

RESSALVA

Atendendo solicitação da autora, o texto completo desta tese será disponibilizado somente a partir de 10/12/2022.



**PROGRAMA DE
PÓS-GRADUAÇÃO
EM GEOCIÊNCIAS
E MEIO AMBIENTE**

PLANÍCIE FLUVIAL E CAMPO DE DUNAS EÓLICAS DO MÉDIO RIO
SÃO FRANCISCO: CRONOLOGIA DE DEPÓSITOS E SUCESSÃO
DE EVENTOS GEOLÓGICOS NO QUATERNÁRIO DO BRASIL

PATRICIA COLOMBO MESCOLOTTI

Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Campus de Rio Claro

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“Júlio de Mesquita Filho”
Instituto de Geociências e Ciências Exatas Campus de Rio Claro

PATRICIA COLOMBO MESCOLOTTI

**PLANÍCIE FLUVIAL E CAMPO DE DUNAS EÓLICAS DO
MÉDIO RIO SÃO FRANCISCO: CRONOLOGIA DE
DEPÓSITOS E SUCESSÃO DE EVENTOS GEOLÓGICOS
NO QUATERNÁRIO DO BRASIL**

Tese de doutorado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Campus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutora em Geociências e Meio Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Mario Luis Assine

Coorientador: Prof. Dr. Fabiano Nascimento Pupim

Rio Claro - SP

2021

M578p

Mescolotti, Patricia Colombo

Planície fluvial e campo de dunas eólicas do médio rio São Francisco: cronologia de depósitos e sucessão de eventos geológicos no Quaternário do Brasil / Patricia Colombo Mescolotti. -- Rio Claro, 2021

128 p. : il., tabs., fotos, mapas + 1 CD-ROM

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro

Orientador: Mario Luis Assine

Coorientador: Fabiano Nascimento Pupim

1. Quaternário. 2. Geomorfologia. 3. Sedimentologia. 4. Geocronologia. 5. Campo eólico continental. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

PATRICIA COLOMBO MESCOLOTTI

PLANÍCIE FLUVIAL E CAMPO DE DUNAS EÓLICAS DO MÉDIO RIO
SÃO FRANCISCO: CRONOLOGIA DE DEPÓSITOS E SUCESSÃO DE
EVENTOS GEOLÓGICOS NO QUATERNÁRIO DO BRASIL

Tese de Doutorado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Geociências e Meio Ambiente

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Mario Luis Assine (orientador) - IGCE / UNESP/Rio Claro (SP)

Prof. Dr. Carlos Conforti Ferreira Guedes - Setor de Ciências da Terra / UFPR/Curitiba (PR)

Prof. Dr. Francisco William da Cruz Junior - IGc / USP/São Paulo (SP)

Profa. Dra. Milene Fornari - IB / UNESP/São Vicente (SP)

Profa. Dra. Vanda Carneiro de Claudino Sales - CC / UFC/Fortaleza (CE)

Conceito: **Aprovado.**

Rio Claro - SP, 10 de dezembro de 2021

*Dedico aos meus pais, Eduardo
Mescolotti e Denise Mescolotti,
que me incentivaram desde
cedo a fazer perguntas.*

“O conhecimento é uma aventura interminável na borda da incerteza”

Frank Herbert, livro Duna

AGRADECIMENTOS

A execução desta tese contou com o apoio e colaboração, direta ou indiretamente, de diversas pessoas e instituições, que foram fundamentais neste processo. Primeiramente, agradeço meu orientador e amigo, Mario Assine, por todos esses anos de debates e aprendizado. Agradeço por você fazer parte da minha jornada desde o início e por ser parte essencial da minha formação como cientista. Gostaria de agradecer ao meu coorientador, Fabiano Pupim, pelas ótimas conversas e por sempre acreditar e me incentivar a evoluir. Você foi parte fundamental para eu me achar quando eu me perdi (também literalmente).

Agradeço ao prof. Francisco Ladeira, pela parceria de tantos campos, às vezes com algumas aventuras, e por tudo que me ensinou sobre o mundo da pedologia. Agradeço ao prof. André Sawakuchi pelas discussões e *insights*, que foram importantes para me nortear em diversos momentos. Agradeço ao prof. Paulo César Giannini pela paciência de ler tão atentamente meus trabalhos e pelas correções sempre tão primorosas.

Agradeço aos meus amigos e integrantes/ex-integrantes do laboratório LESTE, Unesp – Filipe Varejão, Mariza Rodrigues, Paloma Promenzio, Ana Maria Sforcin e, em especial, à Milena Rosa e Amanda Santa Catharina – pelas conversas mais diversas e pelo suporte e cafés diários. Agradeço ao meu amigo Otavio Vieira, que têm me acompanhado desde o primeiro dia de graduação. Ao professor e amigo Eder Merino, por me auxiliar no mundo GIS e pelos papos e risadas do dia a dia. Agradeço a todos que me ajudaram nas etapas de campo.

Agradeço aos integrantes do laboratório LEGAL, IGC-USP, pela ótima recepção e por terem me ajudado nesta nova empreitada da Luminescência, em especial às amigas Fernanda Rodrigues e Jandessa de Jesus. Agradeço especialmente as técnicas, e agora amigas, Thays Minelli e Luciana Nogueira, por todo riso e por terem iluminado minhas dúvidas. Aos amigos Daniel de Souza, Georgea Melo e Kleiton de Araujo pela recepção e parceria em São Paulo.

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq pela concessão da bolsa de doutorado. À Universidade Federal do Oeste da Bahia, campus de Barra, pelo apoio logístico nas etapas de campo. Agradeço ao projeto PIRE, processo nº 2017/50085-3, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo suporte financeiro ao trabalho de campo. Ao Programa de Pós-graduação em Geociências e Meio Ambiente pelo apoio financeiro nas etapas laboratoriais.

Agradeço aos diversos amigos que me apoiaram nesta jornada, em especial todas as amigas da minha ex-república Sinta-a-Liga, meus colegas da Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente e aos meus vizinhos. Agradeço em especial ao Leonardo Rodrigues, por ter sido meu apoio e ter tornado meus dias mais leves e felizes nesta reta final.

Enfim, agradeço imensamente aos meus pais, por me apoiarem, por serem meus exemplos e meus maiores fãs, e serem parte primordial do meu crescimento. Aos demais membros da minha família, que me apoiam e incentivam.

RESUMO

Grandes rios, como o São Francisco, são sistemas dinâmicos cuja evolução depende de forçantes internos e externos, particularmente tectônica, nível do mar e clima. O São Francisco é o maior rio da porção mais oriental da América do Sul, com seu curso superior em ambientes semiúmidos, mas com sua bacia hidrográfica principalmente em condições semiáridas. Como sua bacia está em áreas tectonicamente estáveis e controlada pelo nível de base local, os depósitos do São Francisco são excelentes registros sedimentares fluvial para entender como grandes sistemas de rios tropicais responderam às mudanças climáticas do passado. Associado diretamente ao rio São Francisco, o sistema eólico Xique-Xique é o maior campo de dunas do interior do Quaternário no Brasil (~ 8.000 km²). Objetivando estabelecer a cronologia dos depósitos e a evolução dos eventos geológicos quaternários para o campo de dunas de Xique-Xique e para os depósitos aluviais do rio São Francisco, investigamos um trecho de 200 km do médio curso do São Francisco, na Bahia, Nordeste do Brasil. Para isso, utilizamos abordagem multi-métodos, usando sensoriamento remoto e levantamentos de campo para análises geomorfológicas e sedimentológicas combinadas com datação por luminescência opticamente estimulada (OSL). Dez zonas geomorfológicas fluviais e eólicas foram caracterizadas, mapeadas e datadas. Duas zonas fluviais compreendem terraços degradados, e três zonas abrangem a planície agradacional confinada ativa. Reconhecemos pelo menos quatro fases de agradação fluvial (> 90 ka; 65 a 39 ka; 18 a 9,5 ka e 380 anos a recente) e três fases de incisão (I1 - 85 a 65 ka; I2 - 39 a 18 ka e I3 - 9,5 a 1,0 ka). O desenvolvimento inicial do campo eólico de Xique-Xique se deu em pelo menos ~ 250 ka e compreende dunas parabólicas estabilizadas (simples e compostas), lençol de areia e dunas parabólicas ativas. Reconhecemos dois eventos principais de atividade eólica (~ 23 a 18 ka e ~ 15 a 10 ka) e duas fases de estabilização de dunas (~ 18 a 15 ka e desde 5 ka). Interpretamos que os dois grandes sistemas aqui estudados (fluvial e eólico) interagem entre si e respondem de forma diferente aos gatilhos climático, em especial a precipitação e o vento. Os eventos de incisão ocorreram devido ao aumento da descarga fluvial produzida pela intensificação da Zona de Convergência do Atlântico Sul, que tem grande influência na precipitação sobre o alto curso do rio. Assim, concluímos que os ciclos de agradação-incisão do rio São Francisco durante os últimos 100 ka são prováveis produtos da variação milenar da precipitação. Já para a dinâmica eólica, as mudanças de precipitação na área influenciaram principalmente o processo de estabilização das dunas por vegetação, em especial no úmido HS1 (evento *Heinrich 1*). Contudo, os momentos de atividade das dunas aqui reconhecidos foram mais condicionados pelas mudanças de disponibilidade de sedimentos fluviais. Assim, os eventos eólicos estão intimamente relacionados com os eventos de incisão/deposição fluvial na área, conferindo um excepcional caso de interação flúvio-eólica no Quaternário do Brasil. O amplo sistema eólico interior de Xique-Xique resulta da conjugação da grande disponibilidade de sedimentos fornecidos principalmente pelo rio, as altas velocidades dos ventos de leste e a desaceleração significativa do vento causada pela serra de quartzito na borda oeste do campo de dunas.

Palavras-chave: Quaternário tardio, resposta fluvial, datação OSL, interação flúvio-eólica, dunas parabólicas, campo eólico continental

ABSTRACT

Large rivers, with São Francisco, are dynamic systems whose evolution depends on both internal and external forcing, particularly tectonics, sea level, and climate. The São Francisco River is the easternmost large river of South America, with its upper course in semi-humid settings, but with a watershed mostly under semi-arid conditions. As this is a river with its basin in tectonically quiescent areas and controlled by local base level, the São Francisco River's deposits are an excellent fluvial sedimentary record to shed light on how large tropical rivers responded to climatic changes of the Quaternary. Directly associated with the São Francisco River, the Xique-Xique eolian system is the largest Quaternary interior dune field in Brazil (~8,000 km²). Aiming to establish the chronology of the deposits and the evolution of quaternary geological events for the Xique-Xique dune field and for the alluvial deposits of the São Francisco River, we investigated a 200-km section of the medium course of the São Francisco River in Bahia, northeast Brazil. We use a multi-method approach, using remote sensing methods and field surveys for geomorphological and sedimentological analyses combined with optically stimulated luminescence dating (OSL). Several fluvial and eolian geomorphological zones were characterized, mapped, and dated. Two zones are represented by degraded terraces, and three zones comprise the active confined aggradational plain. We recognized at least four phases of fluvial aggradation (>90 ka; 65 to 39 ka; 18 to 9.5 ka and 380 years to recent) and three phases of incision (I1 - 85 to 65 ka; I2 - 39 to 18 ka and I3 - 9,5 to 1,0 ka). The eolian field initial developed at least since ~250 ka and comprises predominantly stabilized parabolic dunes (simple and compound), sand sheet and modern active parabolic dunes. We recognized two main events of eolian activity (~23 to 18 ka and ~15 to 10 ka) and two phases of dune stabilization (~18 to 15 ka and since 5 ka). We interpret that the two large systems studied here (fluvial and eolian) interact with each other and respond differently to climatic triggers, particularly precipitation. The incision events occurred probably due to increased fluvial discharge produced by intensification of the South Atlantic Convergence Zone, which has great influence on precipitation over the upper São Francisco River. Thus, we conclude that the aggradation-incision cycles of the São Francisco River during the last 100 ka are likely products of millennial precipitation variation. As for the eolian dynamics, the changes in precipitation in the area mainly influenced the process of stabilization of the dunes by vegetation, especially in the humid HS1 (Heinrich 1 event). However, the moments of dune activity were more conditioned by changes in the river sediment supply. Thus, eolian events are closely related to incision/fluvial deposition events in the area, providing an exceptional case of fluvial-eolian interaction in the Quaternary of Brazil. The Xique-Xique eolian system results from the conjugation of sediment carried mostly from the river, high eastern wind speeds, and a significant wind deceleration caused by mountains on the western border of the dune field.

Keywords: Late Quaternary, fluvial response, OSL dating, fluvio-eolian interaction, parabolic dunes, interior dune field.

ORGANIZAÇÃO DA TESE

Esta tese foi concebida e organizada no intuito de apresentar os resultados da pesquisa em forma de artigos científicos. Os resultados e discussões destes artigos foram apresentados nos capítulos 5 e 6 e constituem parte essencial desta tese. Nos capítulos iniciais (**capítulos 1 e 2**) introduzimos a problemática e questões que motivaram o nosso estudo, bem como o objetivo desta tese.

No **capítulo 3** foi feita a contextualização do Quaternário do rio São Francisco, buscando tratar desde a bacia fluvial até a área estudada. Também apresentamos a revisão do conhecimento sobre os depósitos eólicos que ocorrem na bacia, bem como os conhecimentos paleoclimáticos para a região em que o rio São Francisco está inserido. Esta revisão foi essencial para embasarmos nossa pesquisa e expandirmos dados locais para o contexto regional. Os métodos utilizados nesta tese são descritos no **capítulo 4**.

No **capítulo 5** buscamos identificar as fases de aggradação e incisão fluvial no médio rio São Francisco e seus possíveis controles. Para isso, usamos uma abordagem multi-métodos, como sensoriamento remoto e pesquisas de campo para análises geomorfológicas e sedimentológicas combinadas com datação por luminescência opticamente estimulada (OSL). Também mapeamos os campos eólicos associados à planície do rio São Francisco e apresentamos algumas idades OSL destes depósitos. Este capítulo é referente ao artigo intitulado “*Fluvial aggradation and incision in the Brazilian tropical semi-arid: climate-controlled landscape evolution of the São Francisco River*” publicado na *Quaternary Science Reviews*, apresentado na íntegra no [Apêndice 1](#).

No **capítulo 6** focamos mais nos depósitos eólicos que ocorrem na planície do médio rio São Francisco (campo eólico de Xique-Xique). Mapeamos formas de relevo eólicas, descrevemos fácies sedimentares, datamos depósitos por OSL e interpretamos os períodos de atividade e estabilização das dunas. Este capítulo gerou outro artigo, a ser submetido em breve em revista internacional.

Finalmente, o **capítulo 7** apresenta as conclusões e considerações adicionais desta tese. O mapa geomorfológico da área, apresentando todos os pontos levantados nesta tese e todas as unidades geomorfológicas identificadas e descritas nos capítulos 5 e 6, pode ser encontrado no [Apêndice 2](#). Informações e dados complementares utilizados nesta tese encontram-se nos anexos.

ÍNDICE

RESUMO	iv
ABSTRACT	v
ORGANIZAÇÃO DA TESE	vi
ÍNDICE	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE TABELAS	x
LISTA DE ABREVIACÕES	xi
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	4
3 CONTEXTUALIZAÇÃO DO QUATERNÁRIO DO RIO SÃO FRANCISCO	5
3.1 Bacia do rio São Francisco	5
3.2 Dunas parabólicas e registros de dunas na planície do rio São Francisco	9
3.3 Caracterização da área de estudo	12
4 MÉTODOS E MEIOS	17
4.1 Mapeamento geomorfológico	17
4.2 Validação de campo e caracterização sedimentológica	17
4.3 Morfometria das dunas e análise do regime eólico	19
4.4 Luminescência Opticamente Estimulada (OSL)	20
5 AGRADAÇÃO E INCISÃO FLUVIAL NO SEMIÁRIDO TROPICAL BRASILEIRO: CONTROLE CLIMÁTICO NA EVOLUÇÃO DA PAISAGEM NO RIO SÃO FRANCISCO	23
5.1 Introdução	23
5.2 Resultados	26
5.2.1 Cronologia OSL	26
5.2.2 Zonas Geomorfológicas e fácies sedimentares	27
5.3 Discussão	42
5.3.1 Interpretação dos eventos de agradação e incisão fluvial	42
5.3.2 Resposta fluvial das mudanças climáticas do Quaternário	46
5.4 Conclusões	51
6 ATIVAÇÃO E ESTABILIZAÇÃO DO CAMPO DE DUNAS DO XIQUE-XIQUE DURANTE O QUATERNÁRIO TARDIO	52
6.1 Introdução	52
6.2 Resultados	55
6.2.1 Cronologia OSL	58
6.2.2 Formas eólicas	60
6.2.3 Perfis estratigráficos verticais	68

6.3	Discussão	70
6.3.1	Eventos de ativação e estabilização eólicos	72
6.3.2	Implicações paleoambientais e paleoclimáticas	73
6.3.3	Suprimento de areia e atividade eólica	736
6.4	Conclusões	78
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÃO	80
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82
	APÊNDICE 1	I
	APÊNDICE 2	II
	ANEXO 1	III
	ANEXO 2	IV
	ANEXO 3	V

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Localização da área estudada na bacia do rio São Francisco.....	2
Figura 3.1. Bacia do São Francisco e perfil longitudinal do rio.....	5
Figura 3.2. Detalhe do alto e médio curso do rio São Francisco.....	6
Figura 3.3. Detalhe do sub-médio rio São Francisco	8
Figura 3.4. Detalhe do baixo rio São Francisco	8
Figura 3.5. Morfologias das dunas parabólicas	10
Figura 3.6 Dunas na planície aluvial do rio São Francisco	11
Figura 3.7. Mapa geológico da área de estudo	13
Figura 3.8. Distribuição pluviométrica mensal e temperatura máxima e mínima.....	14
Figura 3.9. Potencial eólico anual sazonal a 100 m de altura para as quatro estações na área de estudo	15
Figura 3.10. Localização da área de estudo e os atuais padrões climáticos regionais. ..	16
Figura 4.1. Localização dos pontos estudados na área.....	18
Figura 5.1. Delimitação da Bacia do rio São Francisco e da área estudada.....	24
Figura 5.2. Detalhe da área estudada.....	25
Figura 5.3. Mapa geomorfológico da área, com localização dos pontos estudados.....	29
Figura 5.4. Comparação dos perfis altimétricos das zonas fluviais	30
Figura 5.5. Compartimentação geomorfológica e seção altimétrica	30
Figura 5.6. Leques aluviais.....	31
Figura 5.7. Feições geomorfológicas do médio rio São Francisco.	32
Figura 5.8. Seções sedimentares e fotos das superfícies degradacionais.	34
Figura 5.9. Seções do terraço baixo, com detalhamento pedológico	35
Figura 5.10. Depósito do Terraço Baixo intensamente cimentados por carbonato.....	36
Figura 5.11. Seções sedimentares da planície fluvial agradacional	37
Figura 5.12. Dunas do campo eólico de Xique-Xique	41
Figura 5.13. Modelo esquemático de evolução geomorfológica e sedimentar do médio rio São Francisco no Quaternário tardio.....	42
Figura 5.14. Datações OSL e <i>proxy</i> climáticos	44
Figura 5.15. Mapa da precipitação na América do Sul com localização do conjunto de dados climáticos regionais usados no capítulo	48

Figura 6.1. Localização do campo eólico de Xique-Xique e perfis topográficos.	53
Figura 6.2. Detalhe da área de estudo e dos pontos eólicos estudados	55
Figura 6.3. Prancha fotográfica das dunas estabilizadas	56
Figura 6.4. Distribuição das velocidades médias anuais de vento e as direções médias de vento ao longo da Bacia do rio São Francisco.....	57
Figura 6.5. Variação da velocidade média do vento por estações do ano para a estação de Remanso – BA.....	57
Figura 6.6. Morfologia das dunas estabilizadas do sistema eólico de Xique-Xique.....	60
Figura 6.7. Morfologias eólicas do campo de dunas de Xique-Xique	61
Figura 6.8. Dados morfométricos e direções de migração das dunas	62
Figura 6.9. Mapa geomorfológico do sistema eólico de Xique-Xique	63
Figura 6.10. Características sedimentares das dunas estabilizadas	65
Figura 6.11. Variação de cores dos sedimentos para diferentes morfologias eólicas. ...	65
Figura 6.12. Seções sedimentares verticais, com idades OSL e posição do nível de ocorrência de fragmentos de carvão	66
Figura 6.13. Morfologias das dunas ativas do campo eólico de Xique-Xique.....	67
Figura 6.14. Seção vertical P24 -Geleia, com fácies sedimentares e idades OSL	69
Figura 6.15. Prancha fotográfica da Seção P24 - Geléia.....	70
Figura 6.16. Ventos do campo de dunas de Xique-Xique.....	71
Figura 6.17. Idades OSL dos depósitos eólicos aqui estudados e compilação de dados paleoclimáticos para o NE do Brasil	75

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1. Sequência de passos utilizados no protocolo SAR neste trabalho.....	21
Tabela 5.1. Idades OSL para sedimentos da planície do rio São Francisco	27
Tabela 5.2. Zonas geomorfológicas, feições sedimentares e idades OSL do rio São Francisco.....	28
Tabela 6.1. Idades OSL para sedimentos do sistema eólico de Xique-Xique	59

LISTA DE ABREVIACOES

ANA	Agência Nacional de guas
CAM	<i>Central Age Model</i>
CCM	Cinturão de Canal Moderno
CDE	Campo de Dunas Eólicas
CMA	Cinturão Meandrante Antigo
CMJ	Cinturão Meandrante Jovem
DC	Dunas compostas
De	Dose equivalente
DP	Dunas <i>Perched</i>
HS	<i>Heinrich Stadials</i>
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
LA	Lençol de Areia
LEGaL	Laboratório de Espectrometria de Gama e Luminescência
LGM	<i>Last Glacial Maximum</i>
MDE	Modelo Digital de Elevação
MIS	<i>Marine Isotope Stage</i>
MS	Megadunas Simples
MSA	Monção Sul-Americana
OD	<i>Overdispersion</i>
OSL	<i>Optically Stimulated Luminescence</i>
SAR	<i>Single-aliquot Regenerative Dose</i>
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission Products</i>
TA	Terraço Alto
TB	Terraço Baixo
TL	Datação por Termoluminescência
YD	<i>Younger Dryas</i>
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul
ZCIT	Zonas de Convergência Intertropical

1 INTRODUÇÃO

O rio São Francisco (*big river*, *sensu* Miall, 2006) é o maior rio na porção leste da América do Sul, com extensão de 2.900 km (Santos et al., 2012) e sua bacia hidrográfica correspondendo a 7.4% do território do Brasil (Knoppers et al., 2006; Figura 1.1). Além da grande expressividade em área de sua bacia hidrográfica, o rio São Francisco corre por zonas climáticas diversas, com seu curso superior em um cenário semiúmido, mas com as demais áreas da bacia ocorrendo predominantemente sob condições semiáridas (Silva e Clark, 2004). Dunas parabólicas estabilizadas e ativas, ocorrem associadas à planície do rio São Francisco, principalmente na sua porção média com o campo de dunas de Xique-Xique (Barreto et al; 2002; Oliveira et al., 1999; Ab'Saber, 2006; Bartorelli et al., 2010), e na sua foz (Barbosa e Dominguez, 2004). O “paleodeserto” de Xique-Xique, nordeste do Brasil, é o maior campo de dunas interiores do Quaternário do Brasil (Ab'Sáber, 2006), destacando-se por suas grandes dimensões e a associação das dunas parabólicas estabilizadas e ativas com a planície aluvial do rio São Francisco (Figura 1.1).

Os depósitos sedimentares quaternários do rio São Francisco são importantes registros geológicos para entender a origem e evolução de um dos principais rios da América do Sul. Quando associado com datações absolutas e informações pedológicas, esses depósitos podem fornecer informações indiretas sobre como as mudanças paleo-hidrológicas e paleoclimáticas afetaram a dinâmica fluvial. Apesar de sua expressividade em tamanho e importância para os ecossistemas e populações humanas, os depósitos sedimentares, a geomorfologia e a dinâmica sedimentar do rio São Francisco têm sido pouco estudadas até o momento.

Sistemas continentais eólicos são sensíveis as mudanças na vegetação, precipitação e velocidade dos ventos, pois esses parâmetros influenciam a atividade e estabilização das dunas. Nos campos de dunas parabólicas, esta sensibilidade às alterações climáticas é ainda mais significativa devido à estreita relação entre a morfodinâmica deste tipo de duna e a vegetação e entre a vegetação e o clima (Hugenholtz e Wolfe, 2005; Hugenholtz et al., 2010). Assim, estudos dos depósitos eólicos do campo eólico de Xique-Xique também podem fornecer importantes informações da dinâmica sedimentar no interior do NE do Brasil, do padrão de circulação dos paleoventos e a resposta deste grande sistema sedimentar frente às variações paleoclimáticas. Apesar da relevância do “paleodeserto” de Xique-Xique já ter sido apontada anteriormente (Giannini et al., 2005, Ab'Sáber, 2006; Bartorelli et al., 2010; Tripaldi et al., 2016),

poucos estudos geocronológicos foram realizados até o momento (Barreto, 1996; Tatumi et al., 1998; Oliveira et al., 1999). Além disso, a associação entre um significativo campo eólico continental, dominado por dunas parabólicas, com a planície aluvial do rio São Francisco (Mescolotti et al., 2021), oferece oportunidade ímpar para estudar a interação flúvio-eólica em um trato de sistema moderno (Langford, 1989; Langford & Chan, 1989).

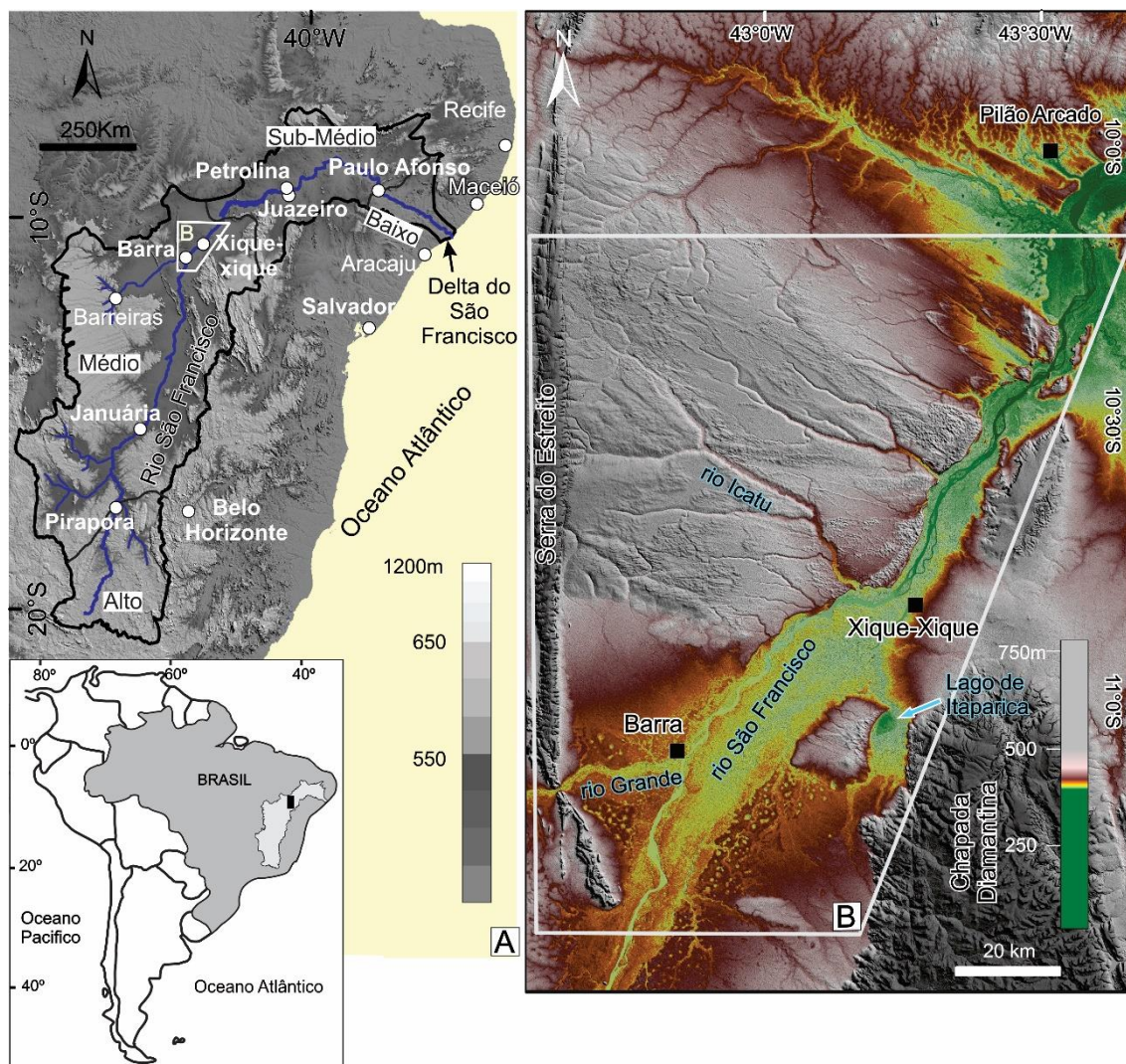


Figura 1.1. A) Localização da área estudada na bacia do rio São Francisco B) Detalhe da área estudada (polígono em branco) - Modelo Digital de elevação (MDE) SRTM (30 m).

As dunas do Xique-Xique também são de grande relevância para os ecossistemas terrestres da zona semiárida do Nordeste do Brasil, com diversidade de *herpetofaunas* (35% das espécies de répteis registradas na Caatinga), incluindo novas espécies de lagartos e cobras (Recoder & Rodrigues, 2020). Esta fauna de répteis apresenta alto nível de endemismo, com várias espécies adaptadas a substratos arenosos (Rodrigues, 1996, 2003). Também é digno de nota a vicariância entre espécies irmãs adaptadas à substratos

arenosos em margens opostas do rio São Francisco. [Rodrigues \(1996\)](#) propõe um modelo em que o rio São Francisco serviu de barreira ecológica para a especiação geográfica na área, com diversos eventos vicariantes ao longo do Plioceno / Pleistoceno Superior ([Recoder & Rodrigues, 2020](#)).

Face ao panorama exposto, esta tese objetivou estudar a geomorfologia e os depósitos sedimentares quaternários tanto do sistema fluvial do médio rio São Francisco, no estado da Bahia, como o sistema eólico de Xique-Xique, que ocorre associado à planície aluvial do mesmo. Para isso, utilizamos abordagem multi-métodos, como sensoriamento remoto, descrição sedimentológica, estratigráfica e pedológica e geocronologia. Para entender a cronologia dos depósitos e a evolução dos eventos geológicos, foi essencial estabelecermos uma cronologia OSL robusta para a área. Este trabalho é o primeiro a tratar de forma integrada a dinâmica eólica do campo de dunas de Xique-Xique com a dinâmica fluvial do rio São Francisco. Também apresentamos dados e discussões que contribuem para o conhecimento da dinâmica de grandes rios continentais, da dinâmica de interação flúvio-eólica em campos eólicos continentais e trazemos novos dados de como esses sistemas continentais respondem às mudanças climáticas regionais.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÃO

Esta tese constitui o primeiro estudo sobre os depósitos aluviais quaternários na planície do médio rio São Francisco. Com os registros sedimentológicos, estratigráficos, geocronológicos e geomorfológicos foi possível reconhecer mudanças no padrão do rio São Francisco em alta frequência (~100 ka). Apesar da pouca espessura dos depósitos sedimentares dos terraços (na ordem de 10 a 20 m), a complexa história geomorfológica e cronológica encerrada nestes depósitos garantem ao rio São Francisco papel de destaque e interesse para futuros trabalhos geomorfológicos fluviais. Destaca-se o interesse de continuidade de estudos nos terraços altos, pois as características geomorfológicas deste terraço são reconhecidas em ampla área na planície do médio rio São Francisco, a montante da área aqui tratada. Os depósitos deste terraço também apresentam potencial de registrarem idades mais antigas, pois devido a limitação do método cronológico utilizado neste trabalho (OSL em quartzo) obtivemos idades mínimas para a unidade.

A área estudada também apresenta grande potencial de trazer novos dados quanto as repostas sedimentares frente as mudanças climáticas, pois no mesmo local temos dois grandes sistemas (fluvial e eólico) interagindo e respondendo de forma diferente aos gatilhos ambientais, principalmente de precipitação. Enquanto concluímos que as fases de sedimentação e incisão fluvial do rio São Francisco estão mais relacionadas às mudanças climáticas na cabeceira deste grande rio, os depósitos eólicos respondem de forma mais complexa ao clima. As mudanças de precipitação na área estudada foram importantes principalmente para o processo de estabilização por vegetação das dunas, em especial no úmido HS1. Contudo, os momentos de atividade das dunas foram condicionados pelas mudanças de disponibilidade de sedimentos fluviais. Assim, os eventos eólicos estão intimamente relacionados com os eventos de incisão/deposição fluvial na área, conferindo um excepcional caso de interação flúvio-eólica no Quaternário do Brasil.

A relação íntima entre disponibilidade de sedimentos e atividade eólica observada no campo eólico de Xique-Xique torna a região sensível ao impacto humano, pois a remoção da vegetação das dunas estabilizadas ou dos depósitos fluviais poderia acarretar nova fase de atividade dunar. Muitas comunidades locais estão estabelecidas próximas ou sobre as dunas estabilizadas, sendo diretamente impactadas caso as dunas voltem a migrar.

O método OSL, usado pela primeira vez nos depósitos sedimentares eólicos e

fluviais do médio rio São Francisco, demonstrou bons resultados, em especial para os depósitos fluviais (dispersão baixa, grão muito luminescente e bons parâmetros de recuperação e reciclagem). Apesar da quantidade robusta de datações OSL, nossos dados apresentam baixa resolução temporal, permitindo interpretações de tendências gerais, com variações de escala orbital. E os dados paleoambientais regionais para o interior do nordeste brasileiro são ainda escassos, havendo a necessidade de novos dados para o refinamento dos modelos aqui propostos.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ab'Sáber, A., 2006. O paleodeserto de Xique-Xique. *Estud. Avançados* 20, 301–308.
- Aitken, M.J., 1985. *Thermoluminescence dating*. Academic Press, London.
- Al-Masrahy, M.A., Mountney, N.P., 2015. A classification scheme for fluvial–aeolian system interaction in desert-margin settings. *Aeolian Res.* 17, 67–88.
- Almeida, F.F., 1977. O Cráton São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 7, n. 4, p. 348-367.
- Alvares, C.A., Stape, J.L., Sentelhas, P.C., de Moraes, G., Leonardo, J., Sparovek, G., 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorol. Zeitschrift* 22, 711–728.
- Amarante, O.A.C., Brower, M., Zack, J., Sá, A.L., 2001. *Atlas do potencial eólico brasileiro*. Brasília: Ministério de Minas e Energia.
- Arnold L.J., Roberts R.G., 2009. Stochastic modeling of multi-grain equivalent dose (De) distributions: implications for OSL dating of sediment mixtures. *Quaternary Research*, 55:159-167.
- Arz, H.W., Pätzold, J., Wefer, G., 1998. Correlated millennial-scale changes in surface hydrography and terrigenous sediment yield inferred from last-glacial marine deposits off northeastern Brazil. *Quat. Res.* 50, 157–166.
- Arz, H.W., Pätzold, J., Wefer, G., 1999. Climatic changes during the last deglaciation recorded in sediment cores from the northeastern Brazilian Continental Margin. *Geo-Marine Lett.* 19, 209–218.
- Ashkenazy, Y., Yizhaq, H., Tsoar, H., 2012. Sand dune mobility under climate change in the Kalahari and Australian deserts. *Clim. Change* 112, 901–923.
- Aufdenkampe, A.K., Mayorga, E., Raymond, P.A., Melack, J.M., Doney, S.C., Alin, S.R., Aalto, R.E., Yoo, K. 2011. Riverine coupling of biogeochemical cycles between land, oceans, and atmosphere. *Frontiers in Ecology and the Environment* 9(11), 53-60.
- Bailey, S.D., Bristow, C.S., 2004. Migration of parabolic dunes at Aberffraw, Anglesey, north Wales. *Geomorphology* 59, 165–174.
- Barbosa, L.M., Dominguez, J.M.L., 2004. Coastal dune fields at the São Francisco River strandplain, northeastern Brazil: morphology and environmental controls. *Earth Surf. Process. Landforms* 29, 443–456.

- Barreto, A.M.F., 1996. Interpretação paleoambiental do sistema de dunas fixadas do médio rio São Francisco, Bahia. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- Barreto, A.M.F., Suguio, K., Oliveira, P.E. de, Tatumi, S.H., 2002. Campo de dunas inativas do médio Rio São Francisco, BA: marcante registro de ambiente desértico do quaternário brasileiro. *Sítios geológicos e paleontológicos do Bras.*
- Barreto, A.M.F., Suguio, K., 1993. Considerações sobre a idade e a paleogeografia das paleodunas do médio Rio São Francisco, Bahia, in: Congresso Da Associação Brasileira de Estudos Do Quaternário-ABEQUA, IV, São Paulo. Resumos Expandidos. p. 11.
- Bartorelli, A., Assine, M.L., Pires Neto, A., Ab'Sáber, A., 2010. Dunas do Jalapão: uma paisagem insólita no interior do Brasil, in: A Obra de Aziz Nacib Ab'Sáber. pp. 570–582.
- Behling, H., 2003. Late glacial and Holocene vegetation, climate and fire history inferred from Lagoa Nova in the southeastern Brazilian lowland. *Veg. Hist. Archaeobot.* 12, 263–270.
- Behling, H., 1995. A high resolution Holocene pollen record from Lago do Pires, SE Brazil: vegetation, climate and fire history. *J. Paleolimnol.* 14, 253–268.
- Behling, H., Arz, H. W., Pätzold, J., & Wefer, G., 2000. Late Quaternary vegetational and climate dynamics in northeastern Brazil, inferences from marine core GeoB 3104-1. *Quaternary Science Reviews*, 19(10), 981-994.
- Berger, A., Loutre, M.-F., 1991. Insolation values for the climate of the last 10 million years. *Quat. Sci. Rev.* 10, 297–317.
- Bernal, J. P., Cruz, F. W., Stríkis, N. M., Wang, X., Deininger, M., Catunda, M. C. A., ... & Auler, A. S., 2016. High-resolution Holocene South American monsoon history recorded by a speleothem from Botuverá Cave, Brazil. *Earth and Planetary Science Letters*, 450, 186-196.
- Bittencourt, A.C. da S.P., Dominguez, J.M.L., Martin, L., Silva, I.R., 2005. Longshore transport on the northeastern Brazilian coast and implications to the location of large scale accumulative and erosive zones: An overview. *Mar. Geol.* 219, 219–234.
- Blumer, B.E., Arbogast, A.F., Forman, S.L., 2012. The OSL chronology of eolian sand deposition in a perched dune field along the northwestern shore of Lower Michigan. *Quat. Res.* 77, 445–455.
- Bullard, J.E., McTainsh, G.H., 2003. Aeolian–fluvial interactions in dryland environments: scales, concepts and Australia case study. *Prog. Phys. Geogr.* 27, 471–501.

- Cabral, C.J., 2014. Caracterização paleoclimática e paleoambiental do campo de dunas de Petrolina em Pernambuco: um subsídio para a reconstituição do submédio São Francisco. Universidade Federal de Pernambuco.
- Cabral, C.J., Santo, L.S., Santos, L.D.J., Silva, O.G., Corrêa, A.C.B., 2016. Classificação Ecodinâmica no campo de dunas de Petrolina-PE. *Rev. Geociências do Nord.* 2, 11–19.
- Camargo, O.A., Moniz, A.C., Jorge, J.A., Valadares, J., 2009. Métodos de Análise Química, Mineralógica e Física de Solos do Instituto Agrônomo de Campinas.
- Campos, J.E.G., Dardenne, M.A. 1997. Estratigrafia e Sedimentação da Bacia Sanfranciscana: uma revisão. *Revista Brasileira de Geociências*, 27: 269-282.
- Campos, M.C., Chiessi, C.M., Prange, M., Mulitza, S., Kuhnert, H., Paul, A., Venancio, I.M., Albuquerque, A.L.S., Cruz, F.W., Bahr, A., 2019. A new mechanism for millennial scale positive precipitation anomalies over tropical South America. *Quat. Sci. Rev.* 225, 105990.
- Carneiro Filho, A., Schwartz, D., Tatumi, S.H., Rosique, T., 2002. Amazonian paleodunes provide evidence for drier climate phases during the Late Pleistocene–Holocene. *Quat. Res.* 58, 205–209.
- Cassino, R.F., Ledru, M.-P., de Almeida Santos, R., Favier, C., 2020. Vegetation and fire variability in the central Cerrados (Brazil) during the Pleistocene-Holocene transition was influenced by oscillations in the SASM boundary belt. *Quat. Sci. Rev.* 232, 106209.
- Chase, B., 2009. Evaluating the use of dune sediments as a proxy for palaeo-aridity: a southern African case study. *Earth-Science Rev.* 93, 31–45.
- Chaves, R.R., Cavalcanti, I.F.A., 2001. Atmospheric circulation features associated with rainfall variability over southern Northeast Brazil. *Mon. Weather Rev.* 129, 2614–2626.
- Cheng, H., Sinha, A., Cruz, F.W., Wang, X., Edwards, R.L., d’Horta, F.M., Ribas, C.C., Vuille, M., Stott, L.D., Auler, A.S., 2013. Climate change patterns in Amazonia and biodiversity. *Nat. Commun.* 4, 1–6.
- Cohen, T.J., Nanson, G.C., Larsen, J.R., Jones, B.G., Price, D.M., Coleman, M., & Pietsch, T.J., 2010. Late Quaternary aeolian and fluvial interactions on the Cooper Creek Fan and the association between linear and source-bordering dunes, Strzelecki Desert, Australia. *Quaternary Science Reviews*, 29(3-4), 455-471.
- Cooper, A., Turney, C.S.M., Palmer, J., Hogg, A., McGlone, M., Wilmshurst, J.,... & Zech,

- R., 2021. A global environmental crisis 42,000 years ago. *Science*. 371 (6531), 811-818.
- Cruz, F.W., Vuille, M., Burns, S.J., Wang, X., Cheng, H., Werner, M., Edwards, R.L., Karmann, I., Auler, A.S., Nguyen, H., 2009. Orbitally driven east–west antiphasing of South American precipitation. *Nat. Geosci.* 2, 210–214.
- Diniz, J.A.O., de Lima, J.B., 2008. O Aquífero de dunas da região do médio São Francisco - BA. *Águas Subterrâneas*.
- Dominguez, J.M.L., 1996. The São Francisco strandplain: a paradigm for wave-dominated deltas? *Geol. Soc. London, Spec. Publ.* 117, 217–231. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1996.117.01.13>
- Dominguez, J.M.L., Bittencourt, A.C.S.P., Martin, L., 1983. O papel da deriva litorânea de sedimentos arenosos na construção das planícies costeiras associadas às desembocaduras dos rios São Francisco (SE-AL), Jequitinhonha (BA), Doce (ES) e Paraíba do Sul (RJ). *Rev. Bras. Geociências* 13, 98–105.
- Ewing, R.C., Kocurek, G., Lake, LW, 2006. Pattern analysis of dune-field parameters. *Earth Surf. Process. Landforms J. Br. Geomorphol. Res. Gr.* 31, 1176–1191.
- Ferreira, B., Correa, A.C. de B., Barreto, A.M.F., 2013. Depósitos eólicos inativos do sub-médio São Francisco, evidências de atividade eólica durante o Pleistoceno, Pernambuco, nordeste do Brasil. *Soc. Nat.* 25, 363–378.
- Ferreira, J.Q., 2021. Changes in hydroclimate and vegetation in the São Francisco river drainage basin during the last 45000 years. Tese de Mestrado, Universidade de São Paulo.
- Fontes, L.C. da S., 2015. Da fonte à bacia: interação continente-oceano no sistema sedimentar Rio São Francisco, Brasil.
- Forman, S.L., Oglesby, R., Webb, R., 2001. Patterns of Holocene dune activity on the great plains of North America: megadroughts and climate links. *Global and Planetary Change* 29, 1–29.
- Galbraith, R.F., Roberts, R.G., Laslett, G.M., Yoshida, H., Olley, J.M., 1999. Optical dating of single and multiple grains of quartz from Jinmium rock shelter, northern Australia: Part I, experimental design and statistical models. *Archaeometry* 41, 339–364.
- Giannini, P.C.F., Assine, M.L., Barbosa, L.M., Barreto, A.M.F., Carvalho, A.M., Claudino-Sales, V., Maia, L.P., Martinho, C.T., Peulvast, J.P., Sawakuchi, A.O., 2005. Dunas e paleodunas eólicas costeiras e interiores. *Quaternário do Bras. (CRG Souza, K. Suguio,*

- AMS Oliveira PE Oliveira, eds.). *Holos, Ribeirão Preto* 235–257.
- Giannini, P.C.F., Sawakuchi, A.O., Martinho, C.T., Tatumi, S.H., 2007. Eolian depositional episodes controlled by Late Quaternary relative sea level changes on the Imbituba–Laguna coast (southern Brazil). *Mar. Geol.* 237, 143–168.
- Giannini, P.C.F., Sawakuchi, A.O., Mendes, V.R., Zular, A., Andrade, H.A. de A., Martinho, C.T., Guedes, C.C.F., Nascimento Jr, D.R., Tanaka, A.P.B., Fornari, M., 2014. Morfodinâmica de sistemas eólicos costeiros: um modelo baseado em exemplos do Holocénico brasileiro e seu potencial interpretativo.
- Goudie, A.S., 2004. *Encyclopedia of Geomorphology*. Routledge, 1184 pp.
- Goudie, A., 2011. Parabolic dunes: distribution, form, morphology and change. *Ann. Arid Zone* 50, 1–7.
- Goudie, A.S., Wells, G.L., 1995. The nature, distribution and formation of pans in arid zones. *Earth-Science Rev.* 38, 1–69.
- Guedes, C.C.F., Giannini, P.C.F., Sawakuchi, A.O., DeWitt, R., de Aguiar, V.Â.P., 2017. Weakening of northeast trade winds during the Heinrich stadial 1 event recorded by dune field stabilization in tropical Brazil. *Quat. Res.* 88, 369–381.
- Guérin, G., Mercier, N., Adamic, G., 2011. Dose-rate conversion factors: update. *Anc. TL* 29, 5–8.
- Hansen, E.C., Fisher, T.G., Arbogast, A.F., Bateman, M.D., 2010. Geomorphic history of low-perched, transgressive dune complexes along the southeastern shore of Lake Michigan. *Aeolian Res.* 1, 111–127.
- Hesp, P.A., Giannini, P.C.F., Martinho, C.T., Da Silva, G.M., Neto, N.E.A., 2009. The Holocene barrier systems of the Santa Catarina coast, southern Brazil, in: *Geology and Geomorphology of Holocene Coastal Barriers of Brazil*. Springer, pp. 93–133.
- Hilbert, N.N.; Guedes, C.C.F.; Giannini, P.C.F., 2016. Morphologic and sedimentologic patterns of active aeolian dune-fields on the east coast of Maranhão, northeast Brazil. *Earth Surface Processes and Landforms*, 41: 87-97.
- Hugenholtz, C.H., Wolfe, S.A., 2005. Recent stabilization of active sand dunes on the Canadian prairies and relation to recent climate variations. *Geomorphology* 68, 131–147.
- Hugenholtz, C.H., Wolfe, S.A., Moorman, B.J., 2008. Effects of sand supply on the morphodynamics and stratigraphy of active parabolic dunes, Bigstick Sand Hills,

- southwestern Saskatchewan. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 45(3), 321-335.
- Hugenholtz, C.H., Bender, D., Wolfe, S.A., 2010. Declining sand dune activity in the southern Canadian prairies: Historical context, controls and ecosystem implications. *Aeolian Res.* 2, 71–82.
- Jennings, J.N., 1967. Cliff-top dunes. *Aust. Geogr. Stud.* 5, 40–49.
- Kadlec, J., Kocurek, G., Mohrig, D., Shinde, D. P., Murari, M. K., Varma, V., ... & Singhvi, A. K., 2015. Response of fluvial, aeolian, and lacustrine systems to late Pleistocene to Holocene climate change, Lower Moravian Basin, Czech Republic. *Geomorphology*, 232, 193-208.
- Kelson, J.R., Huntington, K.W., Breecker, D.O., Burgener, L.K., Gallagher, T.M., Hoke, G.D., Petersen, S. V, 2020. A proxy for all seasons? A synthesis of clumped isotope data from Holocene soil carbonates. *Quat. Sci. Rev.* 234, 106259.
- Knighton, D., 1998. *Fluvial Forms and Processes, Fluvial Forms and Processes: A New Perspective*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203784662>
- Knoppers, B., Medeiros, Paulo, R.P., Souza, Weber, F.L., Jennerjahn, T., 2006. The Sao Francisco Estuary, Brazil, in: *Estuaries*. Springer Science & Business Media, p. 51.
- Kocurek, G., 1998. Aeolian system response to external forcing factors—a sequence stratigraphic view of the Saharan region. *Quat. deserts Clim. Chang.* 327–337.
- Kocurek, G.A., Lancaster, N., 1999. Aeolian system sediment state: theory and Mojave Desert Kelso dune field example. *Sedimentology* 46, 505–515.
- Lancaster, N., 1988. Controls of eolian dune size and spacing. *Geology* 16, 972–975.
- Lancaster, N., Wolfe, S., Thomas, D., Bristow, C., Bubbenzer, O., Burrough, S., ... & Zárate, M., 2016. The INQUA dunes atlas chronologic database. *Quaternary International*, 410, 3-10.
- Langford, R.P., 1989. Fluvial-aeolian interactions: Part I, modern systems. *Sedimentology* 36, 1023–1035.
- Langford, R.P., Chan, M.A., 1989. Fluvial-aeolian interactions: Part II, ancient systems. *Sedimentology* 36, 1037–1051.
- Latrubesse, E.M., 2008. Patterns of anabranching channels: The ultimate end-member adjustment of mega rivers. *Geomorphology* 101, 130–145.

- Latrubesse, E M, Stevaux, J.C., Santos, M.L., Assine, M.L., 2005a. Grandes sistemas fluviais: geologia, geomorfologia e paleohidrologia. Quaternário no Bras. (CRG Souza, K. Suguio, AMS Oliveira PE Oliveira, eds.). Ed. Holos, Ribeirão Preto 276–297.
- Latrubesse, Edgardo M, Stevaux, J.C., Sinha, R., 2005b. Tropical rivers. *Geomorphology* 70, 187–206.
- Ledru, M.-P., 1993. Late Quaternary environmental and climatic changes in central Brazil. *Quat. Res. YORK LONDON-ACADEMIC Press.* 39, 90.
- Ledru, M.-P., Braga, P.I.S., Soubiès, F., Fournier, M., Martin, L., Suguio, K., Turcq, B., 1996. The last 50,000 years in the Neotropics (Southern Brazil): evolution of vegetation and climate. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 123, 239–257.
- Ledru, M.P., Ceccantini, G., Gouveia, S.E.M., Lopez-Saez, J.A., Pessenda, L.C.R., Ribeiro, A.S., 2006. Millennial-scale climatic and vegetation changes in a northern Cerrado (northeast, Brazil) since the last glacial maximum. *Quat. Sci. Rev.* 25, 1110e1126. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2005.10.005>.
- Lira, D.R. de, 2017. Mudanças ambientais quaternárias na porção submédica da planície do São Francisco: reconstrução ambiental. *Clio Arqueol.* 32, 107–134.
- Lira, D.R. de, 2014. Evolução geomorfológica e paleoambiental das Bacias do Riacho do Pontal e GI-8 no Sub-Médio São Francisco. Universidade Federal de Pernambuco.
- Lisiecki, L.E., Raymon, M.E., 2005. A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records. *Paleoceanography*, 20.
- Liu, Z., Otto-Bliesner, B. L., He, F., Brady, E. C., Tomas, R., Clark, P. U., et al. 2009. Transient simulation of last deglaciation with a new mechanism for boling-allerod warming. *Science*, 325(5938), 310–314. <https://doi.org/10.1126/science.1171041>
- Magalhães Junior, A.P., Cherem, L.F.S., de Paula Barros, L.F., dos Santos, G.B., 2011. OSL dating of sediments from a mountainous river in southeastern Brazil: Late Cenozoic tectonic and climatic implications. *Geomorphology* 132, 187–194.
- Martinho, C.T.; Giannini, P.C.F.; Sawakuchi, A.O.; Hesp, P.A., 2006. Morphological and depositional facies of transgressive dunefields in the Imbituba-Jaguaruna region, Santa Catarina State, Southern Brazil. *Journal of Coastal Research*, SI39, p.673-677.
- May, J.-H., 2013. Dunes and dunefields in the Bolivian Chaco as potential records of environmental change. *Aeolian Res.* 10, 89–102.

- Mehl, A., Tripaldi, A., & Zárata, M. (2018). Late Quaternary aeolian and fluvial-aeolian deposits from southwestern Pampas of Argentina, southern South America. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 511, 280-297.
- Mendes, V.R.; Giannini, P.C.F.; Guedes, C.C.F.; Dewitt, R.; Andrade, H.A.A., 2015. Central Santa Catarina coastal dunefields chronology and their relation to relative sea level and climatic changes. *Brazilian Journal of Geology*, 45: 79-95.
- Mendes, V.R., Sawakuchi, A.O., M. Chiessi, C., F. Giannini, P.C., Rehfeld, K., Mulitza, S., 2019. Thermoluminescence and optically stimulated luminescence measured in marine sediments indicate precipitation changes over northeastern Brazil. *Paleoceanogr. Paleoclimatology* 34, 1476–1486.
- Merino, E.R., do Nascimento Pupim, F., de Azevedo Macedo, H., Assine, M.L., 2015. Realce e integração de imagens orbitais óticas com dados SRTM para mapeamento e estudo de grandes planícies fluviais: exemplos de aplicação no Pantanal. *Rev. Bras. Geomorfol.* 16.
- Mescolotti, P.C.; Pupim, F.; Ladeira, F.B.; Sawakuchi, A.; Catharina, A.; Assine, M. 2021. Fluvial aggradation and incision in the Brazilian tropical semiarid: climate-controlled landscape evolution of the São Francisco River. *Quaternary Science Reviews*, 263:106977.
- Miall, Andrew D, 2006. How do we identify big rivers? And how big is big? *Sediment. Geol.* 186, 39–50.
- Mix, A.C., Bard, E., Schneider, R., 2001. Environmental processes of the ice age: land, oceans, glaciers (EPILOG). *Quat. Sci. Rev.* 20, 627–657.
- Moraes, L.C. de, Amaral, J. da S., 2001. Diamante de Santo Inácio, Estado da Bahia.
- Mulitza, S., Chiessi, C. M., Schefuß, E., Lippold, J., Wichmann, D., Antz, B., ... & Zhang, Y., 2017. Synchronous and proportional deglacial changes in Atlantic meridional overturning and northeast Brazilian precipitation. *Paleoceanography*, 32(6), 622-633.
- Murray, A.S., Wintle, A.G., 2003. The single aliquot regenerative dose protocol: potential for improvements in reliability. *Radiat. Meas.* 37, 377–381.
- Murray, A.S., Wintle, A.G., 2000. Luminescence dating of quartz using an improved single-aliquot regenerative-dose protocol. *Radiat. Meas.* 32, 57–73.
- Nace, T.E., Baker, P.A., Dwyer, G.S., Silva, C.G., Rigsby, C.A., Burns, S.J., Giosan, L., Ottobliesner, B., Liu, Z., Zhu, J., 2014. The role of North Brazil Current transport in the

paleoclimate of the Brazilian Nordeste margin and paleoceanography of the western tropical Atlantic during the late Quaternary. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 415, 3-13. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2014.05.030>.

- Nazareno, A.G., Dick, C.W., Lohmann, L.G. 2019. A biogeographic barrier test reveals a strong genetic structure for canopy-emergent Amazon tree species. *Scientific Reports* 9, 18602.
- Neiva, A.D.B., Dutras, R.M., Melo, S.R., Guedes, V.G., Cabrera, A.A.M., Almeida, W.G., Braz, R.O., 2017. Atlas do potencial eólico brasileiro: simulações 2013. Rio de Janeiro: Cepel.
- Oliveira, P.E., Barreto, A.M.F., Suguio, K., 1999. Late Pleistocene/Holocene climatic and vegetational history of the Brazilian Caatinga: the fossil dunes of the middle São Francisco River. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 152, 319–337.
- Oliveira, S.C., Pupim, F.N., Stevaux, J.C., Assine, M.L., 2019. Luminescence chronology of terrace development in the Upper Paraná River, southeast Brazil. *Front. Earth Sci.* 7, 200.
- Parizzi, M.G., Salgado-Labouriau, M.L., Kohler, H.C., 1998. Genesis and environmental history of Lagoa Santa, southeastern Brazil. *The Holocene* 8, 311–321.
- Pereira, S.B., Pruski, F.F., Silva, D.D. da, Ramos, M.M., 2007. Estudo do comportamento hidrológico do Rio São Francisco e seus principais afluentes. *Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambient.* 11, 615–622.
- Pinaya, J.L.D., Cruz, F.W., Ceccantini, G.C.T., Corrêa, P.L.P., Pitman, N., Vemado, F., Maria del Carmen, S.L., Pereira Filho, A.J., Grohmann, C.H., Chiessi, C.M., 2019. Brazilian montane rainforest expansion induced by Heinrich Stadial 1 event. *Sci. Rep.* 9, 1–14.
- Prescott, J.R., Hutton, J.T., 1994. Cosmic ray contributions to dose rates for luminescence and ESR dating: large depths and long-term time variations. *Radiat. Meas.* 23, 497–500.
- Pye, K., 1993. Late Quaternary development of coastal parabolic megadune complexes in northeastern Australia, in: *Aeolian Sediments. Ancient and Modern*. Blackwell Scientific Publications, pp. 23–44.
- Pye, K., Tsoar, H., 1990. *Aeolian sand and sand dunes*. Unwin Hyman, London, UK.
- Pye, K., Tsoar, H., 2009. Aeolian bed forms, in: *Aeolian Sand and Sand Dunes*. Springer, pp. 175–253.
- Rasmussen, S.O., Bigler, M., Blockley, S.P., Blunier, T., Buchardt, S.L., Clausen, H.B.,

- Cvijanovic, I., Dahl-Jensen, D., Johnsen, S.J., Fischer, H., 2014. A stratigraphic framework for abrupt climatic changes during the Last Glacial period based on three synchronized Greenland ice-core records: refining and extending the INTIMATE event stratigraphy. *Quat. Sci. Rev.* 106, 14–28.
- Recoder, R.S., Rodrigues, M.T., 2020. Diversification Processes in Lizards and Snakes from the Middle São Francisco River Dune Region, Brazil, in: *Neotropical Diversification: Patterns and Processes*. Springer, pp. 713–740.
- Retallack, G.J., 2001. *Soils of the past*. Oxford, Blackwell, 404p.
- Rodrigues, F.C.G., Giannini, P.C.F., Fornari, M., Sawakuchi, A.O., 2020. Deglacial climate and relative sea level changes forced the shift from eolian sandsheets to dunefields in southern Brazilian coast. *Geomorphology* 107252.
- Rodrigues, M.T., 1996. Lizards, snakes, and amphisbaenians from the quaternary sand dunes of the middle Rio São Francisco, Bahia, Brazil. *J. Herpetol.* 513–523.
- Rodrigues, M.T., 2003. Herpetofauna da caatinga. *Ecol. e Conserv. da Caatinga* 1, 181–236.
- Rodrigues-Filho, S., Behling, H., Irion, G., Müller, G., 2002. Evidence for lake formation as a response to an inferred Holocene climatic transition in Brazil. *Quat. Res.* 57, 131–137.
- Rodríguez-Zorro, P.A., Ledru, M.-P., Bard, E., Aquino-Alfonso, O., Camejo, A., Daniau, A.-L., Favier, C., Garcia, M., Mineli, T.D., Rostek, F., 2020. Shut down of the South American summer monsoon during the penultimate glacial. *Sci. Rep.* 10, 1–11.
- Roskin, J., Porat, N., Tsoar, H., Blumberg, D. G., & Zander, A. M., 2011a. Age, origin and climatic controls on vegetated linear dunes in the northwestern Negev Desert (Israel). *Quaternary Science Reviews*, 30(13-14), 1649-1674.
- Roskin, J., Tsoar, H., Porat, N., & Blumberg, D. G., 2011b. Palaeoclimate interpretations of Late Pleistocene vegetated linear dune mobilization episodes: evidence from the northwestern Negev dunefield, Israel. *Quaternary Science Reviews*, 30(23-24), 3364-3380.
- Sanchez Goñi, M.F., Harrison, S.P., 2010. Millennial-scale climate variability and vegetation changes during the Last Glacial: Concepts and terminology. *Quat. Sci. Rev.* 29, 2823–2827.
- Santos, A.Á.B., Camargo, O., Back, A., Silva, F., Catani, F., Estante, F., Lima, G., Violato, G., Araújo, J., Andrade, P., 2013. *Atlas eólico Bahia*.

- Santos, G.B., Castro, P. de T.A., 2016. Sedimentological characteristics and geochemistry of lake waters of the Rio Grande basin, west of Bahia State (Brazil). *Int. J. River Basin Manag.* 14, 431–440.
- Santos, H. de A., dos Santos, P.P., Kenji, D.O.L., 2012. Changes in the flood regime of São Francisco River (Brazil) from 1940 to 2006. *Reg. Environ. Chang.* 12, 123–132.
- Santos, L.A., Latrubesse, E.M., 2021. Aeolian mobility in the Middle São Francisco Dune Field, northeast Brazil, as a response to Caatinga's droughts and land-use changes. *Geomorphology*; S0169-555X(21)00348-2. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107940>
- Schobbenhaus, C. (Ed.). 1984. *Geologia do Brasil: texto explicativo do mapa geológico do Brasil e da área oceânica adjacente incluindo depósito minerais*, escala 1: 2 5000 000. Divisão de Geologia e Mineralogia, Departamento Nacional da Produção Mineral.
- Schoeneberger, P.J., Wysocki, D.A., Benham, E.C., 2012. *Field book for describing and sampling soils*. Government Printing Office.
- Silva, B.C., Clarke, R. 2004. Análise estatística de chuvas intensas na bacia do rio São Francisco. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 19(3), 265-272.
- Singh, A., Thomsen, K.J., Sinha, R., Buylaert, J-P., Carter, A., Mark, D.F., Mason, P.J., Densmore, A.L., Murray, A.S., Jain, M., Paul, D., Gupta, S. 2017. Counter-intuitive influence of Himalayan river morphodynamics on Indus Civilisation urban settlements. *Nature Communications* 8,1617.
- Smedley, R.K., Duller, G.A.T, Rufer, D., Utley, J.E.P. 2020. Empirical assessment of beta dose heterogeneity in sediments: Implications for luminescence dating. *Quaternary Geochronology* 56, 101052.
- Soares, P.C., Fiori, A.P., 1976. Lógica e sistemática na análise e interpretação de fotografias aéreas em geologia. *Notícia Geomorfológica* 16, 71–104.
- Stone, A.E.C., Thomas, D.S.G., 2008. Linear dune accumulation chronologies from the southwest Kalahari, Namibia: challenges of reconstructing late Quaternary palaeoenvironments from aeolian landforms. *Quat. Sci. Rev.* 27, 1667–1681.
- Stríkis, N.M., Cruz, F.W., Cheng, H., Karmann, I., Edwards, R.L., Vuille, M., Wang, X., de Paula, M.S., Novello, V.F., Auler, A.S., 2011. Abrupt variations in South American monsoon rainfall during the Holocene based on a speleothem record from central-eastern

Brazil. *Geology* 39, 1075–1078.

- Stríkis, N.M., Chiessi, C.M., Cruz, F.W., Vuille, M., Cheng, H., de Souza Barreto, E.A., Mollenhauer, G., Kasten, S., Karmann, I., Edwards, R.L., 2015. Timing and structure of Mega-SACZ events during Heinrich Stadial 1. *Geophys. Res. Lett.* 42, 5477–5484A.
- Stríkis, N.M., Cruz, F.W., Barreto, E.A.S., Naughton, F., Vuille, M., Cheng, H., Voelker, A.H.L., Zhang, H., Karmann, I., Edwards, R.L., 2018. South American monsoon response to iceberg discharge in the North Atlantic. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 115, 3788–3793.
- Sun, J., Muhs, D.R., 2007. Dune fields: mid-latitudes. S.A. Elias (Ed.), *Encyclopedia of Quaternary Science* (second ed.), Elsevier, Amsterdam, 606–622.
- Tamura, T., Nguyen, V.L., Ta, T.K.O., Bateman, M.D., Gugliotta, M., Anthony, E.J., Nakashima, R., Saito, Y. 2020. Long-term sediment decline causes ongoing shrinkage of the Mekong megadelta, Vietnam. *Scientific Reports* 10, 8085.
- Tatumi, S.H., Nagatomo, T., Sengupta, D., Watanabe, S., Barreto, A.M.F., Suguio, K., 1998. Thermoluminescence dating of eolian sediments from São Francisco River, State of Bahia, Brazil. *Radiat. Eff. defects solids* 146, 285–295.
- Teeuw, R.M., Rhodes, E.J., 2004. Aeolian activity in northern Amazonia: optical dating of Late Pleistocene and Holocene palaeodunes. *J. Quat. Sci. Publ. Quat. Res. Assoc.* 19, 49–54.
- Thom, G., Xue, A.T., Sawakuchi, A.O., Ribas, C.C., Hickerson, M.J., Aleixo, A., Miaky, C. 2020. Quaternary climate changes as speciation drivers in the Amazon floodplains. *Science Advances* 6, eaax4718.
- Thomas, D.S.G., 2013. Reconstructing paleoenvironments and palaeoclimates in drylands: what can landform analysis contribute? *Earth Surf. Process. Landforms* 38, 3–16.
- Thomas, D.S.G., Wiggs, G.F.S., 2008. Aeolian system responses to global change: challenges of scale, process and temporal integration. *Earth Surf. Process. Landforms J. Br. Geomorphol. Res. Gr.* 33, 1396–1418.
- Tripaldi, A., Zárata, M.A., 2016. A review of Late Quaternary inland dune systems of South America East of the Andes. *Quat. Int.* 410, 96–110.
- Tripaldi, A., Mehl, A., Zárata, M.A., 2018. Parabolic megadunes in a subtropical Quaternary inland dune field, southwestern Pampas, Argentina. *Geomorphology* 321, 103–116.
- Tsoar, H., 2005. Sand dunes mobility and stability in relation to climate. *Phys. A Stat. Mech.*

- its Applications, 357, 50–56.
- Tsoar, H., 2008. Land Use and its Effect on the Mobilization and Stabilization of the NW Negev Sand Dunes.
- Tsoar, H., Blumberg, D.G., 2002. Formation of parabolic dunes from barchan and transverse dunes along Israel's Mediterranean coast. *Earth Surface Processes and Landforms*, 27: 1147–1161. doi:10.1002/esp.417.
- Tsoar, H., Levin, N., Porat, N., Maia, L.P., Herrmann, H.J., Tatumi, S.H., Claudino-Sales, V., 2009. The effect of climate change on the mobility and stability of coastal sand dunes in Ceará State (NE Brazil). *Quat. Res.* 71, 217–226.
- Tucker, G.E., Slingerland, R., 1997. Drainage basin responses to climate change. *Water Resour. Res.* 33, 2031–2047. <https://doi.org/10.1029/97WR00409>
- Veneziani, P., Anjos, C.E., 1983. Metodologia de interpretação de dados de sensoriamento remoto e aplicações em geologia. São José dos Campos, INPE, 1982. 61p. INPE-2227-MD/014.
- Wang, X., Auler, A.S., Edwards, R.L., Cheng, H., Cristalli, P.S., Smart, P.L., Richards, D.A., Shen, C.-C., 2004. Wet periods in northeastern Brazil over the past 210 kyr linked to distant climate anomalies. *Nature* 432, 740–743.
- Wang, X., Auler, A.S., Edwards, R.L., Cheng, H., Ito, E., Solheid, M., 2006. Interhemispheric anti-phasing of rainfall during the last glacial period. *Quat. Sci. Rev.* 25, 3391–3403.
- Wang, X., Auler, A.S., Edwards, R.L., Cheng, H., Ito, E., Wang, Y., Kong, X., Solheid, M., 2007. Millennial-scale precipitation changes in southern Brazil over the past 90,000 years. *Geophys. Res. Lett.* 34.
- Warren, A., Allison, D., 1998. The palaeoenvironmental significance of dune size hierarchies. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 137, 289–303.
- Wasson, R.J., Rajagury, S.N., Misra, V.N., Agrawal, D.P., Dhir, R.P., 1983. Geomorphology, late Quaternary stratigraphy and paleoclimatology of the Thar dunefield. *Zeitschrift für Geomorphol. Suppl.* 45, 117–151.
- Wasson, R.J., 1984. Late Quaternary palaeoenvironments in the desert dunefields of Australia, in: *Late Cainozoic Palaeoclimates of the Southern Hemisphere. International Symposium Held by the South African Society for Quaternary Research; Swaziland.* pp. 419–432.
- Wilson, I., 1972. Aeolian bedforms—their development and origins. *Sedimentology* 19, 173–

210.

- Wolfe, S.A., 2007. Dune fields: High Latitudes. S.A. Elias (Ed.), *Encyclopedia of Quaternary Science* (second ed.), Elsevier, Amsterdam, 599-607.
- Yan, N., Baas, A.C., 2015. Parabolic dunes and their transformations under environmental and climatic changes: Towards a conceptual framework for understanding and prediction. *Global and Planetary Change*, 124, 123-148.
- Yizhaq, H., Ashkenazy, Y., Tsoar, H., 2009. Sand dune dynamics and climate change: A modeling approach. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 114(F1).
- Zaprowski, B.J., 2005. Climatic influences on profile concavity and river incision. *J. Geophys. Res.* 110, F03004. <https://doi.org/10.1029/2004JF000138>
- Zhang Y, Chiessi CM, Mulitza S, Zabel M, Trindade RIF da, Hollanda MHBM de, Dantas EL, Govin A, Tiedemann R, Wefer G., 2015. Origin of increased terrigenous supply to the NE South American continental margin during Heinrich Stadial 1 and the Younger Dryas [Internet]. *Earth and Planetary Science Letters*. 432 493-500. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2015.09.054>
- Zular, A., Utida, G., Cruz, F. W., Sawakuchi, A. O., Wang, H., Bicego, M., ... & Mendes, V. R., 2018. The effects of mid-Holocene fluvio-eolian interplay and coastal dynamics on the formation of dune-dammed lakes in NE Brazil. *Quaternary Science Reviews*, 196, 137-153.
- Zular, A., Sawakuchi, A.O., Chiessi, C.M., d'Horta, F.M., Cruz, F.W., Demattê, J.A.M., Ribas, C.C., Hartmann, G.A., Giannini, P.C.F., Soares, E.A.A., 2019. The role of abrupt climate change in the formation of an open vegetation enclave in northern Amazonia during the late Quaternary. *Glob. Planet. Change* 172, 140–149.
- Zular, A., Sawakuchi, A.O., Wang, H., Guedes, C.C.F., Hartmann, G.A., Jaqueto, P.F., Chiessi, C.M., Cruz, F.W., Giannini, P.C.F., Daros, V.K., 2020. The response of a dune succession from Lençóis Maranhenses, NE Brazil, to climate changes between MIS 3 and MIS 2. *Quat. Int.* 537, 97–111.