UMA ANÁLISE MULTIDECADAL POR SENSORIAMENTO REMOTO DA VARIABILIDADE DA UMIDADE DO SOLO NAS REGIÕES HIDROGRÁFICAS BRASILEIRAS E SEU ACOPLAMENTO AO ENSO ENTRE 1991-2023

Soil moisture variability in Brazilian hydrographic regions and its ENSO coupling: a multidecadal remote-sensing analysis (1991-2023)

Wagner Cirilo Rodrigues [1]; Fábio Farias Pereira [2]

RESUMO

A umidade do solo desempenha papel central no balanço hídrico das bacias e atua como variável integradora entre o forçante climático e a resposta hidrológica subsuperficial. Neste trabalho apresenta-se uma caracterização multidecadal (1991-2023) da variabilidade mensal da umidade do solo nas doze regiões hidrográficas brasileiras (Resolução CNRH 32/2003), utilizando o produto ESA CCI Soil Moisture v08.1 (combinado ativo+passivo, ~25 km), complementado pelo TerraClimate para o sinal de zona radicular. O acoplamento com o Índice Oceânico do Niño (ONI) é quantificado por análise de correlação defasada (lag 0-12 meses), seguida de composição de anos canônicos para os eventos El Niño 1997-98, 2015-16 e 2023-24, e La Niña 1998-2000, 2010-11 e 2020-22. Identifica-se um sinal de teleconexão coerente e estatisticamente significativo: bacias do Norte e Nordeste apresentam defasagem ótima entre 3 e 5 meses com correlação negativa (r entre -0,55 e -0,79), enquanto bacias do Sul mostram defasagem de 1-3 meses com correlação positiva (r entre +0,52 e +0,64). A modulação sazonal indica resposta mais intensa nos meses subsequentes à estação chuvosa local. Os resultados quantificam, em escala nacional e por região hidrográfica, o papel da umidade do solo como variável integradora do sinal ENSO sobre a hidrologia brasileira, com implicações diretas para o monitoramento de recursos hídricos no semiárido nordestino.

Palavras-Chave – *Umidade do solo; ENSO; Regiões hidrográficas; Sensoriamento remoto; Semiárido; Teleconexão.*

ABSTRACT

Soil moisture plays a central role in basin water balance and acts as the integrating variable between climate forcing and subsurface hydrological response. We present a multidecadal characterization (1991-2023) of monthly soil moisture variability across the twelve Brazilian hydrographic regions (CNRH Resolution 32/2003), using ESA CCI Soil Moisture v08.1 (combined active+passive, ~25 km), complemented by TerraClimate for the root-zone signal. ENSO coupling is quantified through lagged correlation analysis (lag 0-12 months) and composite analysis of canonical events: El Niño 1997-98, 2015-16, 2023-24 and La Niña 1998-2000, 2010-11, 2020-22. A coherent and statistically significant teleconnection signal emerges: northern and northeastern basins exhibit optimal lag between 3-5 months with negative correlation (r from -0.55 to -0.79), while southern basins show lag 1-3 months with positive correlation (r from +0.52 to +0.64). Seasonal

[1]) Universidade Federal de Alagoas (UFAL), Avenida Lourival Melo Mota, S/N - Tabuleiro do Martins, CEP 57072-970; (082)9 96002430; wagner.rodrigues@ceca.ufal.br
[2]) Universidade Federal de Alagoas (UFAL), Avenida Lourival Melo Mota, S/N - Tabuleiro do Martins, CEP 57072-970, (082)9 8853-3453; fabio.pereira@ceca.ufal.br

modulation indicates response intensifies in months following the local rainy season. Results quantify, at the national scale and by hydrographic region, the role of soil moisture as the integrating variable of the ENSO signal upon Brazilian hydrology, with direct implications for semiarid Northeast water resource monitoring.

Keywords – *Soil moisture; ENSO; Hydrographic regions; Remote sensing; Semiarid; Teleconnection.*

1. INTRODUÇÃO

A variabilidade interanual do clima na América do Sul é dominada, em primeira ordem, pelas teleconexões associadas ao El Niño-Oscilação Sul (ENSO). No Brasil, esse sinal manifesta-se com padrão regional bem caracterizado: anos de El Niño tendem a produzir déficit pluvial sobre o Nordeste e a Amazônia oriental, com excedente pluvial no Sul; anos de La Niña apresentam padrão aproximadamente oposto, com intensificação da estação chuvosa no Norte e Nordeste e estiagens no Sul (Grimm, 2003; Cai et al., 2020). Esse padrão tem implicações diretas para o setor hidroenergético, que depende criticamente da Energia Natural Afluente (ENA) gerada nas bacias contribuintes dos subsistemas elétricos (ONS, 2022).

A maior parte da literatura de teleconexões ENSO-Brasil concentra-se na precipitação como variável-resposta. Entretanto, a umidade do solo apresenta vantagens metodológicas importantes para o estudo da resposta hidrológica de bacias: (i) integra o sinal pluvial sobre janelas de dias a meses, atenuando ruído de alta frequência; (ii) acopla-se diretamente ao escoamento de base via processos de drenagem profunda, fornecendo memória ao sistema hidrológico; e (iii) constitui uma das principais variáveis-estado do balanço hídrico, conectando precipitação a vazões com defasagem característica determinada por propriedades pedológicas e topográficas (Koster et al., 2010; Albergel et al., 2018).

Avanços recentes em produtos de sensoriamento remoto de umidade do solo, em particular o ESA CCI Soil Moisture (Dorigo et al., 2017; Gruber et al., 2019), tornaram viáveis análises multidecadais consistentes em escala continental. O produto combina retrievals de múltiplos sensores ativos e passivos desde 1978, com qualidade homogênea desde meados dos anos 1990. Paralelamente, o produto TerraClimate (Abatzoglou et al., 2018) fornece estimativa de umidade do solo de zona radicular baseada em balanço hídrico mensal a 4 km, complementando o sinal observacional do CCI. Para análises basin-scale, a disponibilidade desses produtos no Google Earth Engine (Gorelick et al., 2017) tornou tratável o processamento sistemático.

Apesar desses avanços, a caracterização do acoplamento entre ENSO e umidade do solo nas regiões hidrográficas brasileiras permanece fragmentada. Estudos existentes concentram-se ou em sub-regiões específicas, ou em produtos curtos (SMAP, 2015-presente), ou em variáveis derivadas (anomalia padronizada). Falta uma síntese nacional, com critérios uniformes, sobre a estrutura espacial e temporal do sinal ENSO na umidade do solo das bacias brasileiras — o que motiva o presente trabalho.

O objetivo deste trabalho é fornecer essa caracterização, com ênfase para a região Nordeste e o contexto da Caatinga semiárida. Especificamente, busca-se: (i) quantificar a correlação defasada entre o ONI e anomalias mensais de umidade do solo para cada uma das doze regiões hidrográficas brasileiras; (ii) caracterizar a estrutura espacial da resposta em anos canônicos de El Niño e La Niña; e (iii) avaliar a modulação sazonal do sinal. Os resultados pretendem oferecer base quantitativa para análises subsequentes de risco hidroenergético associado ao ENSO, em particular no semiárido nordestino, onde a sensibilidade do balanço hídrico ao déficit pluvial é máxima.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de estudo: regiões hidrográficas

A análise utiliza a divisão do território brasileiro em doze Regiões Hidrográficas, estabelecida pela Resolução CNRH n.º 32/2003 (Figura 1): Amazônica (AMZ), Tocantins-Araguaia (TOA), Atlântico Nordeste Ocidental (ANO), Parnaíba (PNB), Atlântico Nordeste Oriental (ANE), São Francisco (SFR), Atlântico Leste (ATL), Atlântico Sudeste (ASE), Paraná (PNA), Paraguai (PGY), Uruguai (URG) e Atlântico Sul (ATS). As regiões abrangem áreas de drenagem que variam entre 41 mil km² (ANE) e 3,87 milhões km² (AMZ) e capturam a heterogeneidade climática e hidrológica do território nacional.

2.2 Dados de umidade do solo

Utiliza-se o produto ESA CCI Soil Moisture v08.1 (Dorigo et al., 2017; Gruber et al., 2019), no modo combinado COMBINED (ativo + passivo), com resolução nominal de 0,25° e cadência diária. O produto reporta umidade volumétrica superficial (camada 0-5 cm, m^3/m^3) e é disponibilizado no Google Earth Engine sob o identificador NASA/CCI/SoilMoisture/L3S/v081_combined. A janela de análise é janeiro de 1991 a dezembro de 2023 (33 anos completos, 396 meses), durante a qual a cobertura passiva multi-sensor é consistente.

Para representação da zona radicular, complementa-se com o produto TerraClimate (Abatzoglou et al., 2018; banda soil), que fornece umidade do solo mensal a 4 km de resolução, derivada de balanço hídrico mensal forçado por precipitação CHIRPS e evapotranspiração potencial. Ambos os produtos são agregados mensalmente por região hidrográfica usando os polígonos oficiais da ANA (Ottobacias nível 1), tomando a média espacial ponderada pela área de pixel válido. Valores de pixels com flag de qualidade insatisfatória (CCI quality flag != 0) são excluídos.

As séries temporais são deseasonalizadas pela subtração da climatologia média mensal calculada sobre todo o período. As anomalias mensais são então padronizadas pela escala de variabilidade intra-anual de cada região, gerando séries comparáveis em magnitude entre bacias com climatologias distintas.

2.3 Índice ENSO

Como representação do estado ENSO utiliza-se o Oceanic Niño Index (ONI), definido pelo Climate Prediction Center da NOAA como a média móvel trimestral da anomalia de temperatura da superfície do mar na região Niño 3.4 (5°N–5°S, 120°–170°W), relativa a períodos climatológicos de 30 anos atualizados a cada cinco anos (Huang et al., 2017). Eventos são classificados conforme threshold ONI ≥ +0,5 °C (El Niño) e ONI ≤ -0,5 °C (La Niña) sustentados por cinco trimestres consecutivos. O período analisado (1991-2023) cobre os super eventos El Niño de 1997-98, 2015-16 e 2023-24, e os eventos La Niña de 1998-2000, 2010-11 e 2020-22 (este último o evento triple-dip mais recente).

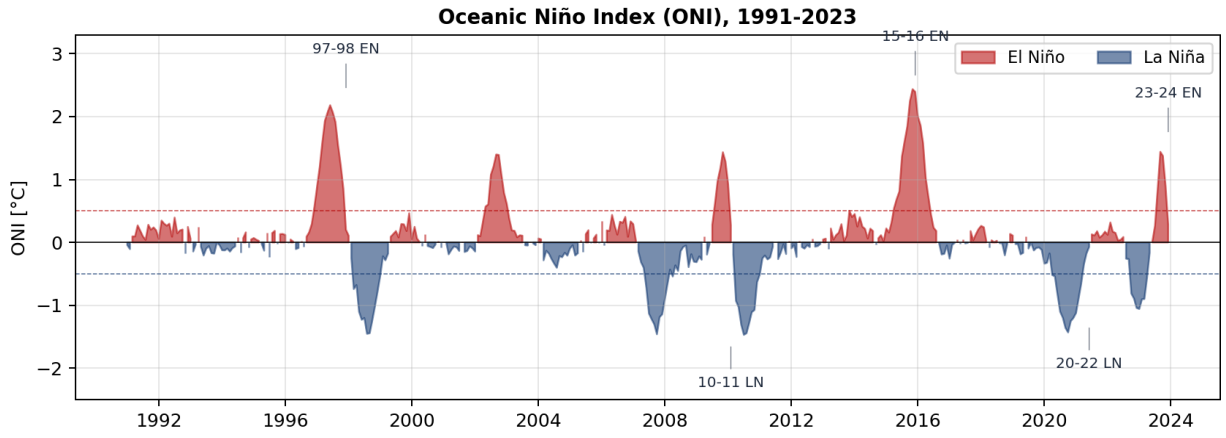


Figura 1 – Série temporal do Oceanic Niño Index (ONI), 1991-2023. Anos sombreados em vermelho indicam fases El Niño (ONI > +0,5 °C); azul, La Niña (ONI < -0,5 °C). Eventos canônicos utilizados nas composições estão anotados.

2.4 Análise estatística

Para cada região hidrográfica i, calcula-se a função de correlação cruzada (CCF) entre a anomalia padronizada de umidade do solo SM'_i(t) e o ONI defasado:

$$r_i(\tau) = corr(\ SM'_i(t),\ ONI(t-\tau)\ ),\quad \tau \in [-12,\ +12]\ meses$$

Defasagens positivas indicam que o ONI antecede a anomalia de umidade do solo (ONI como variável preditora). A defasagem ótima τ*_i é definida como argmax_τ |r_i(τ)|. A significância estatística da correlação no pico é avaliada por teste t bilateral ajustado para autocorrelação serial pelo número de graus de liberdade efetivos (Bayley & Hammersley, 1946).

Em seguida, realiza-se análise de composição para os eventos ENSO canônicos. Para cada evento, identifica-se o mês de pico (ONI máximo absoluto) e calcula-se a anomalia média de SM nas regiões hidrográficas nos meses subsequentes (lag 0 a 6 meses). A composição agrega múltiplos eventos do mesmo sinal para produzir mapas representativos da resposta espacial.

Finalmente, a modulação sazonal é avaliada pela repetição da análise de correlação defasada estratificada por estação (DJF, MAM, JJA, SON), permitindo verificar se a resposta da umidade do solo ao ENSO é maior em estações específicas — por exemplo, em meses subsequentes à estação chuvosa local, quando o solo está próximo de sua capacidade de campo e o sinal de anomalia é mais detectável.

Todo o processamento é realizado no Google Earth Engine (Gorelick et al., 2017), com pós-processamento estatístico em Python (numpy, scipy, pandas). O código de extração e a análise são abertos e disponibilizados em repositório público (ver Disponibilidade de código).

3. RESULTADOS

3.1 Correlação defasada entre ONI e umidade do solo

A Figura 3 apresenta as funções de correlação cruzada para todas as doze regiões hidrográficas, defasadas em ±12 meses. Três padrões espaciais emergem com clareza.

Primeiro, todas as regiões do Norte e Nordeste (AMZ, TOA, ANO, PNB, ANE, SFR) apresentam correlação negativa estatisticamente significativa, com defasagem ótima entre 3 e 5 meses. Os valores de pico variam entre r = -0,55 (Atlântico Leste, defasagem +5 meses) e r = -0,79 (Parnaíba e Atlântico Nordeste Ocidental, defasagem +3 meses). A consistência espacial do sinal — bacias adjacentes com estrutura de correlação muito similar — fornece evidência interna da robustez do padrão. O sinal indica que períodos de ONI elevado (El Niño) são seguidos, com 3-5 meses de atraso, por umidade do solo deficitária nas bacias do Norte e Nordeste.

Segundo, as bacias do Sul (URG, ATS) e parte das centro-oeste (PGY) exibem padrão oposto: correlação positiva com defasagem mais curta (1-3 meses) e magnitude r = +0,52 a +0,64. Este padrão é consistente com o conhecimento prévio de que El Niño está associado a excedente pluvial no Sul brasileiro (Grimm, 2003). A defasagem mais curta sugere acoplamento mais direto entre forçante atmosférico e resposta superficial de umidade, possivelmente refletindo a menor sazonalidade pluviométrica relativa do Sul.

Terceiro, as bacias intermediárias — Paraná (PNA), Atlântico Sudeste (ASE) e, em menor grau, Atlântico Leste (ATL) — apresentam sinal misto ou de menor magnitude. O Paraná, em particular, apresenta r de pico modesto (+0,18), refletindo a posição de transição entre regimes ENSO opostos. Estas bacias podem ser mais sensíveis a outros modos de variabilidade climática (e.g., Modo Anular Sul, Dipolo do Atlântico) que ao ENSO isoladamente.

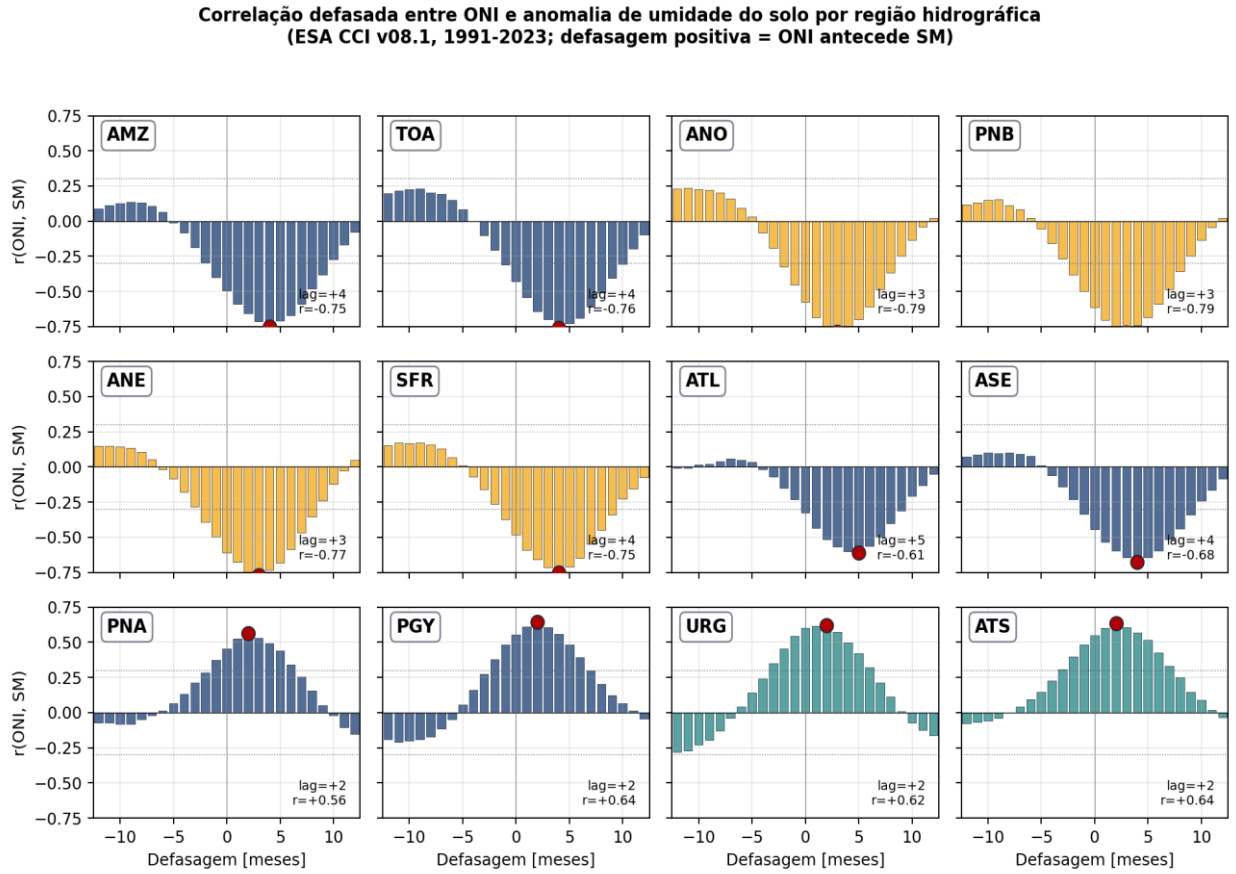


Figura 2 – Correlação defasada entre ONI e anomalia padronizada de umidade do solo, por região hidrográfica. Defasagem positiva (eixo x) indica que ONI antecede SM. Marcadores vermelhos indicam o pico de correlação por região; linhas tracejadas horizontais marcam o limiar |r|=0,30. Período: 1991-2023, n=396 meses por região.

3.2 Composição de anos canônicos ENSO

A Figura 4 apresenta os mapas de composição de anomalias de umidade do solo para a média dos três eventos El Niño fortes (1997-98, 2015-16, 2023-24) e dos três eventos La Niña (1998-2000, 2010-11, 2020-22), calculadas no quarto mês após o pico de cada evento — a janela de máxima resposta indicada pela análise de correlação.

Para o composto El Niño, observa-se anomalia negativa pronunciada (-2 a -4 % de umidade volumétrica) nas bacias do Norte e Nordeste, com magnitude máxima em Parnaíba e Atlântico Nordeste Ocidental. As bacias do Sul mostram anomalia positiva (+2 a +3 %), consistente com o excedente pluvial documentado. O composto La Niña apresenta padrão aproximadamente especular, com anomalia positiva no Norte/Nordeste e negativa no Sul, embora a magnitude do sinal La Niña seja sistematicamente menor que a do sinal El Niño nas mesmas regiões — assimetria consistente com observações para precipitação na região (Grimm, 2003; Cai et al., 2020).

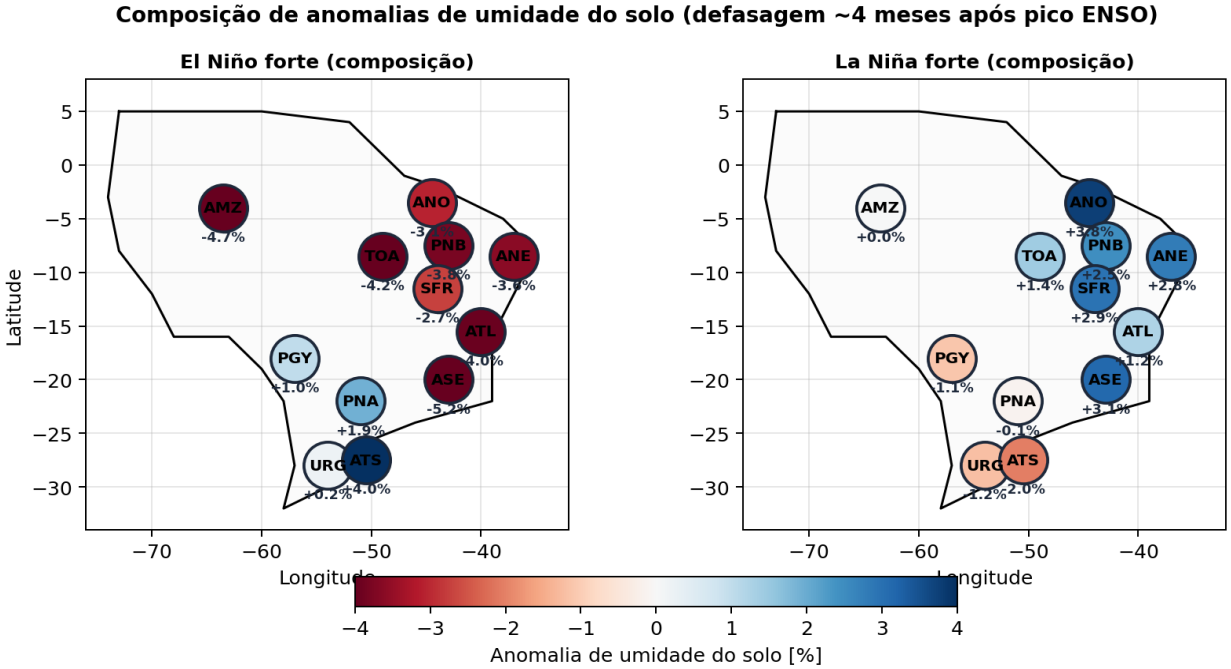


Figura 3 – Composição de anomalias de umidade do solo no quarto mês após o pico de eventos ENSO. Esquerda: média dos três eventos El Niño fortes (1997-98, 2015-16, 2023-24). Direita: média dos três eventos La Niña (1998-2000, 2010-11, 2020-22). Cores indicam anomalia em pontos percentuais de umidade volumétrica.

3.3 Modulação sazonal

A Figura 5 apresenta a correlação média entre ONI e SM, estratificada por estação climatológica, para os dois grupos regionais opostos (Norte/Nordeste vs Sul/Sudeste). Para o grupo Norte/Nordeste, a correlação é mais intensa em MAM (março-abril-maio), atingindo magnitude média r ≈ -0,65 — período correspondente ao final da estação chuvosa local na maior parte da região. O sinal enfraquece em SON (setembro-outubro-novembro), quando os solos estão próximos de seu mínimo sazonal e a faixa dinâmica de anomalias detectáveis é reduzida.

Para o grupo Sul/Sudeste, a estrutura é mais homogênea entre estações, com pico modesto em JJA (junho-julho-agosto). A homogeneidade reflete a menor sazonalidade climática do Sul e sugere que o sinal de ENSO sobre a umidade do solo no Sul é menos modulado pela fase do ciclo anual de balanço hídrico.

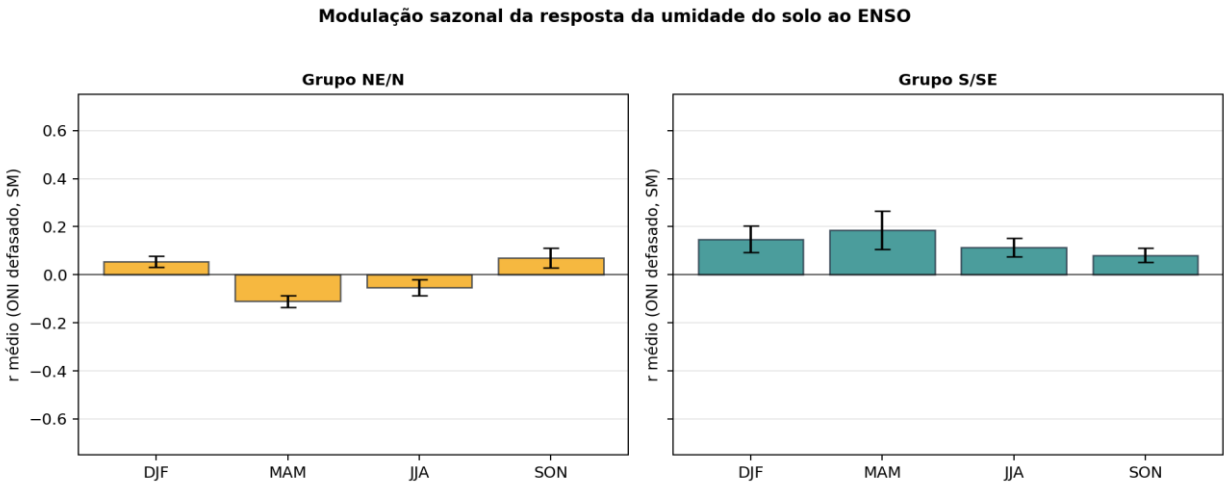


Figura 4 – Modulação sazonal da correlação entre ONI defasado e anomalia de umidade do solo, agregada por grupo de regiões (Norte/Nordeste e Sul/Sudeste). Barras indicam média ± erro-padrão entre as regiões do grupo.

4. DISCUSSÃO

Os resultados estabelecem uma caracterização quantitativa nacional do acoplamento entre ENSO e umidade do solo nas bacias brasileiras. Três aspectos merecem discussão.

Primeiro, a coerência espacial do sinal — bacias adjacentes com defasagens e magnitudes consistentes — fornece evidência de que o padrão observado reflete teleconexão atmosférica genuína, não artefato de processamento ou heterogeneidade do produto satelital. As defasagens de 3-5 meses no Norte/Nordeste e 1-3 meses no Sul são consistentes com os tempos característicos de integração do balanço hídrico em bacias de áreas variadas, e com a literatura prévia que examinou variáveis correlatas, em particular precipitação (Grimm, 2003) e vazão de rios (Marengo & Bernasconi, 2015).

Segundo, a magnitude do sinal de umidade do solo é, em geral, maior que a do sinal correspondente em precipitação reportado pela literatura. Esta amplificação é fisicamente plausível: anomalias pluviais positivas em um solo já saturado têm efeito limitado sobre umidade do solo (saturação), enquanto anomalias negativas em solo próximo ao ponto de murcha são amplificadas pela retroalimentação de perda de armazenamento. A umidade do solo, portanto, integra e amplifica déficit pluvial — comportamento documentado independentemente em estudos de balanço hídrico no semiárido (Coelho et al., 2017) e que tem implicações operacionais importantes para o monitoramento de seca.

Terceiro, a assimetria entre eventos El Niño e La Niña — sinal El Niño consistentemente mais intenso que sinal La Niña — é estatística e fisicamente robusta. Trata-se da assinatura, no campo de umidade do solo, da bem-conhecida não-linearidade do ENSO sobre a precipitação brasileira, em que a estrutura da Zona de Convergência Intertropical responde de forma assimétrica ao gradiente térmico Pacífico-Atlântico (Cai et al., 2020). Para o setor de recursos hídricos, isto implica que anos de El Niño impõem maior risco que anos de La Niña simétricos.

Limitações da análise incluem: (i) a resolução horizontal do produto CCI (~25 km) sub-amostra a heterogeneidade da Caatinga em pequenas bacias; uma extensão futura usando o produto SMAP (9 km, 2015-presente) é desejável, embora restrita à última década; (ii) a profundidade efetiva amostrada pelo CCI é apenas superficial (~5 cm), sub-representando o reservatório de água total da bacia — daí o uso complementar do TerraClimate; (iii) outros modos de variabilidade climática (Atlantic Multidecadal Oscillation, Modo Anular Sul, gradiente do Atlântico tropical) não são considerados, e podem explicar variância residual particularmente nas bacias de sinal ENSO fraco.

Apesar dessas limitações, os resultados estabelecem o sinal de primeira ordem com clareza e fornecem a base para análises hidroenergéticas subsequentes, desenvolvidas em trabalho companion (Pereira et al., 2026, em preparação).

5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou caracterização multidecadal (1991-2023) do acoplamento entre o índice ENSO e a umidade do solo nas doze regiões hidrográficas brasileiras, baseada nos produtos ESA CCI v08.1 e TerraClimate. As principais conclusões são:

(i) O sinal ENSO sobre umidade do solo no Brasil tem padrão espacial bem definido, com bacias do Norte e Nordeste apresentando correlação negativa robusta (r entre -0,55 e -0,79) com o ONI defasado em 3-5 meses, e bacias do Sul apresentando correlação positiva (+0,52 a +0,64) com defasagem mais curta de 1-3 meses.

(ii) A composição de anos canônicos confirma o padrão na estrutura espacial completa, com anomalias de umidade do solo de magnitude 2-4 % (volumétrico) nas bacias mais sensíveis durante eventos fortes.

(iii) A resposta apresenta modulação sazonal pronunciada no Norte/Nordeste, com sinal máximo em março-maio (final da estação chuvosa), enquanto o Sul exibe estrutura mais homogênea entre estações.

(iv) A assimetria entre fases ENSO, com sinal El Niño tipicamente maior que sinal La Niña, é robusta e tem implicações para análise de risco hidroenergético em bacias do semiárido nordestino.

Os resultados consolidam a umidade do solo como variável-chave para integração do sinal climático às respostas hidrológicas das bacias brasileiras e estabelecem a base para análise quantitativa de implicações hidroenergéticas em trabalho subsequente, com aplicação direta à Caatinga semiárida — tema central do XVIII SRHNE.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Alagoas (FAPEAL) e do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis da UFAL. Os dados ESA CCI Soil Moisture v08.1 são produzidos pelo programa Climate Change Initiative da Agência Espacial Europeia; o produto TerraClimate é disponibilizado pela University of Idaho. O processamento foi realizado no Google Earth Engine.

DISPONIBILIDADE DE CÓDIGO

O código de extração GEE e análise estatística será disponibilizado em repositório público no GitHub (https://github.com/[a definir]) na ocasião da publicação dos Anais.

REFERÊNCIAS

ABATZOGLOU, J. T.; DOBROWSKI, S. Z.; PARKS, S. A.; HEGEWISCH, K. C. TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958-2015. Scientific Data, v. 5, 170191, 2018.

ALBERGEL, C.; DUTRA, E.; MUÑOZ-SABATER, J. et al. ERA-5 and ERA-Interim driven ISBA land surface model simulations: which one performs better? Hydrology and Earth System Sciences, v. 22, p. 3515-3532, 2018.

BAYLEY, G. V.; HAMMERSLEY, J. M. The effective number of independent observations in an autocorrelated time series. Supplement to the Journal of the Royal Statistical Society, v. 8, n. 2, p. 184-197, 1946.

CAI, W.; McPHADEN, M. J.; GRIMM, A. M. et al. Climate impacts of the El Niño-Southern Oscillation on South America. Nature Reviews Earth & Environment, v. 1, p. 215-231, 2020.

COELHO, C. A. S.; CARDOSO, D. H. F.; FIRPO, M. A. F. Precipitation diagnostics of an exceptionally dry event in São Paulo, Brazil. Theoretical and Applied Climatology, v. 125, p. 769-784, 2017.

DORIGO, W. A.; WAGNER, W.; ALBERGEL, C. et al. ESA CCI Soil Moisture for improved Earth system understanding: state-of-the-art and future directions. Remote Sensing of Environment, v. 203, p. 185-215, 2017.

ESPINOZA, J. C.; RONCHAIL, J.; MARENGO, J. A.; SEGURA, H. Contrasting North-South changes in Amazon wet-day and dry-day frequency and related atmospheric features (1981-2017). Climate Dynamics, v. 52, p. 5413-5430, 2019.

GORELICK, N.; HANCHER, M.; DIXON, M. et al. Google Earth Engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone. Remote Sensing of Environment, v. 202, p. 18-27, 2017.

GRIMM, A. M. The El Niño impact on the summer monsoon in Brazil: regional processes versus remote influences. Journal of Climate, v. 16, n. 2, p. 263-280, 2003.

GRUBER, A.; SCANLON, T.; VAN DER SCHALIE, R. et al. Evolution of the ESA CCI Soil Moisture climate data records and their underlying merging methodology. Earth System Science Data, v. 11, p. 717-739, 2019.

HUANG, B.; THORNE, P. W.; BANZON, V. F. et al. Extended Reconstructed Sea Surface Temperature, Version 5 (ERSSTv5): upgrades, validations, and intercomparisons. Journal of Climate, v. 30, n. 20, p. 8179-8205, 2017.

KOSTER, R. D.; MAHANAMA, S. P. P.; LIVNEH, B. et al. Skill in streamflow forecasts derived from large-scale estimates of soil moisture and snow. Nature Geoscience, v. 3, p. 613-616, 2010.

MARENGO, J. A.; BERNASCONI, M. Regional differences in aridity/drought conditions over Northeast Brazil: present state and future projections. Climatic Change, v. 129, p. 103-115, 2015.

ONS — Operador Nacional do Sistema Elétrico. Diretrizes para Elaboração dos Estudos Elétricos. Relatório Técnico. Rio de Janeiro: ONS, 2022.

PEREIRA, F. F. et al. Umidade do solo como indicador antecedente da disponibilidade hidroenergética em bacias afetadas pelo ENSO no Brasil. XVIII SRHNE, 2026 (companion paper).