



ISSN: 2447-3359

REVISTA DE GEOCIÊNCIAS DO NORDESTE

Northeast Geosciences Journal

v. 9, nº 2 (2023)

<https://doi.org/10.21680/2447-3359.2023v9n2ID32348>



Análise topográfica quantitativa da bacia do rio Salado – Região do Atacama – Chile

Topographic quantitative analysis of the Salado river's basin – Atacama Region – Chile

Keyla Manuela Alencar da Silva Alves¹; Genisson Panta²; Kleython de Araujo Monteiro³; Drielly Fonseca⁴; Maria Carolina Parodi⁵

¹ Universidad Tecnológica Metropolitana, Facultad de Ingeniería, Departamento de Industria, Escuela de Geomensura. Santiago, Chile. e-mail: keyla.dasilva@utem.cl.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7635-2430>

² Universidade Federal de Alagoas, IGDEMA, Maceió, Brasil. e-mail: genissongeo@gmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6745-7772>

³ Universidade Federal de Alagoas, IGDEMA, Maceió, Brasil. e-mail: kleython.monteiro@igdema.ufal.br.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4829-3722>

⁴ Universidad Tecnológica Metropolitana, Facultad de Ingeniería, Departamento de Industria, Escuela de Geomensura. Santiago, Chile. e-mail: dfonseca@utem.cl

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1374-8697>

⁵ Universidad Tecnológica Metropolitana. Facultad de Ingeniería, Departamento de Industria, Santiago, Chile. e-mail: cparodi@utem.cl

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2132-5168>

Resumo: A análise quantitativa dos dados topográfico-digitais é um passo fundamental nas investigações geomorfológicas estruturais (tectônicas modernas) e geomorfológicas dinâmicas (movimento de massa). Inicialmente, havia um número limitado de algoritmos padrão para análise de dados topográficos, incluindo o amplamente utilizado "Stream Profiler". A digitalização de muitos dos métodos de análise topográfica democratizou o acesso a tais algoritmos através do desenvolvimento de código aberto livremente disponível a partir de ferramentas flexíveis, tais como TopoToolBox (TTB) e o Kit de Análise Topográfica (TAK). O TTB contém poucos produtos em seu conjunto de comando, porém, possui funções únicas que permitem análises complexas em uma escala regional. Já o TAK permite a avaliação de uma grande quantidade de dados em um curto período. O objetivo deste estudo é identificar pontos de ruptura anômalos distribuídos na rede de drenagem. Também é proposto investigar os condutores responsáveis pela manutenção do padrão de distribuição espacial, tais como controles litológicos e propagação de pulso de incisão. O principal resultado obtido neste estudo é que existem várias quebras contínuas e discretas nos perfis longitudinais. Outro fato sobre a distribuição espacial das quebras é que a maioria delas ocorre na proximidade entre as confluências tributárias e o vale entrenchado dos rios coletores.

Palavras-chave: Captação drenagem; GIS; morfotectônica.

Abstract: Quantitative analysis of topographic-digital data is a fundamental step in structural geomorphological (modern tectonic) and dynamic geomorphological (mass movement) investigations. Initially, there were a limited number of standard algorithms for analyzing topographic data, including the widely used "Stream Profiler". Meanwhile, the digitization of many of the topographic analysis methods democratized access to such algorithms through the development of freely available open-source code. Flexible tools, such as TopoToolBox (TTB) and the Topographic Analysis Kit (TAK). TTB contains few products in its command set, however, it has unique functions that allow complex analysis on a regional scale. Already TAK allows the evaluation of a large amount of data in a short period. The objective of this study is to identify anomalous break points distributed in the drainage network. It is also proposed to investigate the drivers responsible for maintaining the spatial distribution pattern, such as lithological controls and incision pulse propagation. The main result obtained in this study is that there are several continuous and discrete breaks in the longitudinal profiles. Another fact about the spatial distribution of the breaks is that most of them occur in the proximity between tributary confluences and the entrenched valley of the collecting rivers.

Keywords: Drainage capture; GIS; morphotectonics.

Recebido: 26/04/2023; Aceito: 28/09/2023; Publicado: 06/10/2023.

1. Introdução

As ferramentas de análise topográfica disponíveis no *software* de Sistema de Informação Geográfica juntamente com produtos de satélite de alta resolução proporcionaram o desenvolvimento tecnológico necessário para realizar estudos da evolução do relevo em escala regional e com resolução espacial em nível de detalhe (BINNIE et al., 2020).

O contexto geológico chileno, devido à constante elevação epigênica do terreno, representa uma paisagem característica que gera energia potencial para o surgimento de estruturas tectônicas que controlam o traçado fluvial. Este tipo de paisagem é característico e propício à ocorrência de capturas de fluviiais (SORDI et al., 2022; WU et al., 2022).

A captura fluvial ocorre quando um canal capturado é desviado para um canal de captação, que tem um potencial erosivo maior. O canal de captação geralmente tem declives mais íngremes e, em conjunto com as características do solo e as chuvas que ocorrem no local, os canais de captação são capazes de expandir suas áreas de drenagem. Este fenômeno de captação de drenagem, em algumas paisagens, está associado a tectônica ativa e à elevação dos blocos que atuam como controladores da rede de drenagem (PASTOR, 2013; RODRIGUES et al., 2022).

Outro aspecto morfométrico associado ao fenômeno da captura é a erosão, ou mais precisamente a energia potencial dos canais. A diferença entre a velocidade de incisão dos canais está diretamente relacionada com os processos de captura. A taxa de incisão está ligada à taxa de elevação do terreno. Assim, maiores taxas de elevação representam maiores taxas de incisão de rios (CHRISTOFOLLETTI, 1981; OLIVEIRA, 2010; MARTOS e ROURE, 2019).

O objetivo do estudo é investigar o padrão de distribuição espacial de *knickpoints* e métricas topográficas (por exemplo, Ksn, declive e faixa topográfica) na bacia do rio Salado, na região do deserto do Atacama, nos Andes Centrais. Todos estes atributos foram extraídos utilizando ferramentas de análise existentes nos programas TTB e TAK. O objetivo é utilizar o método Chi para quantificar o Ksn (Índice de Inclinação do Canal Normalizado) e, para identificar os *knickpoints* foi aplicado o algoritmo KickpointFinder e, a partir daí, se realizar extrações de métricas topográficas (FORTE and WHIPPLE, 2019).

A bacia do rio Salado foi selecionada devido a sua ocorrência histórica de eventos de movimento de massa e, especialmente, devido às falhas geológicas que atravessam os canais do rio, modelando os aspectos morfológicos dos vales da bacia. O sistema de falhas do Atacama é destacado por traços norte-sul e falhas secundárias na direção nordeste (falha do Cerro Salado) entre os municípios de Chañaral e Diego de Almagro, onde podem ser observadas formações de Jurássico (Formação La Negra) e Cretáceo (Formação Llanta) a leste.

2. Metodologia

2.1 Área de estudo

A bacia do rio Salado está localizada no norte da região do Atacama e cobre uma área de 7.400 km². A litologia da bacia incorpora uma grande quantidade de depósitos não consolidados onde estão assentados os córregos, assim como formações rochosas do Paleozoico ao Cenozóico. O arcabouço litológico, em geral, é dividido entre rochas intrusivas e estratificadas (sedimentares e vulcanosedimentares) (CORNEJO et al., 1998a; CORNEJO et al., 1998b; GODOY e LARA, 2005).

Ao longo do rio Salado, falhas geológicas atravessam os canais do rio, estruturando os aspectos morfológicos dos vales da região. O sistema de falhas do Atacama é destacado por traços norte-sul e falhas secundárias noroeste (Falha Cerro Salado) entre os municípios de Chañaral e Diego de Almagro, onde se observa um mergulho à leste das formações Jurássica (Formação La Negra) e Cretácea (Formação Llanta) (Figura 1).

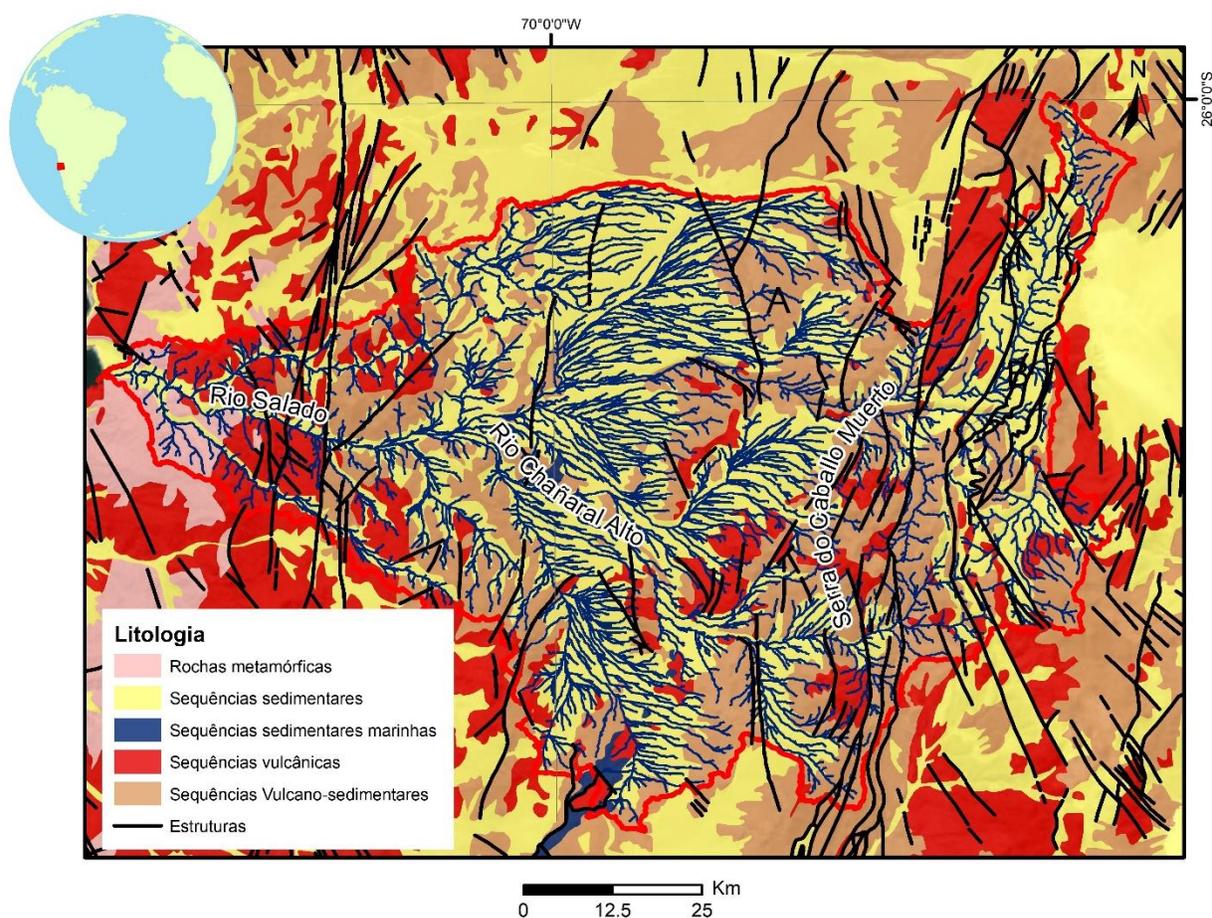


Figura 1 – Localização da área de estudo: bacia hidrográfica do rio Salado no setor norte da região do Atacama – Chile.

Fonte: Autores (2023).

As formações quaternárias incluem depósitos eólicos e de areias finas; depósitos coluvionares de composição monômica localizados nas encostas dos morros; depósitos aluviais compostos de cascalhos, areias e silte de granulometria variável associados a fluxos de detritos (GODOY *et al.*, 2011); e depósitos salinos recentes do Salar de Pedernales composto de silte e halitas (TOMLINSON *et al.*, 1999). Ademais há a ocorrência de depósitos antrópicos (Holoceno) associados aos rejeitos da mineração extraídos da mineradora El Salvador (CORNEJO *et al.*, 1998b).

As unidades geomorfológicas presentes são a Cordilheira Costeira com a plataforma costeira, o Vale Longitudinal, a Pré-cordilheira, a Depressão dos salares e a Cordilheira dos Andes. Além disso, estando localizado no sistema andino orogênico de tectônica ativa, existem vulcões ativos na alta cordilheira dos Andes, do tipo estratovolcano, e grandes planícies de material extrusivo (LORCA, 2016). A altitude aumenta desde as Planícies Fluviais Marítimas em direção à Cordilheira Domeyko, subindo gradualmente até a Pampa Ondulada. A Cordilheira da Costa não costuma ultrapassar 1.500 m, e a Cordilheira de Domeyko atinge 3.000 m, onde os leitos dos rios são orientados na direção norte-sul, principalmente devido à influência de falhas.

Os solos predominantes nas áreas onde estão localizados os assentamentos humanos, nos municípios de Chañaral e Diego de Almagro, são os Yermosols calcários e os Cambisols ocráticos, respectivamente. Nas proximidades do Salar Pedernales, predominam os Fluvisóis (GÓMES, 2016).

2.2 Índice de Declividade Normalizado (Ksn)

Para a extração das métricas do relevo, foi utilizado um Modelo Digital de Elevação (MDE) proveniente do projeto *Alaska Satellite Facility* - (ALOS PALSAR) com resolução espacial de 12.5 metros. Como a topografia digital apresenta um ruído inerente, se utilizou o algoritmo CRS com o objetivo de remover depressões e soleiras espúrias nos perfis longitudinais. A partir disso, foi calculado, para a rede de drenagem, o Índice de Declividade Normalizada (Ksn) pelo método chi (χ) ou integral, desenvolvido por Perron e Royden (2013). Na aplicação deste método, espera-se que rios em estado de equilíbrio apresentem perfis χ versus elevação uma linha reta, enquanto perfis transientes apresentam inflexões nesta relação. Essas inflexões podem ser associadas a alterações espaciais nas taxas de incisão, soerguimento diferencial, propagação de sinal de queda de nível de base e controles da litologia e de estruturas da trama geológica, por exemplo. Portanto, pode-se definir:

$$z(x) = z(x_b) + \left(\frac{U}{KA_0^m} \right)^{\frac{1}{n}} \chi$$

na qual χ :

$$\chi = \int_{x_b}^x \left(\frac{A_0}{A(x)} \right)^{\frac{m}{n}} dx$$

Na equação acima $z(x)$ representa a elevação em função da distância, $z(x_b)$ simboliza a elevação do exutório da bacia, $A(x)$ é a área de drenagem em função da distância e dx define o intervalo fixo em que as variáveis citadas são registradas (BELAYNEH, et al., 2022; KUBWIMANA et al., 2021; MICCADEI, et al., 2021; MARRUCCI et al., 2018). Como pode-se notar, a variável de interesse (Ksn) é definida pela declividade da reta através da relação bivariada entre a variável χ e $z(x)$. No intuito de padronizar as medidas e torná-las comparáveis a outros estudos, definiu-se uma concavidade de referência (θ_{ref}) de 0.45, um valor frequentemente utilizado em estudos geomorfológicos para rios de leito rochoso que drenam regiões montanhosas (e.g.). Adicionalmente, foram mapeados knickpoints através do algoritmo KnickpointFinder com uma tolerância vertical de 100 metros definida com base na correção do perfil via CRS, além do ângulo de inclinação das vertentes e a amplitude topográfica. Todas as análises foram processadas com o auxílio do software TopoToolbox e Topographic Analysis Toolkit.

3. Resultados

Foram mapeados 37 knickpoints na bacia do rio Salado, com uma tolerância vertical de 100 metros. A maior parte dos *knickpoints* encontram-se sobre o alto curso do canal principal, entre as províncias geomorfológicas da Cordilheira Pré-Altiplânica e a Depressão Central. Porém, um outro núcleo de *knickpoints* ocorre no maior tributário do rio Salado, na Quebrada Chañaral Alto, que representa 8% do total ($n = 3$), também na Cordilheira Pré-Altiplânica. Apenas um único *knickpoint* ocorre na Cordilheira Costeira, em um contato entre basalto e sequências sedimentares continentais, à montante do sistema de falhas do Atacama, que é a principal feição tectônica deste setor (BROWN et al., 1993). Para além do exposto, mais de 32% ($n = 12$) das rupturas estão assentadas sobre sequências sedimentares, 22% ($n = 8$) sobre rochas vulcânicas, 46% ($n = 17$) estão sobre sequências vulcanossedimentares. (Figuras 2 e 3).

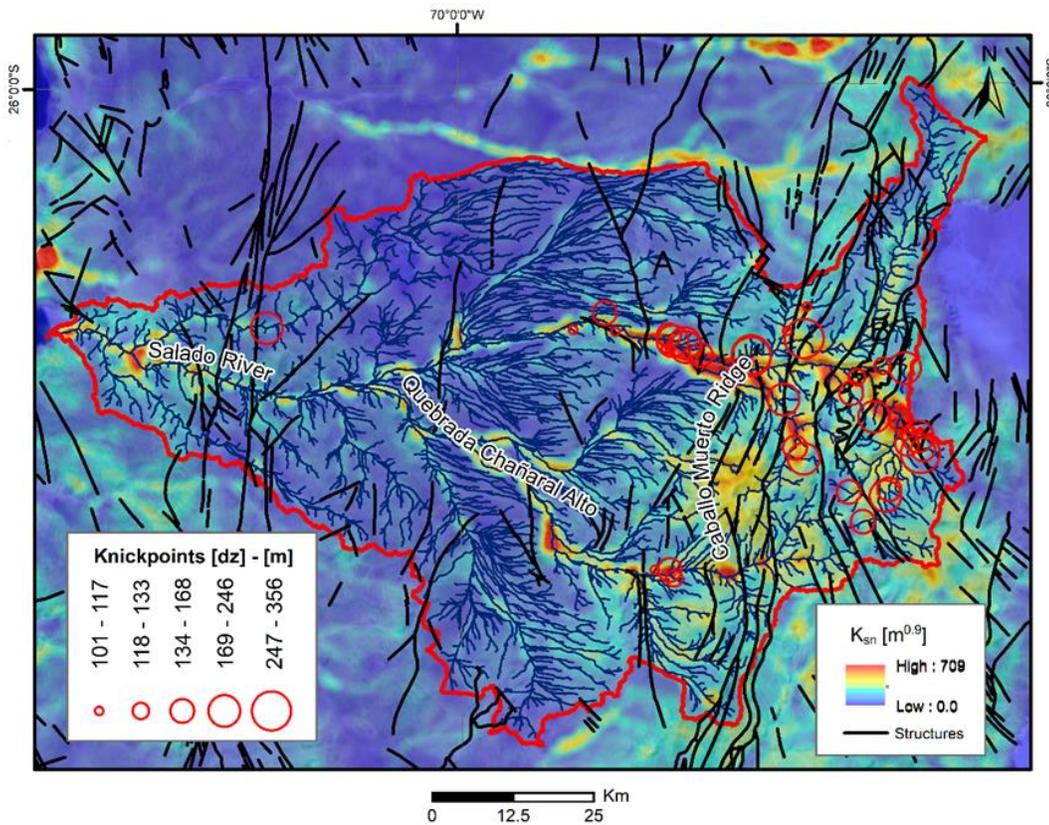


Figura 2 – Espacialização do K_{sn} e knickpoints da bacia.
Fonte: Autores (2023).

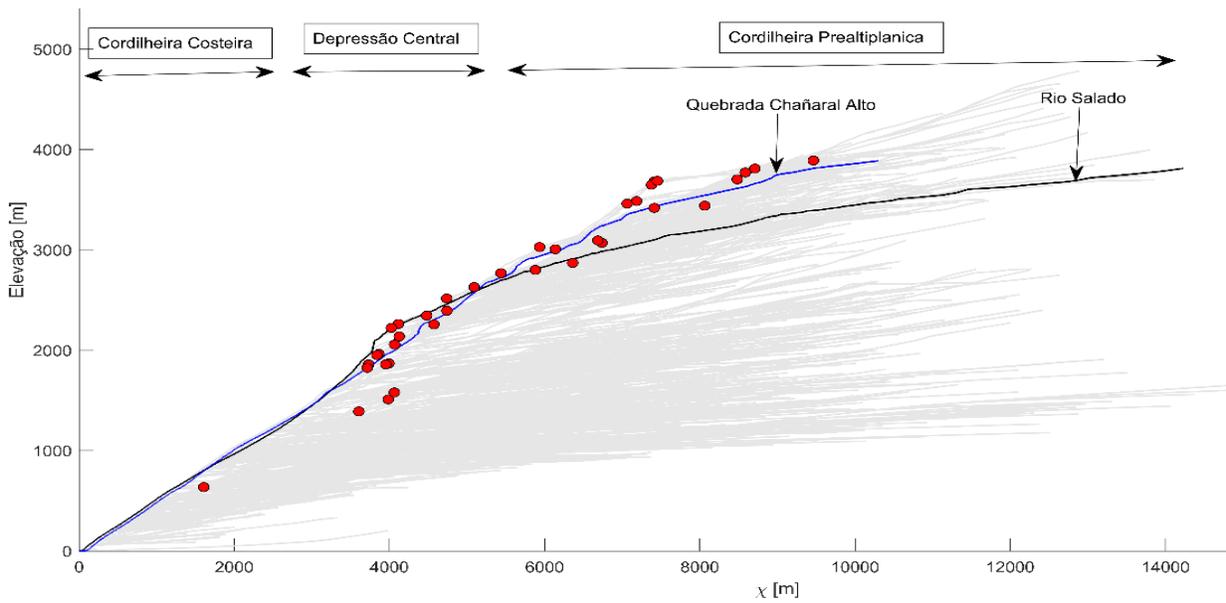


Figure 3 – os perfis χ -z com destaque para o perfil principal do rio Salado e da Quebrada Chañaral Alto.
Fonte: Autores (2023).

As litologias mais resistentes aos processos erosivos das seqüências vulcanossedimentares, como o riolito, andesito, brecha e traquito, abrangem a maior concentração de *knickpoints*. Por exemplo, quando se soma a quantidade de *knickpoints* sobre rochas vulcanossedimentares e vulcânicas temos 68% (n = 25) do total mapeado. Entretanto, o controle litológico não é um condicionante de primeira ordem nesta paisagem, já que existe soerguimento ativo que afeta toda a topografia regional e, conseqüentemente, os perfis longitudinais. Em comparação, foram mapeados menos *knickpoints* sobre seqüências sedimentares, representadas por silte, areia e cascalho. Analisando o parâmetro de magnitude da ruptura (dz) dos *knickpoints*, verificou-se que as seqüências vulcânicas, como granito, diorito e tonalito, possuem maior dz médio, com 174 metros. As seqüências vulcanossedimentares e sedimentares possuem dz relativamente menor, com 145 e 142 metros, respectivamente (Figura 4).

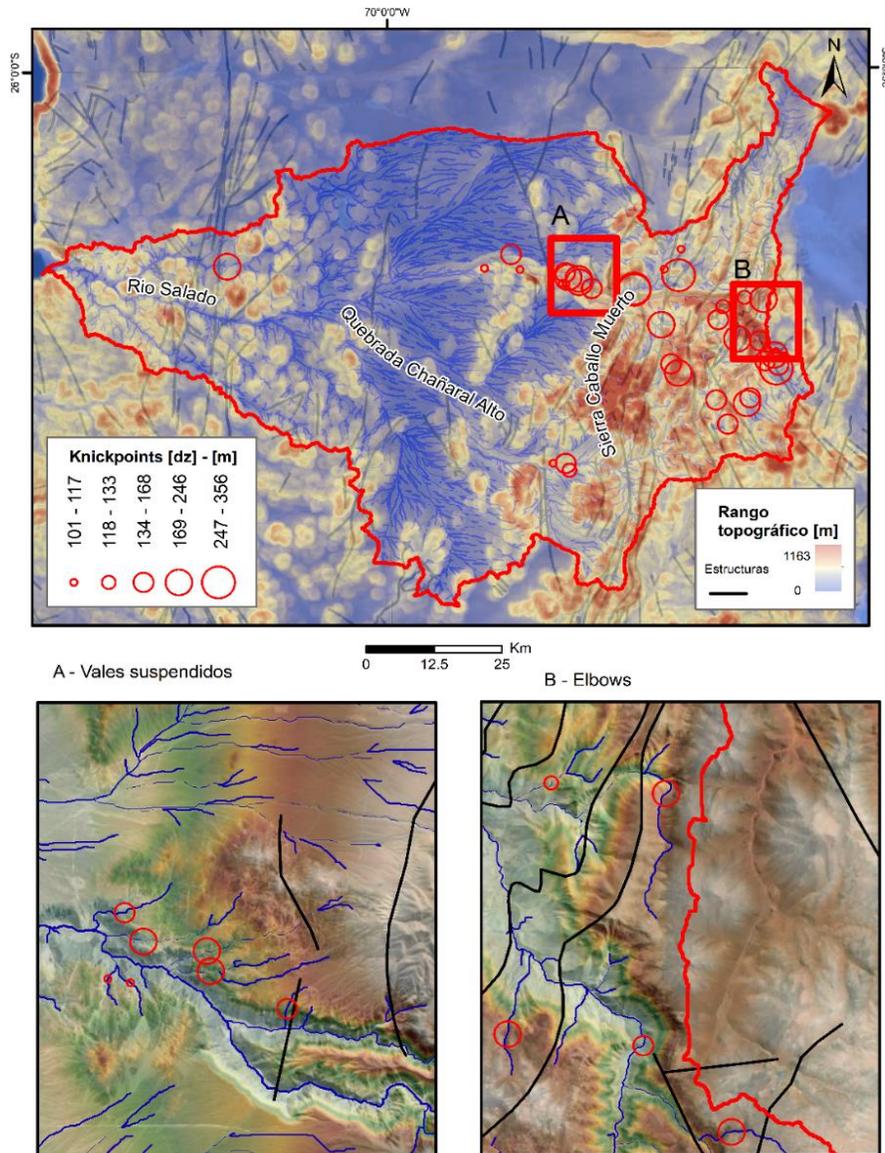


Figure 4 – Amplitude topográfica com um raio de 1 km na bacia do rio Salado. A presença de vales e cotovelos pendurados na cabeceira do rio é destacada.

Fonte: Autores (2023).

Os segmentos dos planos de drenagem regulados por fraturas locais normalmente têm pontos de interferência menores e traços de falhas normais (Figura 5a-b). Por outro lado, é evidente que os *knickpoints* no leste e oeste da área estão situados em falhas sísmicas potenciais com cinemática indeterminada.

A análise e a correlação dos dados demonstram que o regime neotectônico controla a maior parte dos *knickpoints* na bacia do rio Salado. Qualquer análise da evolução de uma paisagem ainda deve considerar outras técnicas de análise morfoestrutural, como a simetria de bacias hidrográficas e outras anomalias de relevo.



Figure 5 – Segmento do plano de drenagem regulado por fraturas locais a oeste (a) 422485.05mE/7088312.43mS e Segmento do plano de drenagem regulado por fraturas locais a leste (b) 370143.76mE/7087432.87mS.

Fonte: Autores (2023).

3.1 Discussões

A elevação média dos *knickpoints* mapeados foi de 2.636 metros e a mediana 2.640 metros, acima da elevação média da bacia, de 1940 metros. O desvio padrão da elevação foi de 826 metros. A análise dos perfis de χ versus elevação apresentaram um padrão desagrupado de *knickpoints* que indica controles na eficiência erosiva e processos de reorganização de drenagem. Esses processos fazem parte do conjunto da dinâmica autogênica de bacias hidrográficas, descritos por Gallen et al., (2018) e Scheingross et al., (2020). Isso também sugere que os *knickpoints* não estão ligados a um único processo morfogenético. Essa interpretação também é sustentada pela dispersão de elevação das rupturas. O contraste interno entre os valores de χ das sub-bacias também sugere processos de rearranjo da rede de drenagem. Observa-se, especialmente na Cordilheira Pré-Altiplânica muitas anomalias de drenagem, como cotovelos (*elbows*) e divisores de drenagem rebaixados, indicando que a pirataria fluvial é um processo fundamental da dinâmica interna da bacia (BISHOP, 1995).

Os valores contrastantes de valores de χ entre cabeceiras denotam taxas contrastantes de erosão e que podem deflagrar processos de captura e rearranjo da rede hidrográfica. Maiores valores de χ indicam menor potencial erosivo, assim como menores valores indicam altas taxas de erosão. Em muitos trechos da bacia há contraste dos valores de χ entre as cabeceiras dos tributários do rio Salado e as cabeceiras dos afluentes da Quebrada Chañaral Alto. Os perfis χ -z apresentam convexidades expressivas e uma transição entre a Cordilheira Costeira e a Depressão Central junto a Cordilheira Pré-

Altiplânica. A taxa com que a declividade dos canais reduz com a área de drenagem da bacia conhecida como índice de concavidade da bacia foi de 0.35 que é inferior ao adotado como referência de 0.45. As taxas de incisão fluvial também foram investigadas pela espacialização do índice normalizado da declividade dos canais (Ksn). Os valores de Ksn médio atingem 67 m0,9 e o máximo foi 700 m0,9. O desvio padrão desta métrica foi de 40 m0,9. Os maiores valores se concentram nos vales de maior hierarquia. O alto curso, na Cordilheira Pré-Altiplânica, os valores atingem 353 m0,9 e nas superfícies com relevo suave os valores são de 13 a 20 m0,9. Muitos *knickpoints* marcam o contato entre a transição de vales incisos e superfícies conservadas, com menor nível de incisão vertical.

Não foi observado uma relação clara entre os maiores valores de Ksn e a amplitude altimétrica, com raio de 1 km, especialmente na região da Sierra Caballo Muerto. Os maiores valores estão concentrados a oeste, na Cordilheira Pré-Altiplânica e atingem mais de 1 km de amplitude. Na Depressão Central os valores reduzem para 100 metros e voltam a aumentar próximo ao litoral, na Cordilheira Costeira, com amplitudes ente 300 e 600 metros. Ambas as regiões com maiores amplitudes altimétricas são cortadas perpendicularmente por sistemas de falhas orientadas geralmente norte-sul e a rede de drenagem com direção preferencial leste-oeste. Alguns rios que marcam inflexões claras no sentido de escoamento da drenagem, orientados norte-sul e desaguando em vales leste-oeste, como nas cabeceiras Quebrada Chañaral Alto, podem ter sido capturados.

Outro fato sobre a distribuição espacial das rupturas é que a maioria ocorre na proximidade entre confluências de tributários e o vale entrincheirado dos rios coletores. Enquanto a área de drenagem do rio Salado é de 7.557 km², a área média à montante das rupturas é de apenas 54 km². Como muitos ocorrem em confluências, isso sugere que eles seguem um padrão de vales suspensos, sobretudo ao longo do cânion do rio Salado. Essas feições são responsáveis por manter conservada acima das rupturas uma superfície de baixa amplitude altimétrica e declividades suaves ou uma paisagem reliquial, cuja expressão geomorfológica demonstra condições que antecedem a incisão fluvial de maior grau e intensidade. Ao longo do cânion do Salado, vales suspensos apresentam desníveis que superam 400 metros, com poucos sinais de migração remontante. Vales suspensos também foram mapeados por Gasparini e Whipple (2014) nos Andes Bolivianos e foram associados a presença de soerguimento regional súbito e recente de uma superfície de erosão.

Estudos paleogeográficos da bacia do rio Salado (NALPAS et al. 2008) demonstra que o processo de reorganização fluvial, com abandono e preenchimento de vales é um processo que já faz parte da dinâmica interna desse sistema e que remonta ao Oligoceno-Mioceno. Soma-se a isso as mudanças paleoclimáticas que modificam o funcionamento dos hidrológico dos sistemas fluviais e o transporte de sedimentos, além de fundamentalmente o regime tectônico do orógeno. O grau de escavamento dos vales do piemonte andino dentro de leques aluviais (ALVES et al. 2021) pode estar associado ao soerguimento ativo e processos de reorganização da drenagem. Com bacias ganhando área de drenagem, pode-se incrementar a incisão fluvial, alterar o fluxo de sedimentos e desengatilhar outras capturas (GIACHETTA; WILLET, 2018). Merece atenção principalmente o divisor oeste da bacia do rio Salado na Cordilheira Pré-Altiplânica. Esses controles internos podem, inclusive, influenciar fluxos de detritos que são frequentes na bacia.

4. Considerações finais

A análise morfométrica da rede de drenagem da bacia do rio Salado permitiu verificar que existe várias rupturas contínuas e discretas nos perfis longitudinais. Como a paisagem possui soerguimento ativo, o controle litológico na nucleação dessas rupturas seja secundário, apesar disso é observada uma correspondência entre a magnitude das rupturas e sequências vulcânicas e vulcanossedimentares. Os *knickpoints* não possuem uma mesma origem. Por isso, verificou-se dois processos principais de nucleação: contraste areal entre rios tributários e canais coletores, formando vales suspensos e sugestivas capturas de drenagem. Observou-se a presença de *elbows* e divisores rebaixados, que são indicadores geomorfológicos de processos de reorganização da rede de drenagem. Estudos anteriores reportam que esses processos são de longa data na bacia do Salado, especialmente sobre a Depressão Central. A combinação desses processos para nucleação de *knickpoints* mantém uma baixa área de contribuição à montante das rupturas. Os maiores valores de Ksn estão localizados nos vales principais, especialmente ao longo do cânion do rio Salado. A amplitude topográfica também se distribui sistematicamente de acordo com os compartimentos geomorfológicos da bacia. A aplicação da topografia digital por meio de ferramentas modernas de análise se mostrou como um facilitador para ampliar a extensão de área analisada em um menor tempo, além de refinar os valores e permitir a reprodutibilidade dos resultados.

Agradecimentos

Esta iniciativa foi financiada pela Universidad Tecnológica Metropolitana (UTEM) do Chile. Agradecemos também ao Laboratório de Solos e Meio Ambiente do Departamento de Indústria da Faculdade de Engenharia da UTEM e ao Conselho Nacional Técnico e de Pesquisa (CONICET -ARGENTINA), por meio da bolsa de pós-doutorado Latin America 2020, pelo apoio na execução do estudo.

Referências

- BELAYNEH, L.; DEWITTE, O.; GULIE, G.; POESEN, J.; O'HARA, D.; KASSAYE, A.; ENDALE, T.; KERVYN, M. Landslides and Gullies Interact as Sources of Lake Sediments in a Rifting Context: Insights from a Highly Degraded Mountain Environment. *Geosciences*. 12, 274, 2022. <https://doi.org/10.3390/geosciences12070274>
- BINNIE, S. A., REICHERTER, K. R., VICTOR, P., GONZÁLEZ, G., BINNIE, A., NIEMANN, K., DUNAI, T. J. The origins and implications of paleochannels in hyperarid, tectonically active regions: The northern Atacama Desert, Chile. *Global and Planetary Change*, 185, 103083, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2019.103083>
- BISHOP, P. Drainage rearrangement by river capture, beheading and diversion. *Progress in physical geography*, 19(4), 449-473, 1995, <https://doi.org/10.1177/030913339501900402>
- BROWN, M.; DIAZ, F.; GROCCOTT, J. Displacement history of the Atacama fault system 25° 00' S-27° 00' S, northern Chile. *Geological Society of America Bulletin*, 105(9), 1165-1174, 1993. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1993\)105<1165:DHOTAF>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1993)105<1165:DHOTAF>2.3.CO;2)
- CHRISTOFOLETTI, A. A noção de equilíbrio em geomorfologia fluvial. *Revista de Geografia Norte Grande*, (8), 69-86, 1981. <http://www.cuadernos.info/index.php/RGNG/article/view/39563>
- CORNEJO, P.; MPODOZIS, C.; TOMLINSON, A. J. Santiago-Chile: Servicio Nacional de Geología y Minería, 1998a. Hoja Salar de Maricunga, Región de Atacama. Esc.1:100.000.
- CORNEJO, P.; RIQUELME, R.; MPODOZIS, A. J. Santiago-Chile: Servicio Nacional de Geología y Minería, 1998b. Mapa Geológico da Folha de Salvador, Região do Atacama. Esc. 1:100.000.
- DA SILVA ALVES, K. M. A., DÁVILA, M. C. P., GARCÍA, E. D. Z., DE LIRA, D. R., DE ARAUJO MONTEIRO, K. Caracterización morfométrica de la cuenca del Salado Bajo, Región de Atacama, Chile. *Investigaciones Geográficas*, (62), 90-105, 2021. <https://doi.org/10.5354/0719-5370.2021.64574>
- FORTE, A. M., WHIPPLE, K. X. The topographic analysis kit (TAK) for TopoToolbox. *Earth Surface Dynamics*, 7(1), 87-95, 2019. <https://doi.org/10.5194/esurf-7-87-2019>
- GALLEN, S. F. Lithologic controls on landscape dynamics and aquatic species evolution in post-orogenic mountains. *Earth and Planetary Science Letters*, 493, 150-160, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.04.029>
- GIACHETTA, E.; WILLETT, S. D. Effects of river capture and sediment flux on the evolution of plateaus: insights from numerical modeling and river profile analysis in the upper Blue Nile catchment. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 123(6), 1187-1217, 2018. <https://doi.org/10.1029/2017JF004252>
- GODOY, A. A.; CAMPETELLA, C. M. POSSIA, N. E. Un caso de baja segregada en niveles altos en el sur de Sudamérica: descripción del ciclo de vida y su relación con la precipitación. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 26, 491-502, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862011000300014>
- GODOY, E.; LARA, L. Hoja El Salvador Región Occidental de Atacama. Santiago-Chile: Servicio Nacional de Geología y Minería, 2005. Esc 1:250.000.

- GOMÉZ, V. Geología y análisis histórico-meteorológico del aluvión de marzo de 2015 en Chañaral, Atacama. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile. Santiago de Chile, 2016. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/140039> (accessed on 11/10/2022).
- KUBWIMANA, D.; AIT BRAHIM, L.; NKURUNZIZA, P.; DILLE, A.; DEPICKER, A.; NAHIMANA, L.; ABDELOUAFI, A.; DEWITTE, O. Characteristics and Distribution of Landslides in the Populated Hillslopes of Bujumbura, Burundi. *Geosciences*, 11, 259, 2021. <https://doi.org/10.3390/geosciences11060259>
- LORCA, M. Projeções do legado mineiro-industrial na Província de Chañaral, Região de Atacama, Chile. *Diálogo Andino*, p. 45-56, 2016. <http://dx.doi.org/10.4067/S0719-26812016000300045>
- MARRUCCI, M.; ZEILINGER, G.; RIBOLINI, A.; SCHWANGHART, W. Origin of Knickpoints in an Alpine Context Subject to Different Perturbing Factors, Stura Valley, Maritime Alps (North-Western Italy). *Geosciences*, 8, 443, 2018. <https://doi.org/10.3390/geosciences8120443>
- MARTOS, F. M. Alta actividad de la incisión fluvial y de los procesos de ladera en el valle del río Guadalentín (Pozo Alcón, Jaén). *Geogaceta*, 66, 3-6, 2019. https://sge.usal.es/archivos/geogacetas/geo66/Geo66_01.pdf
- MICCADEI, E.; CARABELLA, C.; PAGLIA, G. Morphoneotectonics of the Abruzzo Periadriatic Area (Central Italy): Morphometric Analysis and Morphological Evidence of Tectonics Features. *Geosciences*, 11, 397, 2021. <https://doi.org/10.3390/geosciences11090397>
- NALPAS, T., DABARD, M. P., RUFFET, G., VERNON, A., MPODOZIS, C., LOI, A., HÉRAIL, G. Sedimentation and preservation of the Miocene Atacama Gravels in the Pedernales–Chañaral area, Northern Chile: climatic or tectonic control?. *Tectonophysics*, 459(1-4), 161-173, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2007.10.013>
- OLIVEIRA, D. Capturas fluviais como evidências da evolução do relevo: uma revisão bibliográfica. *Revista do Departamento de Geografia*, 20., p. 37-50, 2010. <https://doi.org/10.7154/RDG.2010.0020.0003>
- PASTOR, A. Las capturas fluviales: contextos, causas y consecuencias. Una explicación de los procesos de captura fluvial en distintos contextos geológicos. *Revista de Geografía Espacios*, 3(5), 27-41, 2013. <https://doi.org/10.25074/07197209.5.347>
- RODRIGUES, W. F.; SALGADO, A. A. R.; MAIA, R. P. Evidências de captura fluvial no semiárido setentrional brasileiro: o caso do divisor entre os rios Acaraú e Aracatiaçu. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 23(2), p. 1334-1356, 2022. <https://doi.org/10.20502/rbg.v23i2.2047>
- SCHEINGROSS, J. S.; LIMAYE, A. B.; MCCOY, S. W.; WHITTAKER, A. C. The shaping of erosional landscapes by internal dynamics. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(12), 661-676, 2020. <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00170-y>
- SORDI, M. V.; DE MORAIS, E. S.; BIFFI, V. H. R. Drainage evolution in the Piraí depression (southern Brazil): evidence for headward erosion in large south american river systems. *Journal of South American Earth Sciences*, 119, 104022, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.104022>
- TOMLINSONS, A. J.; NORNEJO, P.; MPODOZIS, C. Hoja Potrerillos, Región de Atacama. Santiago-Chile: Servicio Nacional de Geología y Minería, 1999. Esc 1:100.000.
- WHIPPLE, K. X.; GASPARINI, N. M. Tectonic control of topography, rainfall patterns, and erosion during rapid post-12 Ma uplift of the Bolivian Andes. *Lithosphere*, 6(4), 251-268, 2014. <https://doi.org/10.1130/L325.1>
- WU, Y.; YANG, R.; HE, C.; HE, J. Caution on determining divide migration from cross-divide contrast in χ . *Geological Journal*, 57, 4090 – 4098, 2022. <https://doi.org/10.1002/gj.4530>