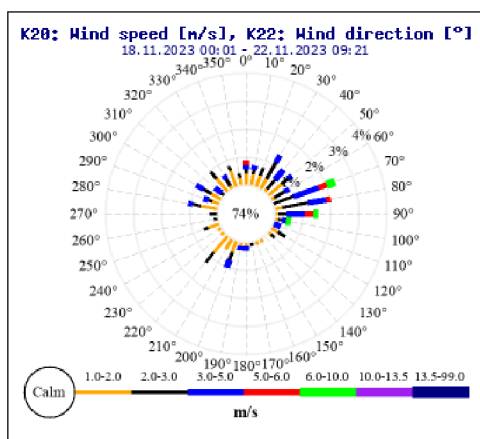
Hydrologická stanice jezera Piuray je schopna měřit hladinu ultrazvukovým čidlem a také teplotu vody. Meteo stanice potom teplotu vzduchu ve výšce 30 cm a 2 m a dále vlhkost a tlak vzduchu, směr větru, úhrn srážek a dopadající i odražené sluneční záření. V obou případech přístroje zaznamenávají data neustále v desetiminutových intervalech. Pro účely této práce budou použity výsledky měření od data 11. 11. 2021, kdy začaly obě měřicí stanice od jejich instalace zaznamenávat data konzistentně.



Obrázek 5: Ukázka měření srážek včetně kumulativního zápisu dat ke 22. 11. 2023 (FIEDLER AMS s.r.o.)



Obrázek 6: Ukázka měření vlhkosti vzduchu ke 22. 11. 2023 (FIEDLER AMS s.r.o.)

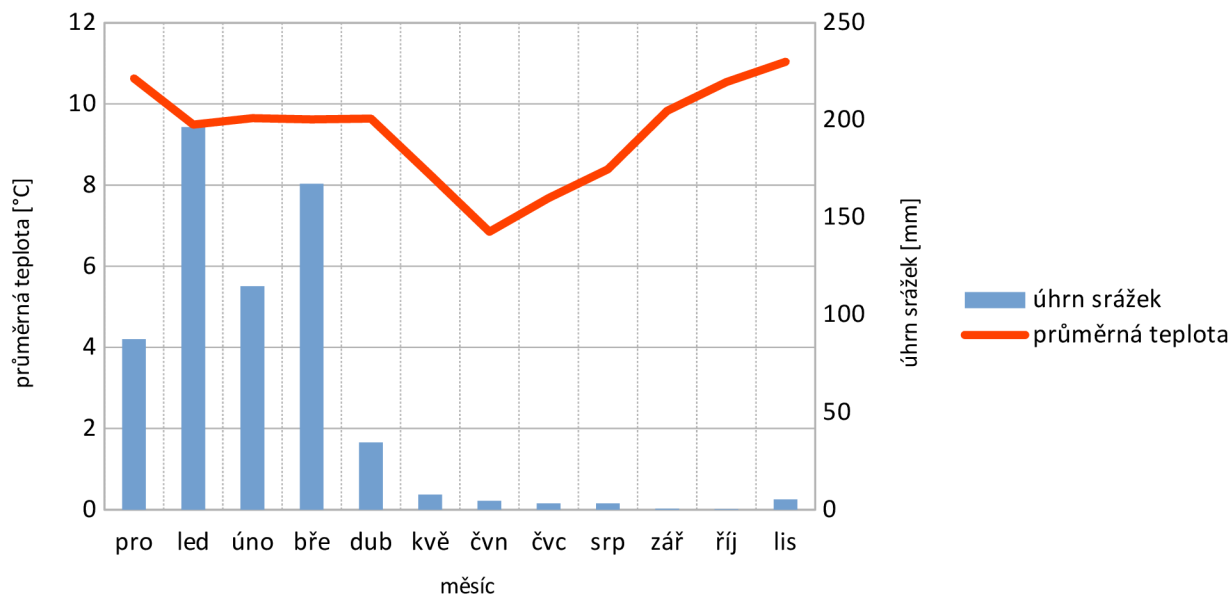


Obrázek 7: Ukázka měření anemometrem (FIEDLER AMS s.r.o.)

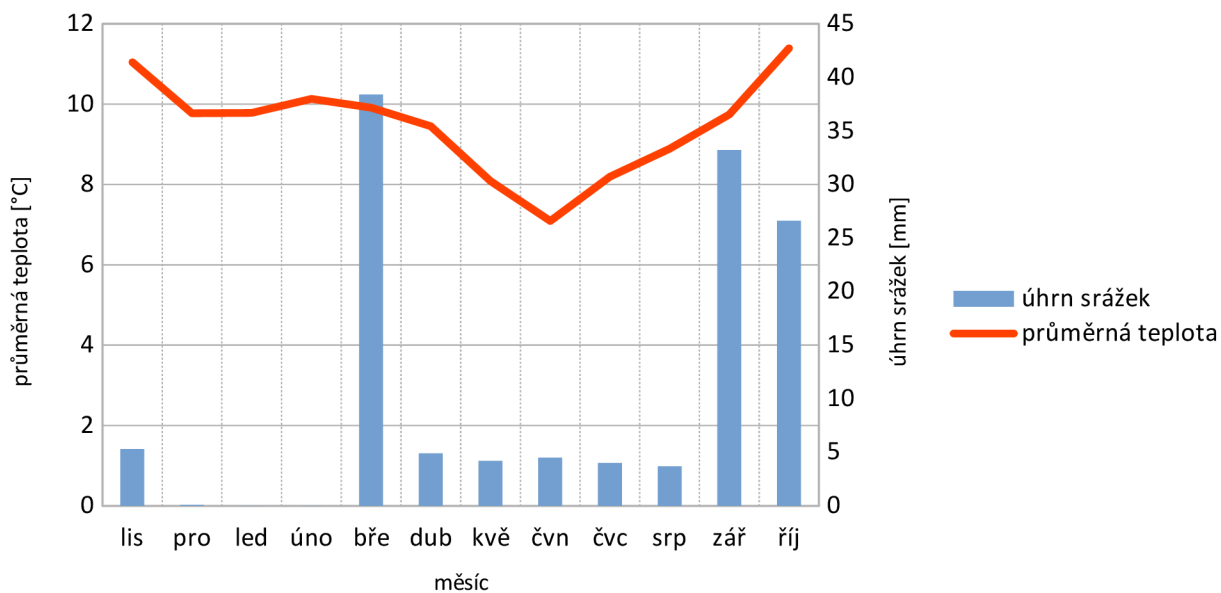
## 4.1 Meteorologické podmínky

Technické potíže se vyskytly v záznamu našich vlastních hydrometeorologických dat z relativně nově instalované meteo stanice v námi zkoumané oblasti. Všechny parametry jsou od začátku měření validní až na srážkový úhrn, kdy musel nejpravděpodobněji nastat problém s člunkovým srážkoměrem.

První klimagram níže začíná prosincem roku 2021 (první měsíc kompletních záznamů od instalace měřicí stanice), po němž následuje vyvrcholení vlhkého období, kdy v lednu dosahuje celkový úhrn srážek za měsíc téměř 200 mm. Následný úbytek precipitace v dubnu není nic neobvyklého, neboť během suchého období mohou být skutečně srážky minimální. Avšak při porovnání s následujícím „vlhkým“ obdobím je zde evidentní chyba. Hodnota úhrnu srážek v prosinci 2022 skutečně činí „0“ a v následujícím lednu je hodnota „0,1“, tedy ještě větší rozdíl oproti předchozím 197 mm. Hodnoty posledních měsíců se již zdají být opět validní.



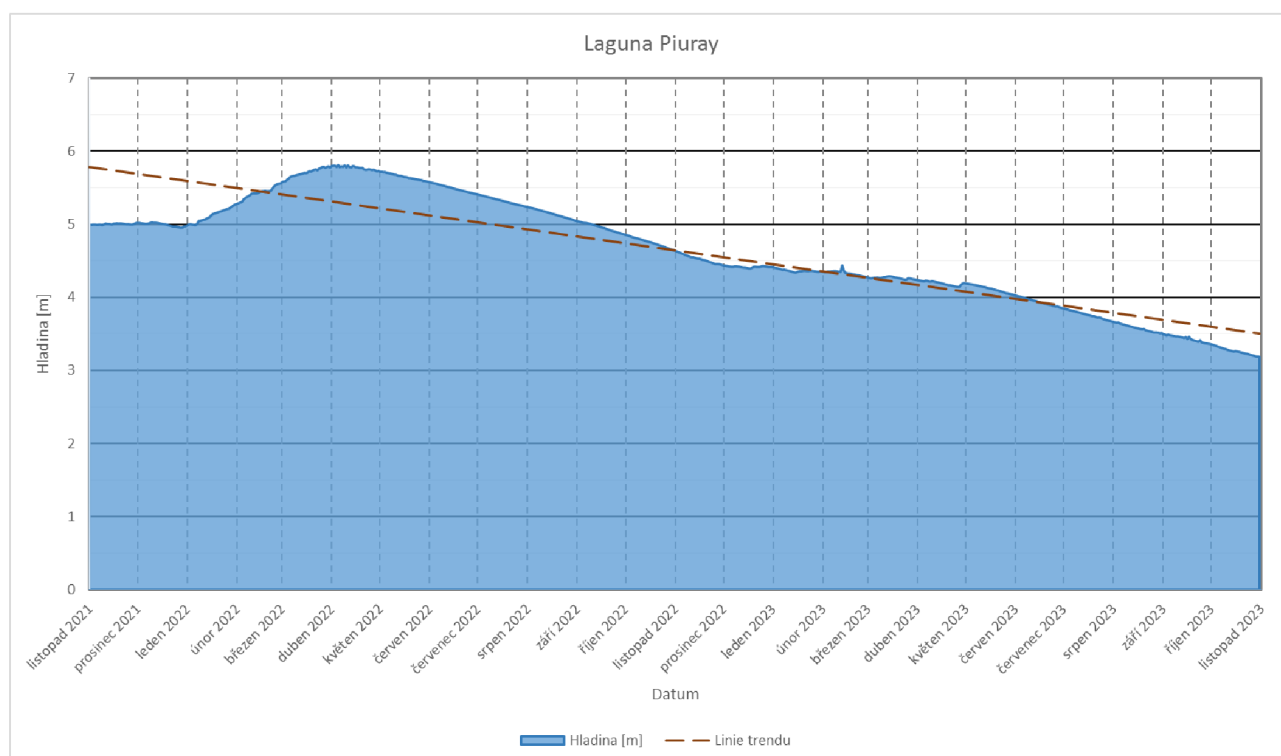
Obrázek 8: Klimagram Meteo Piuray 2021/2022 (zdroj dat: FIEDLER AMS s.r.o., vlastní zpracování)



Obrázek 9: Klimagram Meteo Piuray 2022/2023 (zdroj dat: FIEDLER AMS s.r.o., vlastní zpracování)

## 4.2 Hydrologické poměry

Hladina samotného jezera Piuray je měřena ultrazvukovým čidlem nad vodní hladinou, tudíž nejde o měření hloubky absolutní, pouze o relativní hodnoty vůči poloze čidla. Následující graf je proto třeba chápat tímto způsobem a proto je ke všem naměřeným hodnotám pro přehled uměle připočítáno 5 metrů. Byť hloubka jezera na většině míst přesahuje 20 m, je hydrostanice poměrně nedaleko od pobřeží a nad hloubkou zhruba 5–10 m, pomyslná hladina v těchto místech tedy přibližně odpovídá realitě. Graf je vytvořen na základě denních průměrů výšky hladiny za dva roky.



Obrázek 10: Vývoj výšky hladiny v letech 2021–2023 (zdroj dat: FIEDLER AMS s.r.o., vlastní zpracování)

Na zpracování lze evidentně pozorovat trend klesání hladiny, potažmo úbytek vody. I přes téměř metrové stoupanutí na konci vlhkého období roku 2022 je patrný velice výrazný pokles skoro o 2 metry celkem po dvou letech od začátku měření. Podobný nárůst hladiny jako v roce 2022 se totiž na konci letošního vlhkého období nekonal. Ale už v případě prvního měřeného roku tak při porovnání hodnot měsíce listopadu jde za první rok o značnou ztrátu.

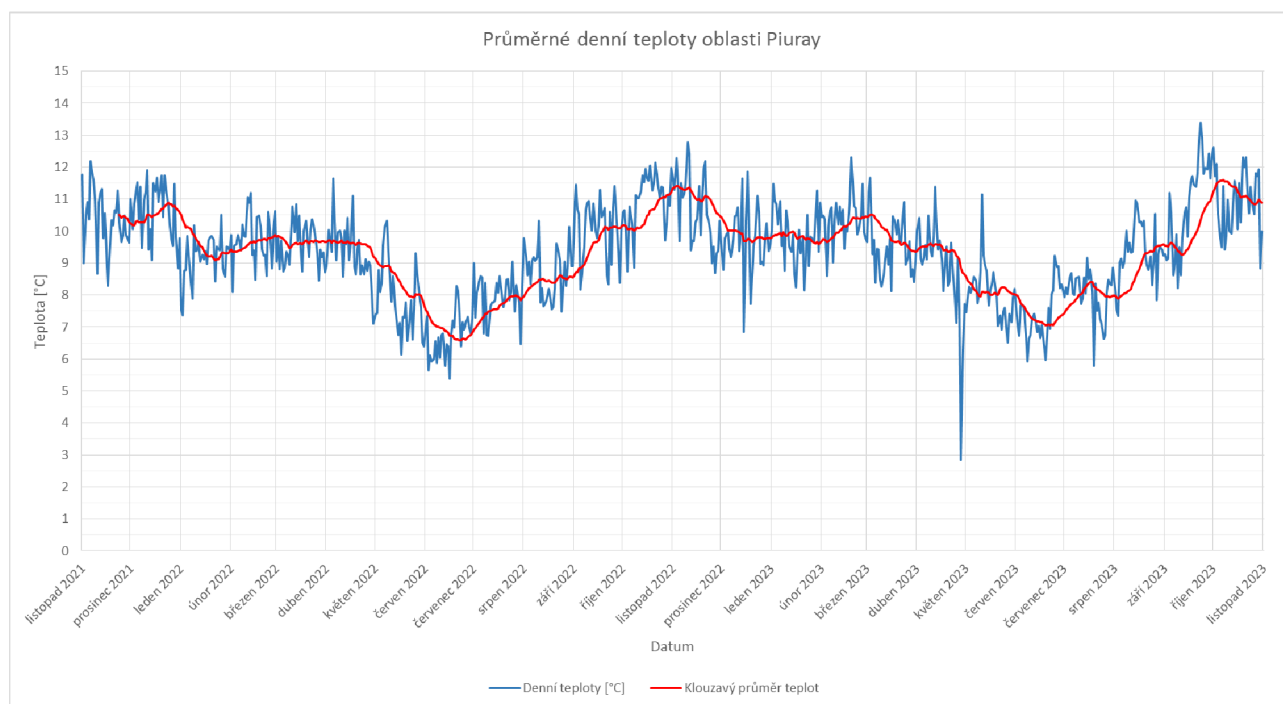
Vysvětlení pro výslednou situaci, jež se dá rozhodně označit jako kritická, může být vícero. Celkem logicky lze v první řadě vycházet z nedostatečného srážkového úhrnu, což je v podstatě podpořeno výsledky ze zmíněné meteorologické stanice (jak bylo uvedeno výše), nicméně tyto byly



s největší pravděpodobností chybné. Protože se hladina snižuje kontinuálně i během celého vlhkého období této oblasti, je poměrně validní úvaha poukazující na antropogenní příčiny a tedy možná zvýšená intenzita využívání vody člověkem.

V každém případě se na vývoji vodního stavu Laguna Piuray podílí zřejmě i změna klimatu, neboť jde o jezero zásobované vodou z ledovců, jejichž ústup je v posledních dekadách jasně prokázán, jak již bylo v práci zmíněno. Rovněž bylo zmíněno, že právě při ústupu ledovců krátkodobě dochází ke zvyšování hladiny ledovcových jezer a případně i k extrémním jevům, jako jsou náhlé povodně GLOF, které z toho plynou. Po této fázi ovšem přísun vody z těchto mizejících zdrojů ustává a v dlouhodobém měřítku se projeví její úbytek v krajině. Vzhledem k tomu, že v této oblasti je regrese ledovců trendem už delší čas, dá se očekávat, že se právě zmíněná situace projevuje na objemu řešené vodní plochy.

Rovněž je potřeba brát v úvahu i možnou nejistotu, již se zabývala předchozí kapitola. Konkrétně se zde nabízí myšlenka, že jde o technickou chybu měření. Vzhledem k principu zaznamenávání dat ultrazvukovým čidlem a zároveň k vývoji grafu však toto není tak pravděpodobné. Čidlo je totiž umístěno nad hladinu a snímá rozdíl ve vzdálenosti mezi jím a vodní hladinou, tudíž by v případě technické chyby (například při narušení stability konstrukce) docházelo spíše k opačnému efektu, neboť by se čidlo přibližovalo k hladině. Data navíc byla zaznamenávána kontinuálně bez přerušení a jde zcela o plynulé snižování během většiny zkoumaného období.



Obrázek 11: Průměrné denní teploty v oblasti Piuray 2021–2023 (zdroj dat: FIEDLER AMS s.r.o., vlastní zpracování)

Meteorologická stanice instalovaná u jezera Piuray měří teplotu ve 30 cm a ve 2 m nad povrchem a pro uvedený graf byly použity údaje z měření právě ze dvou metrů. I přes poměrně zrychlující se klimatické výkyvy v posledních letech není dvouletá datová řada dostatečně dlouhá pro sledování trendů, nicméně jejich náznaky interpretovat lze. Ve srovnání je poslední rok znatelně teplejší než od začátku měření, jak v maximech, tak při porovnání většiny jednotlivých měsíců. Je nasnadě, stejně jako u předchozího grafu, počítat s možnou chybou v měření či záznamu a v tomto případě je dost možné toto předpokládat. Při pohledu na květen 2023 se nabízí podezření, že nejde skutečně o nejnižší naměřenou hodnotu toho roku, minimálně alespoň ne opravdu tak nízkou. Nejnižší teploty budou totiž obecně na jižní polokouli přicházet právě okolo června a července, což jinak kromě pochybného extrému tento graf i naznačuje.

Potenciál tohoto projektu a dalšího měření hydrometeorologických dat je velký. Vzhledem k charakteru vědy totiž vyžaduje výzkum ve fyzické geografii především čas. Zajištění kvalitních přístrojů pro záznam a v dnešní době především digitalizace výzkumu s sebou přináší široké možnosti pro následující práce v oboru. V případě regionu Cuzco pomůže tento projekt v monitorování environmentálních podmínek a vlastně tedy v kvalitě zdejšího života. Už historicky se tato oblast na jezero Piuray jakožto zdroj vody spoléhala, v celé aglomeraci však obyvatel rychle přibývá a pokud jsou měření správná, hladina jezera prudce klesá. Právě tyto výzkumy mají potenciál upozornit na environmentální hrozby a přispět k tvorbě návrhů na zredukování rizik.

### **4.3 Nejistota v hydrometeorologii**

Během hydrologických a meteorologických analýz je vždy třeba počítat s nejistotou naměřených dat. To platí zejména při tvorbě predikcí trendů a jejich interpretací. Kromě nutnosti brát v úvahu velice aktuální změnu klimatu, kdy mohou naměřená data posledních let značně kolísat a o to více se vymykat předpokládaným tendencím, je potřeba také přihlížet k potenciálním technickým chybám ať už mechanickým či digitálním. Jedině tak lze docílit co možná nejpřesnějším představám při plánování různých opatření k mitigaci extrémních jevů, ideálně jejich předcházení anebo přinejmenším zmírnování jejich negativních dopadů na krajinnou sféru.

Postupy získávání hydrologických dat se liší svou složitostí, od hrubých záznamů jako je měření hloubky hladin vodních ploch či teploty vzduchu, až po značně zpracované například při porovnávání naměřeného srážkového úhrnu s radarovými a satelitovými snímky (McMillan et al., 2018, s. 2). Nicméně i u záznamů, jež se zdají být přímočaré, může docházet ke značným výkyvům a chybám měření. Zejména z dlouhodobého hlediska anebo v izolovaných místech měření je velice

těžké vyhnout se chybám technickým, respektive předpokládat stoprocentní konzistenci ve výsledcích, neboť správnou funkci přístrojů mohou narušovat klimatické či antropogenní vlivy.

Způsob práce s chybou v hydrometeorologii je při postupu tvorby klimatických modelů a predikcí nejčastěji opřen o matematiku a statistiku. Ale kvůli nedokonalosti jejich použití ve fyzické geografii je mimo nejistotu v měření nutno dále počítat s parametrickou a strukturální nejistotou, totiž zjednodušeně řečeno s nejistotou ve zpracování naměřených a jiných vstupních či výstupních dat (Gupta a Govindaraju, 2023, s. 1).

To souvisí s dalším možným problémem, jež se týká obecně věrohodnosti poskytnutých dat, zejména v rozvojových zemích, k čemuž se přidává i právě otázka vůbec jejich dostupnosti. Je třeba si uvědomit, že Česká republika je v tomto ohledu na velmi vysoké úrovni, ať už jde o fyzickogeografická či humánněgeografická data. Pro výzkumy v rozvojových zemích je proto ideální spolehnout se na vlastní iniciativu. Jak ukáže ovšem příklad hned níže, chyba v měření bývá někdy zkrátka nevyhnutelná.

## 5 Závěr

Tato práce je věnována poznání negativních změn ve vodních zdrojích v peruánském regionu Cuzco. Jako hlavní činitel těchto transformací je již v názvu práce uvedena klimatická změna a cílem práce bylo analyzovat rozsah jejího působení. Kromě toho jsou zde i zohledněny možné negativní vlivy lidské činnosti regionálního charakteru.

Užitím odborných publikací v cizím jazyce o hydrologických poměrech v řešené oblasti byl jasně prokázán ústup ledovců, které jsou hlavní zásobárnou pitné vody pro horské sídelní útvary v Andách. To dokazuje kritický vliv změny klimatu na životní podmínky zdejšího obyvatelstva. V první řadě tento jev totiž pro ledovcová jezera znamená krátkodobé zvyšování jejich hladiny, který ovšem s sebou přináší vlastní riziko náhlých ničivých povodní (v práci zmiňovaný jev GLOF). Kromě toho ale z dlouhodobého hlediska bude redukce objemu ledovců znamenat neustále menší přísun vody do vodních ploch a vodních toků. Ústup ledovců tak představuje fatální vliv na zásobování vodou obrovského množství obyvatel v regionu Jižní Ameriky.

Součástí práce byla i analýza unikátních dat získaných z hydrometeorologických stanic společnosti FIEDLER AMS s.r.o. instalovaných v oblasti jezera Piuray v rámci společného projektu Univerzity Karlovy a Technické univerzity v Liberci. Analyzována byla jednak data o výšce hladiny jezera Piuray, jež představuje hlavní zdroj pitné vody pro 10ti milionovou aglomeraci kolem historicky hlavního města tehdejší Incké říše, Cuzca. Analýza těchto dat přispěla k utvoření hned několika poznatků. V první řadě jde pochopitelně hned o samotná data, jež jsou v této práci vůbec poprvé zpracovány. Zároveň však během jejich zacházení bylo patrné, že je třeba počítat s významnou nejistotou při jejich zpracování, která je samozřejmě přítomna prakticky ve veškerém vědeckém bádání. I z toho důvodu je tato kapitola zahrnuta do obsahu práce. Objevily se totiž technické chyby přístrojů a zároveň nebylo možné užít datové řady jiných stanic ze stejné oblasti pro komparaci, neboť k nim nebyl získán přístup.

Dosavadní časová řada dat o výšce hladiny jezera, kterou zatím vzhledem k dvouletému období nelze považovat za dostatečně reprezentativní, vykazuje zřetelný poklesový trend. V posledních dvou letech tedy můžeme hovořit o snižování množství vodních zdrojů v této suchu velmi exponované oblasti. Klíčová je tedy pro zdejší aglomeraci ledovcová hmota, která je ukryta v ledovcích nacházejících se v horských oblastech tohoto území, a která představuje druhou nejzaledněnější oblast Peruánských And. Zásadní tedy bude i směřování výzkumu právě do těchto

exponovaných území. Monitoring kvality vody jezera Piuray bude součástí budoucího výzkumu, jehož výsledky budou prezentovány v rámci diplomové práce.

Získání dlouhodobých klimatických dat z širšího regionu Cuzca představuje jednu z rezerv a cílů budoucí diplomové práce, která na tuto práci bude přirozeně navazovat. Potenciál českého měření v Peruánských Andách je každopádně kvůli důležitosti tématu, které se nazývá klimatická změna, a které se objevuje v dnešních diskuzích, médiích a koneckonců i politice, významný a bude jistě ceněným podkladem i pro další práce v budoucnu.

## 6 Seznam použitých zdrojů

### 6.1 Odborné články

Andres, N., Vegas Galdos, F., Lavado Casimiro, W. S., Zappa, M., 2014, *Water Resources and Climate Change Impact Modelling on a daily time scale in the Peruvian Andes*. Hydrological Sciences Journal, 59(11), 2043–2059. <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.862336>.

Bello, C., Suarez, W., Drenkhan, F., Vega-Jácome, F., 2023, *Hydrological impacts of dam regulation for hydropower production: The case of Lake Sibinacocha, Southern Peru*. Journal of Hydrology: Regional Studies, 46, 101319. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101319>.

Branca, D., Haller, A., 2021, *Cusco: Profile of an Andean city*, Cities 2021, Volume 113., 103169. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2021.103169>.

De La Piedra, M. T., 2009, *Hybrid Literacies: The Case of a Quechua Community in the Andes*. Anthropology & Education Quarterly, 40, 110-128. <https://doi.org/10.1111/j.1548-1492.2009.01031.x>.

Drenkhan, F., Carey, M., Huggel, C., Seidel, J., Oré, M. T., 2015, *The Changing Water Cycle: Climatic and socioeconomic drivers of water-related changes in the Andes of Peru*. WIREs Water, 2(6), 715–733. <https://doi.org/10.1002/wat2.1105>.

Drenkhan, F., Guardamino, L., Huggel, C., Frey, H., 2018, *Current and future glacier and lake assessment in the deglaciating Vilcanota-Urubamba Basin, Peruvian andes*. Global and Planetary Change, 169, 105–118. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2018.07.005>.

Emmer A., Wood J. L., Cook S. J., Harrison S., Wilson R., Diaz-Moreno A., Reynolds J. M., Torres J. C., Yarleque C., Mergili M., Jara H. W., Bennett G., Caballero A., Glasser N. F., Melgarejo E., Riveros C., Shannon S., Turpo E., Tinoco T., Torres L., Garay D., Villafane H., Garrido H., Martinez C., Apaza N., Araujo J., Poma C., 2021, *160 glacial lake outburst floods (GLOFs) across the Tropical Andes since the Little Ice Age*, Global and Planetary Change, Volume 208, 103722, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2021.103722>.

García, P., 2019, *Desarrollo Turístico e Identidad Indígena: Cuzco y el Nuevo Aeropuerto de Chinchero*. Revista Andaluza de Antropología, 17, 72–93. <https://doi.org/10.12795/raa.2019.17.04>.

García, P., 2020, *Indigeneity in the Air: The Case of Chinchero Airport in Cusco, Peru*. Bull Lat Am Res, 39, 157-171. <https://doi.org/10.1111/blar.12743>.

Goyburo, A.; Rau, P.; Lavado-Casimiro, W.; Buytaert, W.; Cuadros-Adriazola, J.; Horna, D., 2023, *Assessment of Present and Future Water Security under Anthropogenic and Climate Changes Using WEAP Model in the Vilcanota-Urubamba Catchment, Cusco, Perú*. Water 2023, 15, 1439. <https://doi.org/10.3390/w15071439>.

Gupta, A., & Govindaraju, R. S., 2023, *Uncertainty quantification in watershed hydrology: Which method to use?* Journal of Hydrology, 616, 128749. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128749>.

Hanshaw, M. N., Bookhagen, B., 2014, *Glacial areas, lake areas, and snow lines from 1975 to 2012: status of the Cordillera Vilcanota, including the Quelccaya Ice Cap, northern central Andes, Peru*, The Cryosphere, 8, 359–376, <https://doi.org/10.5194/tc-8-359-2014>.

Hall, N. D., Stuntz, B. B., & Abrams, R. H., 2008, *Climate Change and Freshwater Resources*, *Natural Resources & Environment*, 22(3), 30–35. <http://www.jstor.org/stable/40924924>.

Chevallier, P., Pouyaud, B., Suarez, W. et al., 2011, *Climate change threats to environment in the tropical Andes: glaciers and water resources*. *Reg Environ Change* 11 (Suppl 1), 179–187. <https://doi.org/10.1007/s10113-010-0177-6>.

McMillan, H. K., Westerberg, I. K., & Krueger, T., 2018, *Hydrological data uncertainty and its implications*. *WIREs Water*, 5(6). <https://doi.org/10.1002/wat2.1319>.

Nowack, K., 2007, *Review of How the Incas Built Their Heartland*, by R. A. Covey, *Anthropos*, 102(2), 609–611. <http://www.jstor.org/stable/40389755>.

Oshun, J., Keating, K., Lang, M., Miraya Oscco, Y., 2021, *Interdisciplinary Water Development in the Peruvian Highlands: The Case for Including the Coproduction of Knowledge in Socio-Hydrology*. *Hydrology* 2021, 8, 112. <https://doi.org/10.3390/hydrology8030112>.

Salzmann, N., Huggel, C., Rohrer, M., Silverio, W., Mark, B. G., Burns, P., and Portocarrero, C., 2013, *Glacier changes and climate trends derived from multiple sources in the data scarce Cordillera Vilcanota region, southern Peruvian Andes*, *The Cryosphere*, 7, 103–118, <https://doi.org/10.5194/tc-7-103-2013>.

Schauwecker, S., Rohrer, M., Acuña, D., Cochachin, A., Dávila, L., Frey, H., Giráldez, C., Gómez, J., Huggel, C., Jacques-Coper, M., Loarte, E., Salzmann, N., Vuille, M., 2014, *Climate trends and Glacier Retreat in the Cordillera Blanca, Peru, revisited*. *Global and Planetary Change*, 119, 85–97. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2014.05.005>.

Soria Dall'Orso, CAM, 2020, *Wetlands in the environmental impact assessment of the proposed Chinchero airport*, *Kawsaypacha Magazine: Society and Environment*, 7, 11–33. <https://doi.org/10.18800/kawsaypacha.202001.001>.

Taylor, R. G., Scanlon, B., Döll, P., Rodell, M., van Beek, R., Wada, Y., Longuevergne, L., Leblanc, M., Famiglietti, J. S., Edmunds, M., Konikow, L., Green, T. R., Chen, J., Taniguchi, M., Bierkens, M. F., MacDonald, A., Fan, Y., Maxwell, R. M., Yechieli, Y., ... Treidel, H., 2012, *Ground water and climate change*. *Nature Climate Change*, 3(4), 322–329. <https://doi.org/10.1038/nclimate1744>.

Veettil, B.K., Wang, S., Simões, J.C., Ruiz Pereira, S.F., de Souza, S.F., 2018, *Regional climate forcing and topographic influence on glacier shrinkage: eastern cordilleras of Peru*. *Int. J. Climatol*, 38: 979–995. <https://doi.org/10.1002/joc.5226>.

Wade, L., 2019, *Airport construction threatens Incan heartland*, *Science* 363, 568–569, <https://doi.org/10.1126/science.363.6427.568>.

## 6.2 Knihy

Bates, B.; Kundzewicz, Z.; Wu, S., 2008, *Climate change and water*. Intergovernmental Panel on Climate Change Secretariat, 2008, ISBN: 9789291691234.

Farrington, I., ed. Cusco, 2013, *Urbanism and archaeology in the Inka world*, 2013, University Press of Florida, ISBN: 9780813044330.

León, G. A., 2021, *Justicia hídrica: Una Mirada Desde américa latina: Homenaje a mourik bueno de mesquita*. Centro de Estudios Regionales Andinos Bartolomé de las Casas, Cuzco, 2021 ISBN: 978-612-4121-39-5.



Schwartz, F.W. and Zhang, H., 2003, *Fundamentals of Groundwater*. John Wiley & Sons, New York, 2003, ISBN: 978-0471137856.

### 6.3 Kvalifikační práce

Kocum, J., *Tvorba odtoku a jeho dynamika v pramenné oblasti Otavy*. Praha, 2012. Dizertační práce, Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta, Katedra fyzické geografie a geoekologie. Vedoucí práce prof. RNDr. Bohumír Janský, CSc.

### 6.4 Internetové zdroje

Bennett, G., 2018, *For Cusco, Peru, an investment in the countryside is an investment in the City*. Forest Trends. [online] 2018. [cit. 21. 11. 2023]. Dostupné z: <https://www.forest-trends.org/blog/in-cusco-peru-an-investment-in-the-country-is-an-investment-in-the-city/>.

Brinkhoff, T., 2020, *Cusco – Population*. (Province, Peru) - Population Statistics, Charts, Map and Location. [online] 2020. [cit. 27. 6. 2023]. Dostupné z: [https://www.citypopulation.de/en/peru/cusco/admin/0801\\_cusco/](https://www.citypopulation.de/en/peru/cusco/admin/0801_cusco/).

Connolly, C., 2021, *The uphill battle to stop Peru from building a new airport near Machu Picchu*. Smithsonian.com. [online] 2021, [cit. 3. 7. 2023]. Dostupné z: <https://www.smithsonianmag.com/travel/uphill-battle-to-stop-peru-from-building-new-airport-near-machu-picchu-180977088/>.

Instituto Nacional de Estadística e Informática, 2017, *Consultar resultados del censo nacional 2017*. Plataforma del Estado Peruano. [online] 2017 [cit. 8. 7. 2023]. Dostupné z: <https://www.gob.pe/535-consultar-resultados-del-censo-nacional-2017>.

Orbegozo, F. A., 2021, *Aeropuerto de Chinchero: Presentan demandas de Amparo Ante Poder judicial para detener El Proyecto*. El Comercio Perú. [online] 2021, [cit. 4. 7. 2023]. Dostupné z: <https://elcomercio.pe/peru/aeropuerto-de-chinchero-presentan-demandas-de-amparo-ante-poder-judicial-para-detener-el-proyecto-cusco-noticia/>.

Wikipedia contributors, 2023, *Alejandro Velasco Astete International Airport*. Wikipedia, The Free Encyclopedia. [online] 2023. [cit. 3. 7. 2023]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Alejandro\\_Velasco\\_Astete\\_International\\_Airport&oldid=1162847689](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Alejandro_Velasco_Astete_International_Airport&oldid=1162847689).