

Dinâmica superficial numa bacia de drenagem semiárida mediante o uso do césio-137: estudo de caso da Bacia do Riacho Salgado-PE

Antonio Carlos de Barros Correa

Universidade Federal de Pernambuco,
Recife, PE, Brasil

e-mail: dbiase2001@terra.com.br

 0000-0001-9578-7501

Renata Nunes Azambuja

Universidade Federal de Sergipe,
São Cristovão, SE, Brasil

e-mail: renatageo.ufs@gmail.com

 0000-0001-6730-7152

p. 381-406

revista

Geo 
USP
espaço e tempo

Volume 24 • nº 2 (2020)

ISSN 2179-0892

Como citar este artigo:

CORREA, A. C. B.; AZAMBUJA, R. N. Dinâmica superficial numa bacia de drenagem semiárida mediante o uso do césio-137: estudo de caso da Bacia do Riacho Salgado-PE.

Geosp – Espaço e Tempo (On-line), v. 24, n. 2, p. 381-406, ago. 2020. ISSN 2179-0892.

Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/geosp/article/view/168173>. doi: <https://doi.org/10.11606/issn.2179-0892.geosp.2020.168173>.



Este artigo está licenciado sob a Creative Commons Attribution 4.0 Licence

Dinâmica superficial numa bacia de drenagem semiárida mediante o uso do céσιο-137: estudo de caso da Bacia do Riacho Salgado-PE

Resumo

A dinâmica superficial da Bacia do Riacho Salgado, localizada na região semiárida do estado de Pernambuco, foi estudada com o objetivo de verificar a relação entre sedimentos recentes, uso da terra e processos superficiais. Para interpretar essas interconexões, aferiu-se a redistribuição de sedimentos sobre perfis transversais, do interflúvio à base da encosta limítrofe ao canal, a partir da aferição do inventário do céσιο-137 até 12 cm de profundidade. Os resultados obtidos pelo método proporcional e pelo balanço simplificado de massa apontaram níveis máximos de erosão na base das encostas entre 6-9 cm de profundidade, alcançando $27,05 \pm 9,5 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Na superfície, o máximo atingido foi de $12,7 \pm 5,8 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. O estudo aponta que, mesmo numa bacia de menor ordem, com o uso da terra dominado por atividades tradicionais de pecuária em pastagem nativa, as taxas de erosão atingem valores característicos dos sistemas naturalmente erosivos de Schumm, chegando a $60 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. A técnica do céσιο-137 revelou grande potencial para aferir o balanço erosivo contemporâneo em paisagens semiáridas, permitindo estabelecer relações empiricamente mais robustas entre áreas tidas como degradadas ou conservadas.

Palavras-chave: Geomorfologia fluvial. Ambiente semiárido. Erosão. Nordeste do Brasil.

Superficial dynamics in a semi-arid watershed using cesium-137: the case study of the Salgado Creek Watershed, state of Pernambuco

Abstract

The surface dynamics of a small semi-arid watershed was assessed in order to verify the relationship between recent sediments, land use, and surface processes. To interpret these interconnections, the redistribution of sediments on transversal profiles was measured, from the interfluvium to the base of the slope bordering the channel, based on the distribution of the cesium-137 inventory up to 12 cm deep. The results obtained by the proportional method and simplified mass balance pointed to maximum levels of erosion at the base of the slopes between 6–9 cm in depth, reaching $27.05 \pm 9.5 \text{ t ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$. On the surface, the maximum reached was $12.7 \pm 5.8 \text{ t ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$. The study points out that even in a lower order basin, under land use dominated by traditional livestock raising on native pasture, erosion rates reach values characteristic of Schumm's naturally erosive systems, in excess of $60 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. The cesium-137 technique proved to be of great potential for assessing contemporary erosive balance in semi-arid landscapes, allowing to establish more robust empirical relationships between areas deemed as degraded and conserved.

Keywords: Fluvial geomorphology. Semi-arid environment. Erosion. Northeast Brazil.

Dinámica superficial en una cuenca de drenaje semiárida con cesio-137: el estudio de caso de la Cuenca del Arroyo Salgado, estado de Pernambuco

Resumen

La dinámica de la superficie de una pequeña cuenca semiárida se realizó para verificar la relación entre los sedimentos recientes, el uso de la tierra y los procesos superficiales. Para interpretar estas interconexiones, se midió la redistribución de sedimentos en perfiles transversales, desde el interfluvio hasta la base de la pendiente que bordea el canal, según la distribución del inventario de cesio-137

hasta 12 cm de profundidad. Los resultados obtenidos por el método proporcional y el balance de masa simplificado apuntarán a niveles máximos de erosión en la base de las pendientes entre 6-9 cm de profundidad, alcanzando $27.05 \pm 9.5 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. En la superficie, el máximo alcanzado fue de $12.7 \pm 5.8 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. El estudio señala que incluso en una cuenca de menor orden, bajo uso del suelo dominado por actividades pastorales tradicionales en pasto nativo, las tasas de erosión alcanzan valores característicos de los sistemas naturalmente erosivos de Schumm, llegando hasta $60 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. La técnica del cesio-137 demostró ser de gran potencial para evaluar el equilibrio erosivo contemporáneo en paisajes semiáridos, permitiendo el establecimiento de relaciones empíricamente más sólidas entre áreas consideradas como degradadas y conservadas.

Palabras clave: Geomorfología fluvial. Ambiente semiárido. Erosion. Nordeste de Brasil.

Introdução e objetivo

A dinâmica superficial dos ambientes semiáridos do Nordeste do Brasil tem sido objeto de estudos atuais em vários âmbitos da ciência geomorfológica, sobretudo no que diz respeito à distribuição dos depósitos quaternários e suas implicações para o entendimento da variabilidade climática ao longo do tempo (Bezerra et al., 2008; Corrêa, 2011; Gurgel et al., 2013). Tratando dos processos de morfogênese atual, o homem deve ser considerado um agente fundamental atuando sobre múltiplas escalas de análise espaço-temporal (Franco; Souza, 2019) que podem ser tratadas mediante o levantamento detalhado das formas de uso e cobertura da terra. A essas se somam aos fenômenos climáticos cíclicos que, segundo Corrêa (2011), incidem diretamente no suporte biogeográfico das caatingas, acrescidos aos impactos de origem agrícola, mesmo aqueles derivados das formas tradicionais de produção.

O ambiente semiárido brasileiro é composto principalmente por drenagens efêmeras (Mabesoone; Lobo; Rolim, 1984) – no caso das bacias de menor ordem, característica que impõe uma barreira ao abastecimento de comunidades rurais locais, que utilizam setores dos canais com maior sedimentação como áreas prioritárias de captação hídrica. Assim, a ação antrópica nos canais e plainos aluviais acaba por se constituir num elemento recorrente de modificação do caráter e do comportamento do sistema fluvial, às vezes de forma permanente e interagindo diretamente com os *inputs* provenientes do sistema climático. Não obstante, as características morfológicas, genéticas e funcionais das drenagens de menor ordem no semiárido brasileiro seguem pouco conhecidas, sobretudo no que diz respeito às taxas de erosão e ao tempo de permanência dos sedimentos no leito fluvial.

As chuvas sazonalmente concentradas do semiárido desencadeiam respostas erosivas cujas intensidades dependem da cobertura pedológica, morfometria dos interfúvios, densidade da vegetação e formas de uso da terra (Corrêa et al., 2019). No semiárido, a atuação espasmódica das precipitações concentradas impacta os baixos pedimentos e o interior dos

canais, favorecendo a deposição de sedimentos de variado calibre, que se acumulam no plano aluvial como saldo deposicional de cada processo erosivo (Mabesoone; Lobo; Rolim, 1984). A distribuição espacial estratigráfica destes materiais nos canais pode ser utilizada como geocronômetro da atuação dos eventos formativos – entendidos como aqueles que deixam marcas sensíveis na paisagem – bem como da evolução do uso e ocupação das terras, cujas respostas erosivas embora desencadeadas por fenômenos climáticos são mediadas pela intensidade da atividade humana.

A utilização de radionuclídeos ambientais como marcadores do movimento de sedimentos tem sido empregada por inúmeros estudos com ênfase em ambientes semiáridos nas últimas décadas (Lu; Higgitt, 2000; Djingova et al., 2005; Handl et al., 2009; Simms et al., 2008; Evrard et al., 2010). Além de fornecer informações sobre a redistribuição de sedimentos numa bacia hidrográfica, os radionuclídeos podem ser usados como traçadores cronológicos de acumulação em rios efêmeros (Long et al., 2012). No semiárido brasileiro, os estudos com céσιο-137 ainda são restritos e se concentraram na medição da atividade do radionuclídeo em diferentes tipos de solo (Antunes et al. 2010) e aferição da viabilidade da técnica para os estudos de erosão nas condições ambientais da região (Ferreira Júnior; Sampaio; Primo, 2019).

A produção artificial de céσιο-137 ocorre em um reator principalmente por meio do processo de fissão nuclear do U-235. Os registros iniciais de sua concentração no solo se dão a partir de 1952 após as explosões das primeiras bombas termonucleares e os inúmeros testes que se sucederam até o tratado de limite dos testes nucleares em 1963. Daí em diante o inventário de deposição do elemento sofreu rápida diminuição até a década de 1980, quando finalmente os testes foram suspensos (Zapata, 2003). No entanto, somarem-se a este quantitativo, novas doses de céσιο-137 liberadas para a atmosfera através do acidente do reator nuclear de Chernobyl em 1986. Quando depositado superficialmente no solo, por meio das precipitações atmosféricas, o céσιο-137 é fortemente adsorvido pelas frações de minerais de argila sofrendo migração lenta no perfil (Zaccone et al., 2007).

Segundo Corrêa et al. (2016) o céσιο-137 integra o grupo dos chamados elementos “transurânicos” que foram lançados na atmosfera em escala global a partir da década de 1950, em função dos testes de armamentos nucleares. O uso desses isótopos abre a possibilidade de rastreamento e estimativa do fluxo de sedimento fino ao longo dos últimos 50 anos. As aplicações em geomorfologia geralmente se voltam para as taxas de transporte de sedimento ao longo das encostas para as planícies aluviais assim como para lagos e represas. O céσιο-137 tem sido largamente utilizado para estimar tanto a taxa de sedimentação ao longo de planícies aluviais (Antunes et al., 2010; Evrard et al., 2010; Jange et al., 2010), quanto para medir a taxa de erosão a partir do truncamento de perfis de solo tomando por referência solos que não apresentem sinais de erosão.

Assim, o objetivo do presente trabalho é mensurar a redistribuição de sedimentos na Bacia do Riacho Salgado pelo uso do céσιο-137 como traçador radiogênico, para auxiliar a investigação do balanço morfogenético atual e compreender os processos atuantes nas unidades geomórficas que integram o ambiente fluvial efêmero do semiárido do Nordeste do Brasil como resposta aos *inputs* climáticos e antrópicos.

Material e métodos

A partir da utilização dos dados Alos-Palsar, com resolução espacial de 12,5 m, elaborou-se o modelo digital de elevação no formato GeoTiff. As imagens foram obtidas no site ASF Data Search ([s.d.]), da Universidade do Alasca, EUA. Com o *software* Arcgis 10.3, a imagem da área de estudo foi processada, obtendo-se a delimitação da bacia, a rede de drenagem e os mapas hipsométricos e de declividade necessários à elaboração dos mapas de compartimentação geomorfológica e de uso/cobertura da terra.

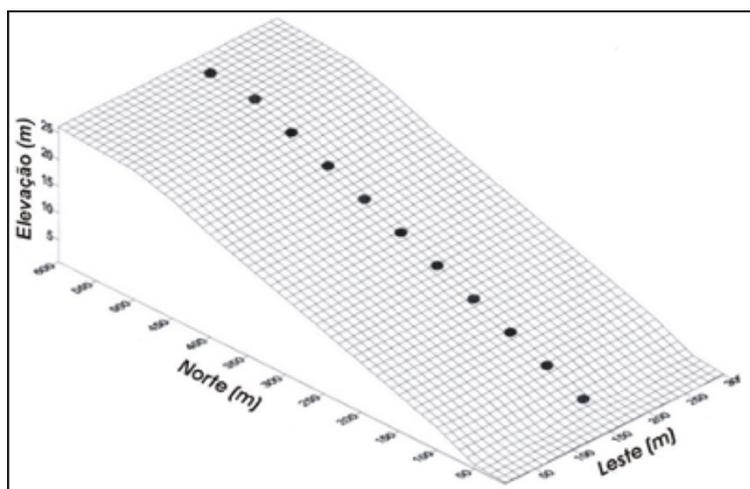
O mapeamento de detalhe dos compartimentos geomorfológicos seguiu a metodologia de Demek (1972), a qual estabelece o emprego de medidas qualitativas e quantitativas das formas, enfatizando atributos observáveis em escala local. Além da utilização de dados morfológicos e morfométricos do relevo da bacia, foi necessário adicionar dados qualitativos marcados em campo por meio do emprego GPS geodésico modelo Topcon Hiper II e estação total automática Leica Geosystems TS04. A legenda final foi criada a partir de uma adaptação da nomenclatura proposta pela metodologia dos estilos fluviais de Fryirs e Brierley (2005) e aplicada por Souza (2008) à Bacia do Riacho Salgado e Souza et al. (2016) à do Riacho do Saco, ambas no semiárido de Pernambuco.

O mapa de uso e cobertura da terra foi confeccionado a partir de classificação supervisionada de imagens georeferenciadas em mosaico Digital Globe de 23/11/2003 e Cnes/Spot de 11/10/2007, acrescida de dados de campo. Embora em sua grande maioria estes mapeamentos estejam relacionados ao tratamento de imagens de satélite (Kawakubo; Morato; Luchiarl, 2005) para identificação dos diferentes tipos de uso da terra, nesta pesquisa a análise e interpretação das imagens deteve-se à classificação dos usos relacionados às divisões espaciais de coberturas de terra e à condição da vegetação, seguindo a legenda adotada por Corrêa, Barros e Almeida (2016) para áreas semiáridas degradadas na Bacia do Riacho Grande, Paraíba.

Para verificar os padrões de erosão superficial do solo e sua temporalidade dentro da Bacia do Riacho Salgado, foram identificados cinco perfis de referência de amostras globais e cinco perfis em transecto de amostragem, contabilizando ao todo 16 perfis. Exceto para as amostras de referência, que alcançaram 15 cm de profundidade, as análises dos perfis em transecto adotaram um padrão de divisão de incremento a cada 3 cm, com alcance em geral de até 12 cm de profundidade, perfazendo 157 amostras.

Seguindo a metodologia de Pennock e Appleby (2002), a escolha do tipo de *design* de coleta de amostras teve por objetivo mensurar áreas de perda de solo (erosão) e ganho (deposição). De acordo com os autores, em primeira instância, a escolha apropriada do design de transecto em vertentes depende em grande parte do plano de curvatura das mesmas. Como na bacia analisada em questão não se identificou curvaturas significativas, foi escolhido o transecto em superfície inclinada, proposto por Mabit et al. (2014), baseado na premissa de que cada ponto escolhido na paisagem recebe o escoamento apenas do ponto imediatamente localizado à montante (Figura 1). Em virtude da curta distância entre o topo do pedimento e o leito do canal do riacho Salgado, cada transecto realizado contou com uma amostragem de topo e base em quatro níveis de profundidade.

Figura 1 – Exemplo de um transecto em superfície inclinada



fonte: Adaptado de Mabit et al. (2014).

A etapa seguinte foi a seleção de pontos de amostragem, para tanto, definiu-se “pontos de referência”. Foram estabelecidos três locais situados sobre os interflúvios da bacia, em áreas planas com vegetação conservada e sem sinais de erosão.

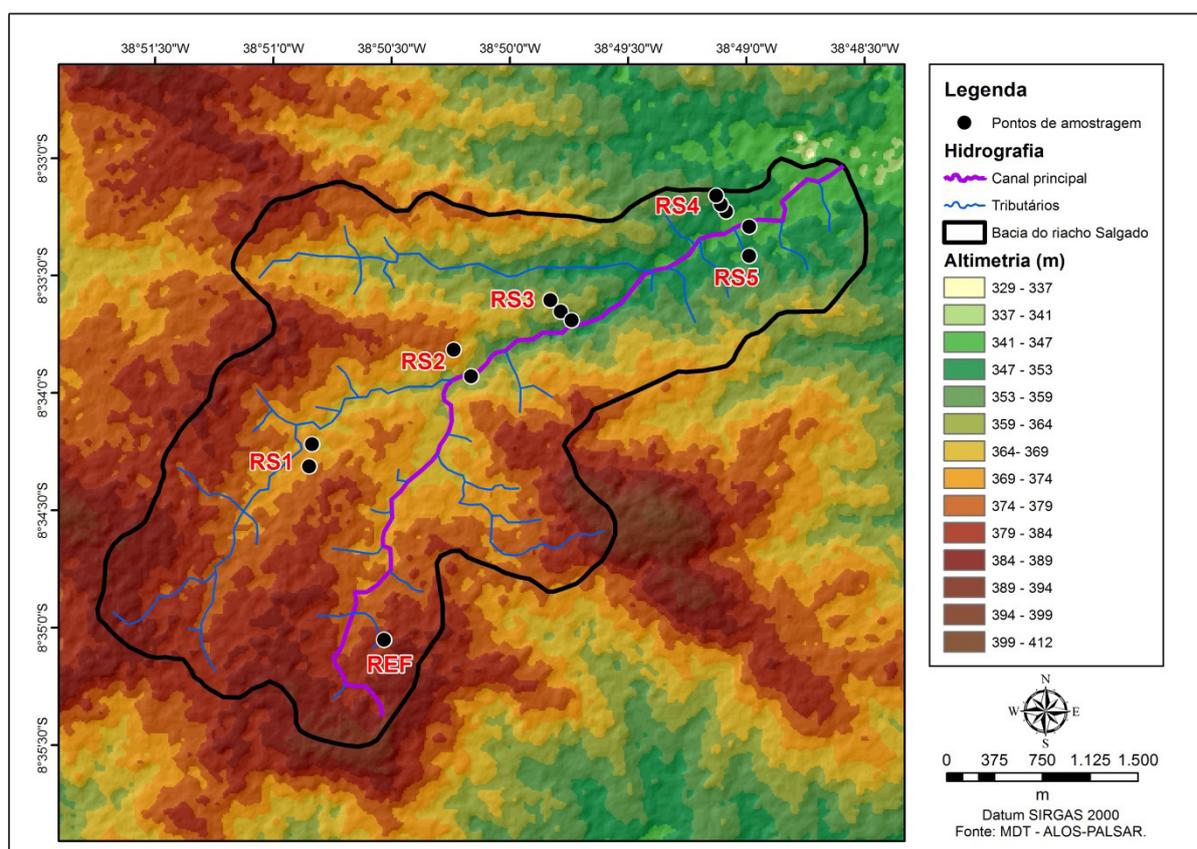
Seguindo os critérios sugeridos por Walling e Quine (1993) e Loughran, Pennock e Walling (2002), o método de coleta baseou-se no dispositivo *scraper-plate* munido de uma moldura de aço ou alumínio com medida interna de 15 x 40 cm, usada para fixação no solo, e uma placa e barra cilíndrica de metal ajustável, com orifícios de intervalo de 1 cm, para raspar ou remover incrementos de profundidades de amostras no interior da área emoldurada (Figura 2).

Figura 2 – *Scraper-plate* utilizado para coleta de amostras para análise do céσιο-137 com incremento de 3 cm



Neste trabalho, impedimentos ao escavar perfis de coleta, devido à alta densidade de fragmentos rochosos, sobretudo nos perfis de referência situados em pedimentos com neossolos litólicos, limitaram a coleta a até 12 cm de profundidade. A distribuição dos cinco transectos de amostragem na bacia buscou contemplar o maior número de unidades morfológicas identificadas no riacho Salgado. Assim, dois transectos em topossequência foram obtidos no alto curso do riacho, em estilo fluvial confinado; dois no médio curso, sobre um plano aluvial semi-confinado e um no baixo curso, sobre um plano não confinado (Figura 3).

Figura 3 – Pontos de amostragem em transectos no riacho Salgado



A densidade dos solos e sedimentos coletados foi determinada pelo método de Pennock e Appleby (2002) baseada na comparação entre densidade seca ao ar e a densidade seca obtida na estufa aquecida a 105 °C. A medição precisa da densidade dos solos é necessária para converter a concentração de radionuclídeos mensurados para o inventário total (relatado em Bq/m²). A partir da obtenção das duas massas, calcula-se a mistura gravimétrica do solo (Mg), pela Equação 1:

$$Mg = MSS_{AD} - (MSS_{OD})MSS_{OD}$$

Onde:

MSS_{AD} = massa seca ao ar (g)

MSS_{OD} = massa seca na estufa (g)

Usando a mistura gravimétrica do solo para corrigir o total de solo pesado, temos a Equação 2:

$$M < 2_{OD} = M < 2_{AD} - (M < 2_{AD} \times Mg)$$

Onde:

$M < 2_{OD}$ = massa do solo seca na estufa < 2 mm (g)

$M < 2_{AD}$ = massa de solo seca ao ar < 2 mm (g)

Mg = mistura gravimétrica do solo

Sendo finalmente a densidade ($D_b < 2$) do solo calculada por Equação 3:

$$D_b < 2 = M < 2_{OD} / V$$

Onde:

$D_b < 2$ = densidade (g/cm³)

V = volume (cm³)

A análise granulométrica foi realizada pelo método de peneiramento utilizando a escala de Wentworth para determinação das partículas do tamanho cascalho e areia. A quantificação das frações grossas foi realizada através do peneiramento seco das amostras, separando as frações de silte e argila. As frações finas foram quantificadas com a utilização de granulômetro à laser Malvern, modelo Mastersizer 2000. Ambas as análises foram realizadas nas dependências do Laboratório de Geomorfologia do Quaternário (LabGEQUA) da UFPE.

A medição de atividade do césio-137 nas amostras coletadas foi realizada no Laboratório de Instrumentação Nuclear (LIN) do Departamento de Energia Nuclear (DEN) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Para esse fim, aplicou-se a técnica da espectrometria gama com detector do tipo HPGe (High-purity Germanium) de alta resolução. O detector apresenta uma resolução de 1,77 keV (largura do pico a meia altura) para a energia de 1.332 keV do cobalto-60, eficiência nominal de 27,7%. Este equipamento é acoplado a um pré-amplificador modelo 2002 CSL MCA (*multichannel analyzer*) com 8.192 canais e *software* Genie[®] – 2000 Canberra[®]. A tensão de operação do pré-amplificador foi ajustada em 3 kV, conforme especificação do fabricante. A fim de reduzir os efeitos de interferência do BG (*background*), o detector é envolvido por uma blindagem de Pb com baixa radiação de fundo de aproximadamente 6,5 cm de espessura com uma superfície interna delgada constituída de uma liga de Cu e Zn, de modo a minimizar os efeitos secundários.

De acordo com Wallbrink, Walling e He (2002), a atividade específica de um radionuclídeo em uma amostra indicada como A (Bq/kg) no momento da análise, pode ser calculada a partir da eficiência do detector e dos valores de parâmetros relevantes apresentados na Equação 4:

$$A = (CT - C_{b0} T_{b0}) IM f(M)$$

Onde:

T = contagem de tempo (s)

C = total de contagem (Bq/kg)

C_{b0} = contagem de *background* sem a amostra (0 para ¹³⁷Cs e ⁷Be)

T_{b0} = *background* correspondente a contagem de tempo (s)

M = massa da amostra (kg)

$f(M)$ = eficiência da atividade (%)

Após o cálculo em Bq/kg foi calculada a atividade areal (AA) em Bq/m² utilizando a Equação 5 dada por Loughran, Pennock e Walling (2002):

$$AA = AE \times MT$$

Onde:

AE = Atividades específica (Bq/kg)

MT = Massa total seca < 2mm (kg)

Para este estudo foram testados dois modelos de redistribuição de solos e sedimentos (Equações 6 e 7). O modelo proporcional (MP) segundo Mitchell et al. (1980) e Walling, He e Appleby (2002), baseado na suposição de que o inventário de césio-137 adicionado à superfície do solo seja completamente misturado na camada de cultivo, e que a perda de solo é diretamente proporcional à redução do conteúdo do elemento no perfil (Equação 6):

$$Y = 10 Bdx/100T$$

Onde:

Y = taxa de erosão anual (t ha⁻¹ a⁻¹)

x = $(A_{ref} - A/A_{ref}) \cdot 100$

A = atividade do ponto de amostragem (Bq/kg)

A_{ref} = atividade do ponto de referência (Bq/kg)

d = a profundidade da camada de arado ou cultivo (m)

B = densidade do solo (kg/m³)

T = tempo passado desde o início da acumulação de césio-137

Para casos em que o inventário do ponto de amostragem é maior que o ponto de deposição do local de referência, assume-se uma taxa de deposição anual utilizando a seguinte equação (Equação 7):

$$Y' = 10 Bdx'/100 T$$

Onde :

Y' = taxa de deposição anual (t ha⁻¹ a⁻¹)

X' = porcentagem do incremento de Cs-137 total definido como $(A - A_{ref} / A_{ref}) \times 100$

O método do balanço de massa simplificado (MBM1), utilizado por Kachanoski (1993) e Hacıyakupoglu et al. (2005) assume o *fallout* total do césio-137 ocorrido até o ano de 1963, ao invés do período de 1954 a 1970, quando cessaram completamente os testes atmosféricos, além da distribuição da quantidade do césio-137 no perfil de solo não ser dependente do tempo (Equações 8 e 9).

A taxa média anual de perda do solo por ano y (t ha⁻¹ a⁻¹) pode ser estabelecida pela equação 8 abaixo:

$$y = 10 dB/P [1 - a(1 - x/100)^{1/(t-1963)}]$$

Onde:

d = profundidade da camada de arado ou cultivo (m)

B = densidade do solo (kg/m³)

P = razão entre a concentração de Cs-137 no ponto de amostragem e no ponto de referência

t = tempo passado desde o início da acumulação de césio-137

Já para locais deposicionais utilizando o MBM1 a taxa de deposição de sedimentos pode ser estimada a partir da concentração de céσιο-137 depositado nos sedimentos de acordo com a equação de Walling, He e Appleby (2002):

$$R' = \frac{A_{ex}(t)}{\int_{1963}^{t'} Cd(t') e^{-\lambda(t-t')} dt'}$$

Onde:

$A_{ex}(t)$ = atividade do ponto de amostragem menos atividade do ponto de referencia em (t) (Bq/kg)

$Cd(t')$ = concentração de céσιο-137 nos sedimentos depositados no ano t' (Bq/kg)

λ = Constante de decaimento do céσιο-137 (a^{-1})

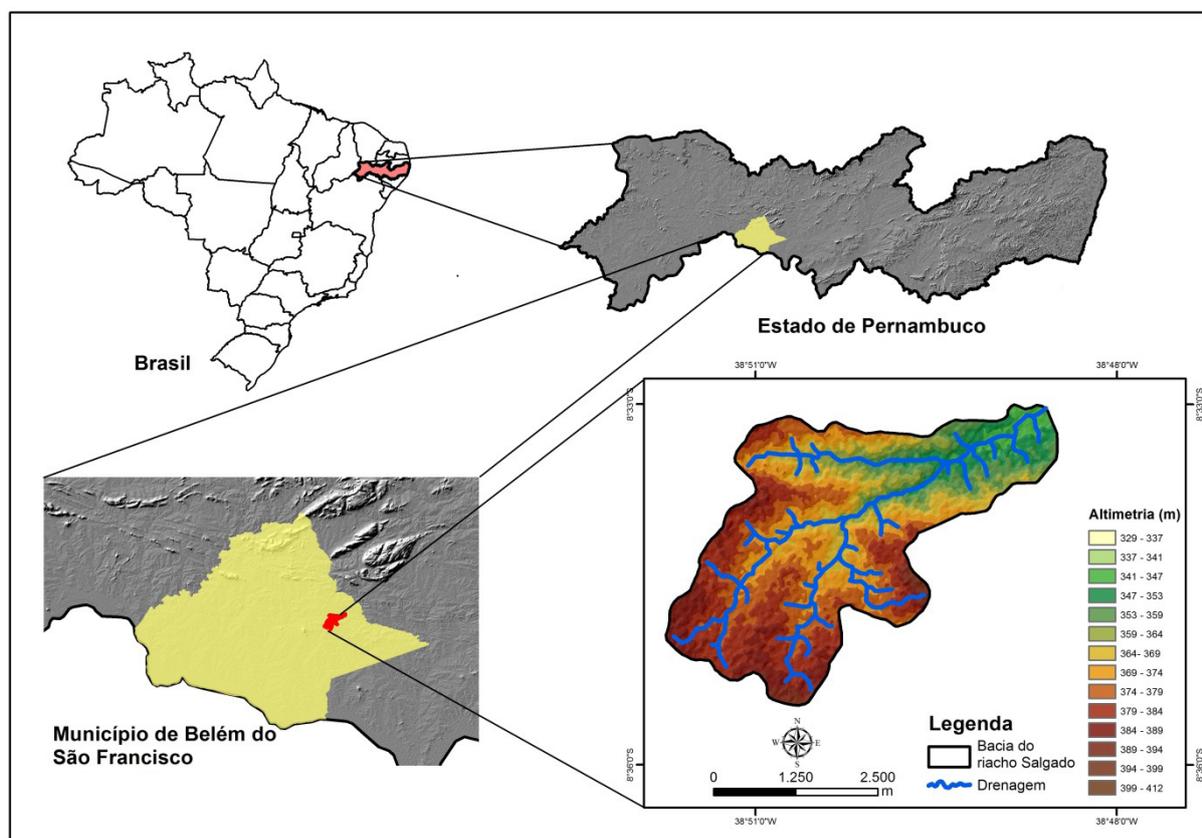
t = tempo passado desde o início da acumulação de céσιο-137 (a)

t' = ano da amostragem

Área de estudo

A Bacia do Riacho Salgado está localizada no município de Belém de São Francisco, na porção central do semiárido de Pernambuco, integrando o sistema de bacias que drenam para o sub-médio São Francisco, entre as coordenadas geográficas $8^{\circ} 32' 00''$ S e $8^{\circ} 35' 00''$ S e $38^{\circ} 48' 00''$ W e $38^{\circ} 52' 00''$ W (Figura 4). A bacia abrange uma área de aproximadamente 17 km^2 .

Figura 4 – Localização da Bacia Hidrográfica do Riacho Salgado, semiárido de Pernambuco



fonte: Base de dados Alos-Palsar.

A área de estudo situa-se sobre litotipos que integram o Complexo Belém do São Francisco, do Mesoproterozoico. Na bacia, predominam gnaisses quartzo-feldspáticos, migmatitos e metagranitos. Estruturalmente, ela é condicionada pela Zona de Cisalhamento de Pernambuco, que lhe confere a orientação geral WSW-ENE. Quanto à morfoestrutura a área se insere totalmente dentro da Depressão Sertaneja, em altitudes que variam de 300 a 340 m, com morfologia predominante de pedimentos pouco dissecados.

O regime do riacho Salgado é efêmero, com poucos tributários, e fica a maior parte do ano em leito seco. As chuvas dominadas pela Zona de Convergência Intertropical e as perturbações associadas se concentram de janeiro a abril. A precipitação média é de 470 mm, o que insere a área dentro de um dos núcleos de semiaridez severa do Nordeste, com índice de aridez de apenas 0,18, o que equivale à Zona Árida na classificação da FAO (Souza; Correa, 2012).

As coberturas de solo identificadas na bacia têm profundidade média de 40 a 60 cm e apresentam forte pedregosidade superficial (pavimento detrítico). O horizonte B é caracterizado pela concentração de argila de alta atividade, enquanto o horizonte A é fraco ou inexistente. Os neossolos litólicos e os neossolos regolíticos, em geral, estão sobre os pedimentos, enquanto nos trechos de acumulação aluvial observa-se a ocorrência de planossolos háplicos atacados pela erosão linear, e estes últimos podem apresentar salinização na superfície com formação de crostas (Menezes et al., 2007).

Ao longo do leito, as margens destituídas de vegetação ripária são acometidas pela ação da erosão linear; em sulcos e ravinas. Décadas de ocupação com a pecuária extensiva de caprinos conduziu ao empobrecimento florístico da vegetação local, caatinga arbustiva aberta, hoje resumida à ocorrência ubíqua de seis espécies (Azambuja, 2012). A falta de vegetação ripária contribuiu para o incremento da perda de solo, principalmente ao longo dos plainos aluviais suspensos do médio e baixo curso.

Entre tantos riachos efêmeros do semiárido brasileiro, o riacho Salgado constitui-se como um exemplo de bacia influenciada por ritmos sazonais de *inputs* climáticos extremamente irregulares. Tais características são reproduzidas ubiquamente por toda a paisagem da região, apresentando propriedades físicas peculiares: alto teor de salinização dos solos; ausência de conectividade entre os setores longitudinais do canal – setores de acumulação fluvial indistinta entre planície e canal – plainos aluviais – separados por trechos com canais rochosos e retilíneos. Sobre os sedimentos aluviais, observam-se práticas tradicionais de uso dos recursos hídricos por parte das populações locais na forma de poços escavados no próprio leito seco e de barramentos rústicos.

O levantamento detalhado de campo em associação com tratamento digital permitiu uma compartimentação do relevo da bacia em três setores a partir do comportamento do canal principal do riacho Salgado em relação às suas margens: confinado, semi-confinado e não confinado. Localmente, no caso do leito confinado, o canal está inciso sobre o próprio embasamento geológico do Complexo Belém do São Francisco. No semiconfinado, ocorre a formação de áreas de acumulação em pelo menos um dos lados do canal, sendo a outra margem estruturada na própria rocha e seus solos residuais. Os setores não confinados revelam uma estreita conexão

entre o canal e o plano aluvial, com suas margens não confinantes, estruturadas em sedimentos aluviais (Figuras 4 e 5).

Figura 5 – Mapa de detalhe das unidades geomorfológicas e estilos fluviais do riacho Salgado

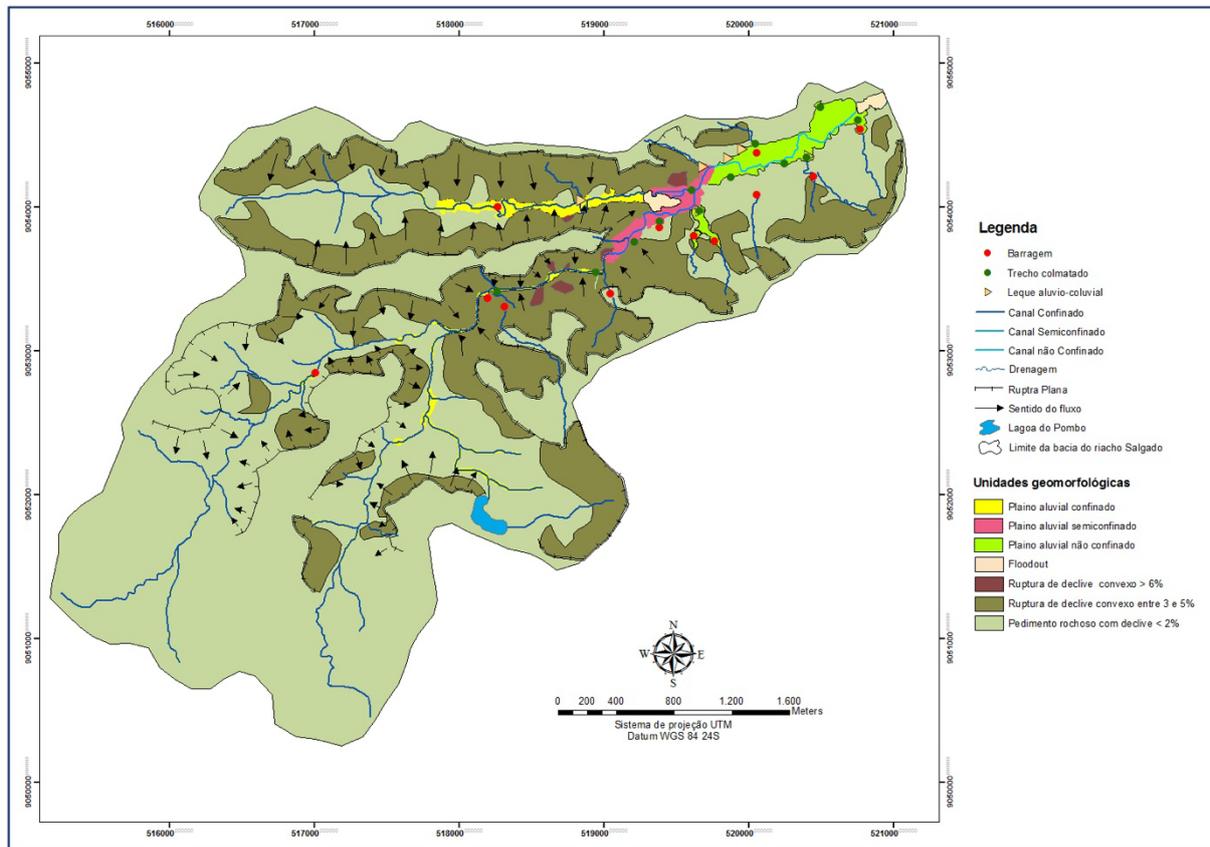
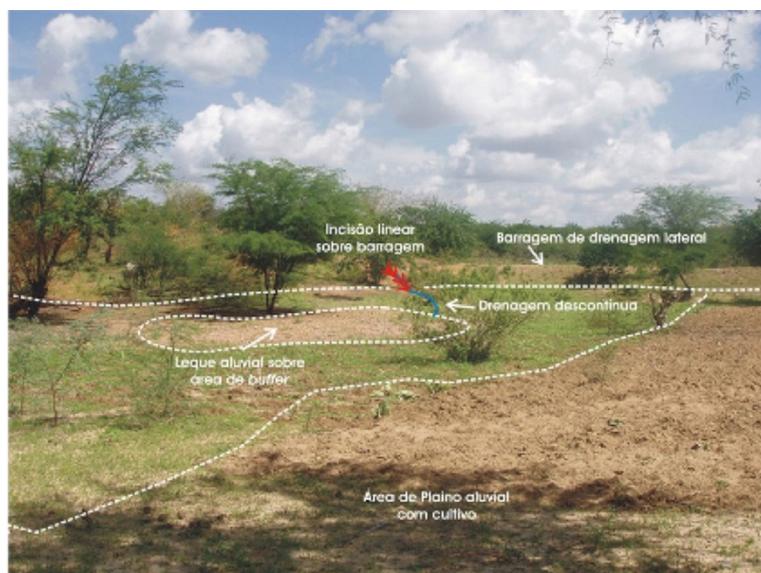


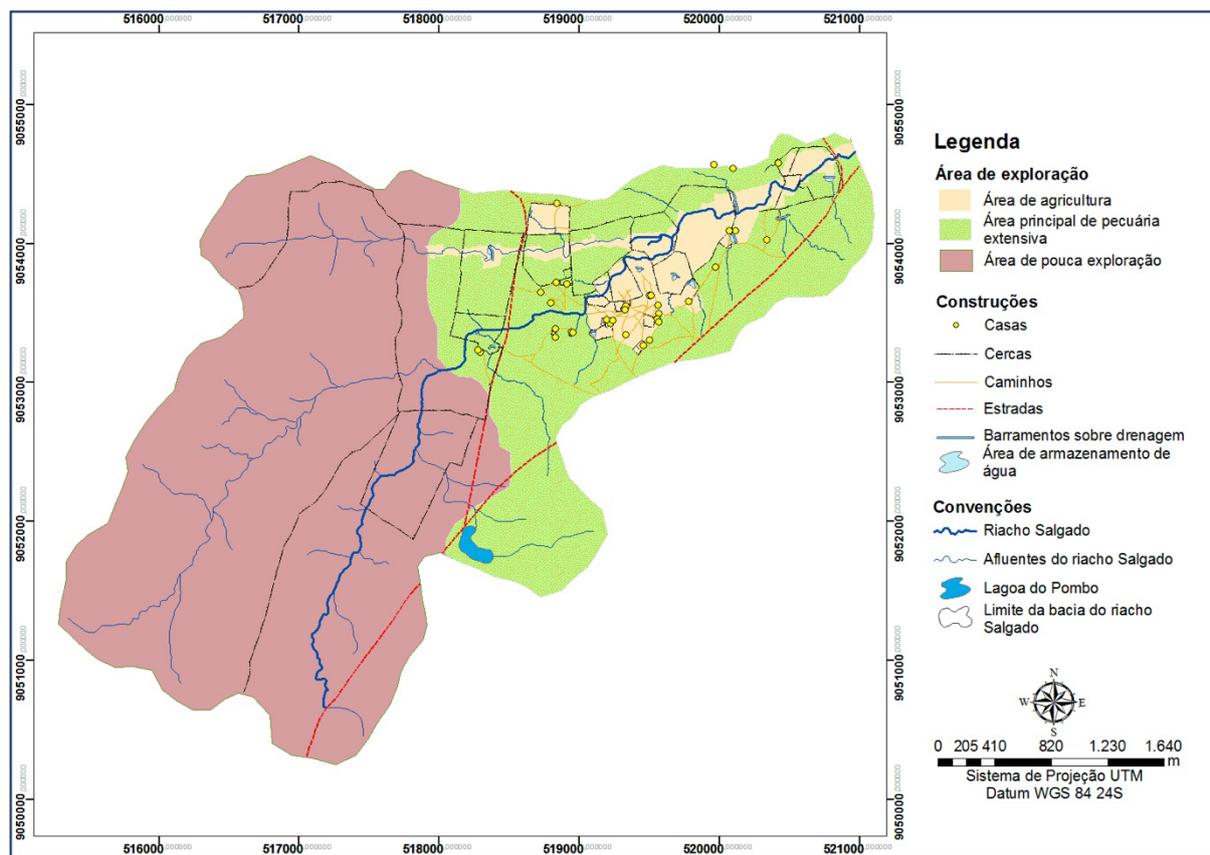
Figura 6 – Relação entre elementos morfológicos do plano aluvial e usos da terra do riacho Salgado, semiárido de Pernambuco.



CORREA, A. C. B.; AZAMBUJA, R. N.

Observa-se uma estreita relação entre a compartimentação geomorfológica da bacia e a distribuição das formas de uso da terra, associadas às práticas tradicionais de agricultura e pecuária, sobretudo de caprinos. Nesse panorama, as formas de agricultura de sequeiro e pecuária extensiva subdividem-se em três setores ao longo de toda a bacia (Figura 6). Geomorfologicamente, constata-se que o uso pela agricultura se concentra sobretudo nos trechos de leito semiconfinados e não confinados, restando aos demais compartimentos o uso pela pecuária extensiva, inclusive as áreas conservadas de caatinga arbustiva aberta.

Figura 7 – Mapa de uso da terra na Bacia do Riacho Salgado



Dinâmica superficial

Apesar da aparente degradação da paisagem – solos e vegetação – em alguns setores, todas as áreas de referência apresentaram contagem total de céσιο-137 superior aos demais pontos ao longo dos perfis de coleta selecionados, evidenciando maior estabilidade. A profundidade máxima de coleta das amostras de 12 cm mostrou-se viável em todos os perfis, uma vez que abaixo dessa não se detectou concentração mensurável do radionuclídeo. No caso do presente estudo não foram detectadas grandes variações na amostragem espacial aleatória, devido à homogeneidade dos aspectos geomorfológicos da bacia, pouca variação da densidade média dos solos e uso da terra com predomínio de pastagens nativas.

Inicialmente foi verificado através das amostragens das áreas de referência na bacia – em situação interfluvial, topo plano e vegetação de caatinga arbustiva conservada – uma estimativa da atividade areal de $68 \pm 9,8$ (Bq/m²) para o céσιο-137. Esse valor aproxima-se de outras

estimativas obtidas para áreas referenciais no estado de Pernambuco, como encontrado por Antunes et al. (2010) em três diferentes localidades. Araripina no oeste do estado sob condições semiáridas revelou o menor índice, com atividade de $64,0 \pm 13,8$, enquanto Goiana na zona da mata, sob clima tropical úmido, obteve índice intermediário de $71,6 \pm 6,3$ (Bq/m^2), sendo o valor máximo encontrado em Sertânia, $95,5 \pm 9,8$ (Bq/m^2), no semiárido central do estado.

Os perfis de amostras referenciais para a Bacia do Riacho Salgado apresentaram curvas descendentes compatíveis com os modelos apresentados por Hacıyakupoglu et al. (2005) e Jange et al. (2010). Nessa primeira aproximação, compreende-se que a concentração do inventário do céσιο-137 em áreas teoricamente não perturbadas apresenta valores efetivamente superiores aos apresentados nos perfis em transecto de amostragem realizados em setores da bacia com evidências de erosão superficial. Nas demais áreas de análise, o inventário de estoque de céσιο-137 mostrou decréscimo, indicando o aumento do transporte do radionuclídeo por erosão dos solos (Figura 7). A Tabela 1 apresenta os valores médios de atividade encontrados nos perfis de amostragem.

Figura 8 – Comparativo entre a concentração de céσιο-137 nas amostras de referência (acima) e amostras do perfil em transecto do alto curso do riacho Salgado (abaixo)

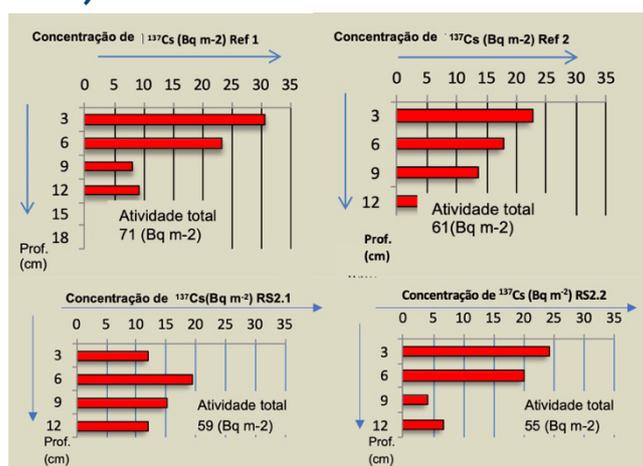


Tabela 1 – Valores da atividade e inventário de céσιο-137 para os pontos amostrados na Bacia do Riacho Salgado

Pontos de Amostragem	Incremento em Profundidade (cm)	Atividade (Bq Kg^{-1})		Atividade (Bq/m^2)		Inventário total (Bq m^{-2})
RSI Topo	0-3	1,02	$\pm 0,01$	17	$\pm 0,23$	$62 \pm 0,88$
	3-6	1,74	$\pm 0,01$	30	$\pm 0,23$	
	6-9	0,56	$\pm 0,01$	9	$\pm 0,22$	
	9-12	0,35	$\pm 0,01$	6	$\pm 0,20$	
RSI Base	0-3	0,89	$\pm 0,01$	15	$\pm 0,23$	$31 \pm 1,05$
	3-6	0,46	$\pm 0,02$	8	$\pm 0,30$	
	6-9	0,29	$\pm 0,01$	5	$\pm 0,20$	
	9-12	0,19	$\pm 0,02$	3	$\pm 0,32$	

Pontos de Amostragem	Incremento em Profundidade (cm)	Atividade (Bq Kg ⁻¹)		Atividade (Bq/m ²)		Inventário total (Bq m ⁻²)
RS2 Topo	0-3	0,71	±0,01	12	±0,21	59 ±0,96
	3-6	1,14	±0,01	19	±0,23	
	6-9	0,89	±0,01	15	±0,23	
	9-12	0,71	±0,01	12	±0,22	
RS2 Base	0-3	1,43	±0,01	24	±0,23	55 ±0,93
	3-6	1,17	±0,01	20	±0,23	
	6-9	0,24	±0,01	4	±0,20	
	9-12	0,39	±0,02	7	±0,27	
RS3 Topo	0-3	0,90	±0,01	15	±0,23	56 ±0,74
	3-6	1,02	±0,01	17	±0,23	
	6-9	0,62	±0,01	11	±0,21	
	9-12	0,78	±0,02	13	±0,30	
RS3 Base	0-3	0,93	±0,01	16	±0,22	44 ±0,98
	3-6	0,46	±0,01	8	±0,21	
	6-9	0,31	±0,01	5	±0,21	
	9-12	0,91	±0,02	16	±0,34	
RS4 Topo	0-3	1,05	±0,01	18	±0,25	55 ±1,06
	3-6	1,25	±0,01	21	±0,25	
	6-9	0,39	±0,01	7	±0,22	
	9-12	0,55	±0,02	9	±0,32	
RS4 Base	0-3	1,05	±0,01	18	±0,24	41 ±0,88
	3-6	0,78	±0,01	13	±0,22	
	6-9	0,27	±0,01	5	±0,21	
	9-12	0,32	±0,01	5	±0,21	
RS5 Topo	0-3	0,25	±0,01	4	±0,20	28 ±1,12
	3-6	0,50	±0,02	8	±0,30	
	6-9	0,42	±0,02	7	±0,30	
	9-12	0,47	±0,02	8	±0,32	
RS5 Base	0-3	0,83	±0,02	14	±0,29	45 ±1,1
	3-6	0,73	±0,01	12	±0,23	
	6-9	0,41	±0,02	7	±0,28	
	9-12	0,70	±0,02	12	±0,30	

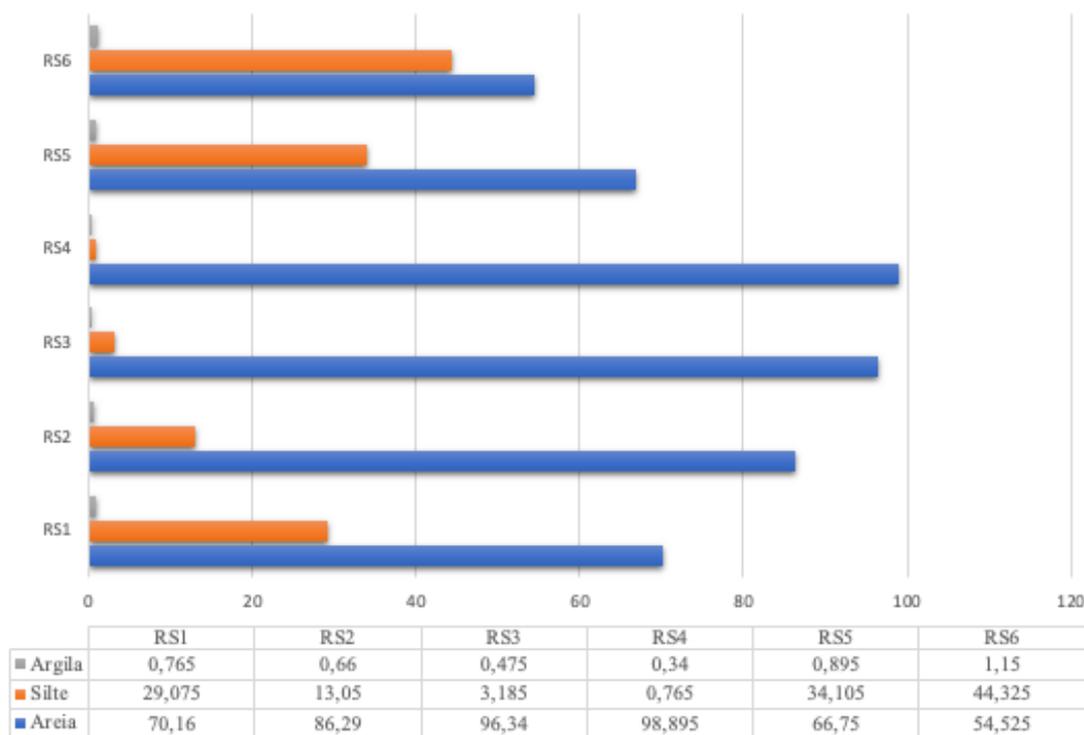
A distribuição de valores de concentração acima demonstra que as áreas definidas como de pouca exploração e vegetação de caatinga arbustiva aberta (Tabela 2) apresentaram valores de estoque mais aproximados ao valor de referência ($68 \pm 9,8$ Bq/m²). Por outro lado, no restante da bacia as concentrações variaram de acordo com o tipo de uso da terra, divididas em áreas com cobertura de caatinga com pouco uso (RS1); área de pecuária extensiva (RS2 e RS4); área de transição entre pecuária extensiva e agricultura (RS3) e área voltada para cultivo (RS5).

Observa-se também que em todas as amostras situadas em posição topográfica de topo – sobre a superfície do pedimento – houve um decréscimo de atividade quando se compara a camada

superficial, de 0-3 cm de profundidade, com aquela situada imediatamente abaixo (3 a 6 cm). Embora o inventário total para as posições de topo tenha apresentado maior concentração em relação aos pontos situados na base do perfil, considera-se que essa depleção superficial seja resultado de uma intensificação da ação do escoamento superficial difuso, como agente fundamental do transporte sobre os pedimentos. A maior taxa de perda superficial de sedimento aferida na amostra RS2 Topo, se explica pela textura areno-siltosa dos neossolos regolíticos (Tabela 2), somada à alta densidade de caprinos nessa área.

Quando depositado superficialmente no solo, o ^{137}Cs é fortemente adsorvido pelas frações de minerais de argila, sofrendo migração lenta no perfil. Assim, o teor de argila dos solos da área foi determinado para identificar discrepâncias que pudessem comprometer as análises (Zaccone et al., 2007), o que não foi encontrado. As amostras foram classificadas em sua maioria como areno-siltosas, tendo sido encontrado uma pequena população de amostras na classe de areias e outra silto-arenosa. Esta transição de classe textural se dá ao longo de toda a bacia, estando a classe arenosa representada no alto curso, a areno-siltosa no médio curso e a silto-arenosa no baixo curso (Figura 7).

Figura 9 – Distribuição percentual das classes granulométricas nas amostras dos perfis em transecto do riacho Salgado



A Tabela 2 apresenta os valores determinados em ambos os modelos para taxa de erosão e deposição. Observa-se que o total de estoque em todos os perfis não ultrapassou o valor total de referência, sendo todos os pontos tidos como áreas erosivas ou de transporte. Em alguns casos, a obtenção de resultados positivos, supostamente dados como área deposição, não foi considerada como tal, sobretudo em amostras que se encontram sob a posição de topo: RS2-topo, RS3-topo, RS4-topo e RS5-topo.

Tabela 2 – Redistribuição de sedimentos pelos modelos MP e MBMI por nível amostrado e balanço total por ponto amostrado e sua relação com as unidades geomorfológicas, textura das amostras e uso da terra. Valores (-) indicam perda, e (+) deposição

Pontos	Profundidade (cm)	MP (t ha ⁻¹ a ⁻¹)	MBMI (t ha ⁻¹ a ⁻¹)	Unidade Geomorfológica	Textura das amostras	Uso da terra	Balanço (t ha ⁻¹ a ⁻¹)
RS 1.1 Topo	0-3	-2,9	-4,4	Pedimento rochoso com declividade < 2°	Areia-siltica	Área de pouca exploração (Caatinga arbustiva aberta)	- 27,83
	3-6	-7,3	-11,8				
	6-9	-7,4	-10,8				
	9-12	-0,6	-0,9				
RS 1.2 Base	0-3	-3,6	-5,8	Plano aluvial confinado	Areia	Área de pouca exploração (Caatinga arbustiva aberta)	- 59,72
	3-6	-10,4	-19,7				
	6-9	-16,0	-31,0				
	9-12	-1,8	-3,2				
RS 2.1 Topo	0-3	-4,5	-8,0	Ruptura de declive convexa entre 3° e 5°	Areia-siltica	Área de pouca exploração (Caatinga arbustiva aberta)	0
	3-6	-1,0	-1,8				
	6-9	3,2	5,7				
	9-12	2,2	4,2				
RS 2.2 Base	0-3	-0,7	-1,0	Plano aluvial confinado	Areia-siltica	Área de pecuária extensiva	- 38,49
	3-6	-0,5	-0,6				
	6-9	-17,5	-36,6				
	9-12	-0,3	-0,4				
RS 3.1 Topo	0-3	-3,7	-5,1	Ruptura de declive convexa entre 3° e 5°	Areia-siltica	Área de pecuária extensiva	- 12,1
	3-6	-3,0	-3,9				
	6-9	-5,3	-7,3				
	9-12	2,7	4,2				

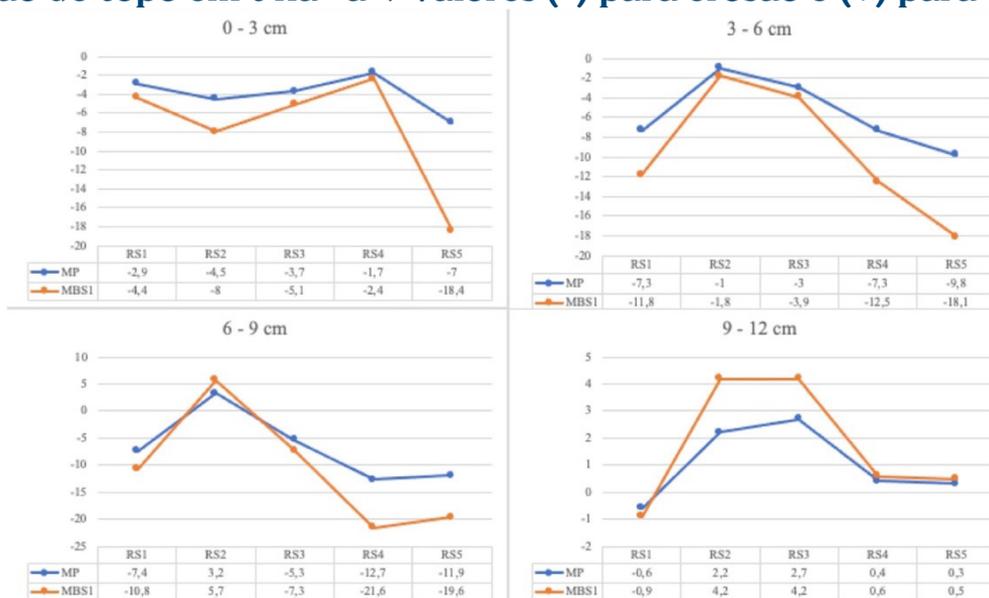
Pontos	Profundidade (cm)	MP (t ha ⁻¹ a ⁻¹)	MBSI (t ha ⁻¹ a ⁻¹)	Unidade Geomorfológica	Textura das amostras	Uso da terra	Balço (t ha ⁻¹ a ⁻¹)	
RS 3.2 Base	0-3	-3,3	-5,3	Plano aluvial semi-confinado	Silte-arenoso	Área de agricultura (cultivos de subsistência)	- 46,81	
		-10,3	-19,6					
		-15,1	-28,2					
	3-6	3,8	6,3					
		-1,7	-2,4					
		-7,6	-12,5					
9-12	-12,7	-21,6						
	RS 4.1 Topo	0-3	0,4	Pedimento rochoso com declividade < 2°	Areia-siltica	Área de pecuária extensiva	- 36,48	
			-2,8					-4,1
-5,9			-9,0					
3-6		-16,5	-32,8					
		-0,1	-1,2					
		-7,0	-18,4					
RS 4.1 Base	6-9	-9,8	-18,1	Plano aluvial não-confinado	Areia-siltica	Área de agricultura (cultivos de subsistência)	- 47,17	
		-11,9	-19,6					
		0,3	0,5					
	9-12	-3,9	-6,5					
		-6,6	-10,4					
		-12,0	-20,1					
RS 5.1 Topo	0-3	2,1	3,5	Pedimento rochoso com declividade < 2°	Silte-arenoso	Área de pecuária extensiva	- 55,6	
		-2,9	-4,4					
		-7,3	-11,8					
	3-6							
		6-9						
			9-12					

Pontos	Profundidade (cm)	MP (t ha ⁻¹ a ⁻¹)	MBSI (t ha ⁻¹ a ⁻¹)	Unidade Geomorfológica	Textura das amostras	Uso da terra	Balanco (t ha ⁻¹ a ⁻¹)
RS 5.2 Base	0-3	-7,4	-10,8	Plano aluvial não-confinado	Silte-arenoso	Área de agricultura (cultivos de subsistência)	- 33,45
		-0,6	-0,9				
		-3,6	-5,8				
	3-6	-10,4	-19,7				
		-16,0	-31,0				
		-1,8	-3,2				
	6-9	-4,5	-8,0				
	9-12						

Sobre as áreas fornecedoras de sedimentos, representadas nos gráficos como posição de topo do pedimento, foi verificada uma relação inversamente proporcional entre a profundidade e níveis de perda. Ressalta-se que os perfis incipientes não permitiram acesso a profundidades além dos 12 cm, outrossim aspecto característico dos solos residuais em ambientes semiáridos sobre litologias cristalinas. Enquanto sobre os níveis superficiais (de 0-3 cm) foi verificada uma perda constante de sedimento, o nível mais profundo da amostragem apresentou estabilidade, de acordo com o acúmulo positivo na maioria dos pontos.

O comportamento dos perfis estudados está a par com os resultados encontrados em áreas semiáridas de erosão ativa pela ação do escoamento superficial não canalizado durante as enxurradas episódicas, como identificado por Azbouche et al. (2017) na Argélia, mesmo em áreas aparentemente estáveis tomadas como pontos de referência. Diferenças encontradas entre os perfis de análise ao longo da bacia, sobretudo em relação às amostras RS4-topo e RS5-topo, que apresentaram valores elevados de perda entre os níveis intermediários (de 3 a 9 cm), têm relação direta com o uso intensificado da terra nesse setor da bacia (Figura 8).

Figura 10 – Análise da tendência de erosão e deposição para cada camada na posição de topo em $t\ ha^{-1}\ a^{-1}$. Valores (-) para erosão e (+) para deposição

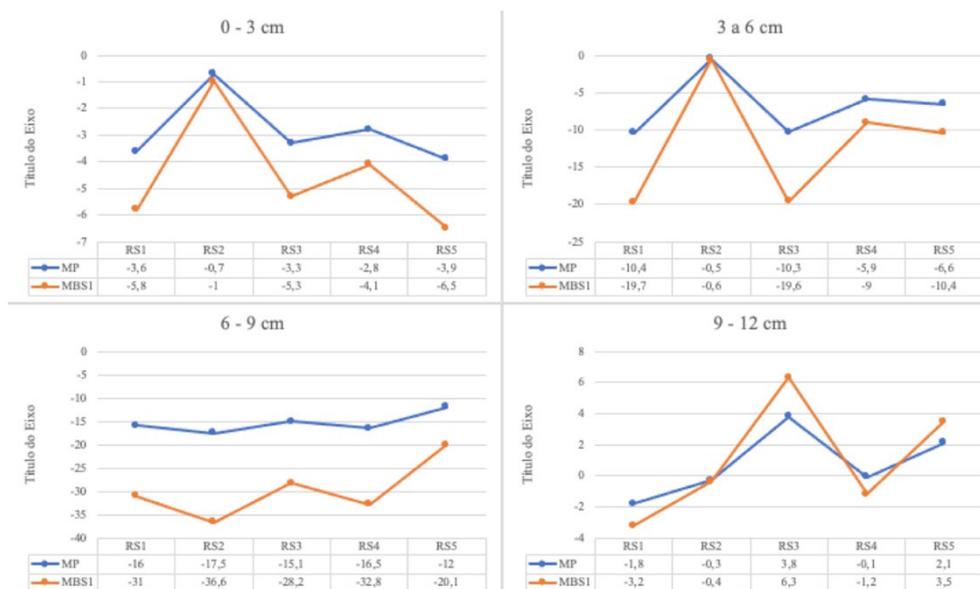


Analisando os processos de perda ou acúmulo de sedimentos na posição de base do perfil em transecto verificou-se dois momentos com taxas de erosão semelhantes para toda a bacia. O primeiro ocorre sobre a camada superficial de 0-3 cm e o segundo foi encontrado na camada de 6-9 cm. Desses resultados, pode-se inferir que tanto no período atual quanto num momento pretérito – provavelmente relacionado a um evento de maior magnitude –, toda a bacia passou por um processo de remoção das camadas superficiais na posição de base do pedimento ao longo da incisão do canal principal do riacho Salgado. O segundo momento na base do perfil em transecto foi registrado em nível sub-superficial à profundidade de 6-9 cm. Essa relação pode estar associada à ocorrência dos planossolos háplicos na margem do canal, base dos perfis, mais susceptíveis à erosão devido ao seu forte gradiente textural.

Essa relação de forte erosão foi evidenciada pelos resultados superiores de estoque de céσιο-137 encontrado em camadas imediatamente abaixo do nível 9-12 cm. Além dessa evidência, as camadas que recobrem esse nível, apresentam supostamente uma configuração de antiga área de estocagem, que se converteu atualmente em área de perda de acordo com os resultados obtidos pelo inventário do radionuclídeo. Embora as camadas superiores estejam submetidas aos processos de perda, níveis ainda muito baixo de erosão foram verificados em RS2-base, com valores de perda inferiores a $1 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ o que pode confirmar a suposição de que estes pontos recebem uma quantidade de sedimentos que tende a repor quase que por inteiro a sua taxa de perda anual. Para os demais pontos a taxa de erosão entre as camadas de 3-6 cm, varia entre $-5,9$ e $-9 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ a $-10,3$ e $-19,6 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ sem uma tendência bem marcada (Figura 9).

Considerando a baixa meia-vida do radionuclídeo as taxas de erosão por ele apontadas indicam a ocorrência de processos denudacionais ativos em toda a bacia, que possivelmente estão atrelados às práticas de uso da terra e à recorrência de episódios de secas severas como documentado para as últimas décadas na região (Cunha et al., 2018). De qualquer modo, a aplicação da técnica do céσιο-137 revela que ao menos na escala do riacho Salgado o balanço de denudação contemporâneo é positivo (Penteado, 1974), sendo a taxa de remoção do solo superior à de formação.

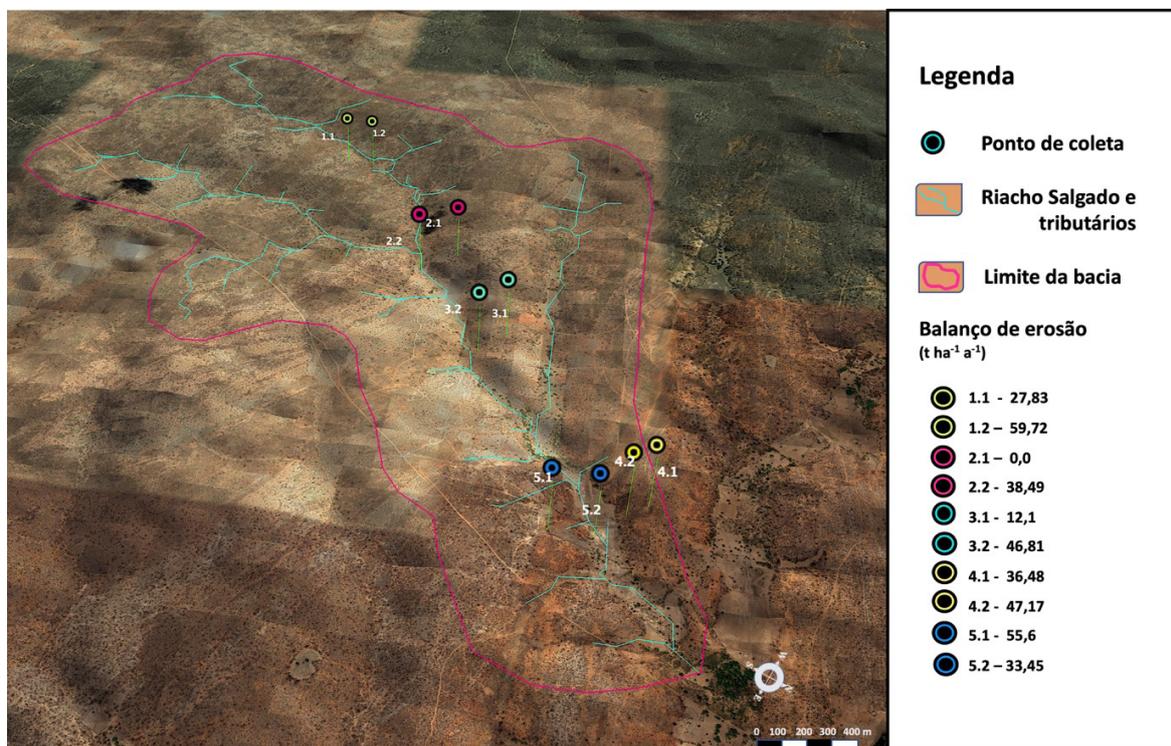
Figura 10 – Análise dos processos de erosão e deposição para cada camada na posição de base em $\text{t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Valores (-) para erosão e (+) para deposição



Em praticamente todos os níveis verificou-se o predomínio de processos de remoção do solo. A tendência de preservação da camada mais profunda, apresentada no conjunto das amostras de 9-12 cm tanto do setor do topo quanto da base, predominam entre o médio e baixo curso do riacho mesmo sobre o topo do pedimento, com taxas de deposição estimada que variam para o conjunto de amostras de $0,3$ a $6,3 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Assim, os pontos de coleta com maior nível de preservação, embora tenham apresentado composição média de 30% de frações finas – silte e argila – correspondem às amostras oriundas do nível RS1-topo e RS2.2-base. Enquanto os

pontos mais críticos, do ponto de vista erosivo foram os níveis RS1-base, RS4-topo, RS4-base e RS5-topo. Os resultados do balanço de erosão para cada ponto de coleta foram plotados numa visão em perspectiva de voo de pássaro da Bacia do Riacho Salgado confeccionada a partir da imagem do *software* Google Earth Pro, de 25/11/2003, (Figura 10).

Figura 11 – Distribuição dos totais acumulados de erosão pela aplicação do céσιο-137 ao longo do curso do riacho Salgado, semiárido de Pernambuco



Considerações finais

Estudos de erosão no semiárido brasileiro carecem de modelos em base empírica aplicados à escala das bacias hidrográficas, sobretudo aquelas de menor ordem, onde o uso da terra se restringe praticamente à pecuária extensiva, tendo a caatinga como pastagem natural. Na Bacia do Riacho Salgado, mesmo sem maiores sinais de degradação de terras, ao contrário dos núcleos de desertificação já largamente reconhecidos da região, o estabelecimento do inventário de céσιο-137 permitiu sua caracterização dentro do intervalo das áreas semiáridas naturalmente erosivas, como definido pela literatura geomorfológica (Schumm, 2005). Embora o setor do sub-médio São Francisco, entre Pernambuco e Bahia, esteja contido no enclave de semiaridez mais severa do país, com índice de aridez inferior a 0,2, pouco se sabe sobre o comportamento histórico da erosão nos drenos de menor ordem. Dados com resolução temporal, como os aferidos pelo céσιο-137, permitem traçar cenários de modificação do uso da terra de extrema valia num momento em que a bacia do rio São Francisco é demandada por usos cada vez mais complexos de seus recursos hídricos. Outros métodos geocronológicos, de maior alcance temporal, podem incorporar informações históricas de erosão anteriores à chegada das grandes obras hídricas e de irrigação na região, abrindo caminho para uma aferição mais realista das relações de convivência com o semiárido conquanto um sistema natural de paisagens com uma dinâmica de processos superficiais de complexidade ainda pouco compreendida.

Referências

- ANTUNES, P. D.; SAMPAIO, E. V. S. B.; FERREIRA JÚNIOR, A. L. G.; GALINDO, I. C. L.; SALCEDO, I. H. Distribuição de ^{137}Cs em três solos representativos do estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência dos Solos**, Viçosa, n. 34, n. 3, p. 935-943, 2010. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832010000300035>.
- ASF DATA SEARCH. Disponível em: <https://search.asfalaska.edu/#/>. Acesso em: 12 jun. 2020.
- AZAMBUJA, R. N. **Dinâmica superficial em uma bacia de drenagem semiárida**: um estudo de caso da Bacia do Riacho Salgado-PE. Tese (Doutorado em Geografia) – Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/10870>. Acesso em: 12 jun. 2020.
- Azbouche, A.; Belamrl, M.; Morsli, B.; Hamoudi, A.; Melzi, Z. Study of ^{137}Cs redistribution in semi-arid land of western Algeria for soil loss assessment. **Journal of Agriculture and Environment for International Development**, v. 111, n. 1, p. 141-155, 2017. doi: 10.12895/jaeid.20171.564.
- BEZERRA, F.H. R.; BRITO NEVES, B. B.; CORRÊA, A. C. B.; BARRETO, A. M. F.; SUGUIO, K. Late Pleistocene tectonical-geomorphological development within a passive margin: the Cariata trough northeastern Brazil. **Geomorphology**, v. 97, p. 555-582, 2008. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.09.008>.
- CORRÊA, A. C. B. Antropogênese e morfogênese sob a ação de eventos climáticos de alta magnitude no semiárido pernambucano: o caso da Bacia do Riacho Salgado. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, São Paulo, v. 12, n. 3, p. 25-36, 2011.
- CORRÊA, A. C. B.; TAVARES, B. A. C.; LIRA, R. L.; MUTZENBERG, D. S.; CAVALCANTI, L. C. S. The semi-arid domain of the Northeast of Brazil. In: SALGADO, A. A. R.; SANTOS, L.; PAISANI, J. C. (Org.). **The Physical Geography of Brazil**. Netherland: Springer Nature, 2019. p. 119-150.
- CORRÊA, A. C. B.; BARROS, A. C. M.; ALMEIDA, J. M. Revisitando os Altos Pelados: desertificação e os processos superficiais na bacia do Riacho Grande-PB. **Revista de Geografia**, Recife, v. 33, n. 4, p. 334-355, 2016. Edição especial.
- CORRÊA, A. C. B.; TAVARES, B. A. C.; MONTEIRO, K. A.; FONSÊCA, D. N. A aplicação de técnicas geocronométricas em geomorfologia: uma atualização metodológica. **Espaço Aberto**, Rio de Janeiro, v. 6, n. 1, p. 45-74, 2016. doi: <https://doi.org/10.36403/espacoaberto.2016.5238>.
- Cunha, a. p. m. a.; Tomasella, j.; Ribeiro-Neto, g. g.; Brown, m.; Garcia, s. r.; Brito, s. b.; Carvalho, m. a. Changes in the spatial-temporal patterns of droughts in the Brazilian Northeast. **Atmospheric Science Letters**, v. 19, n. 10, p. 1-8, 2018. doi: <https://doi.org/10.1002/asl.855>.
- DEMEK, J. **Manual of Detailed Geomorphological Mapping**. Praga: Academia, 1972.

- DJINGOVA, R.; KOVACHEVA, P.; TODOROV, B.; ZLATEVA, B.; KULEFF, I. On the influence of soil proprieties on the transfer of ^{137}Cs from two soils (Chromic Luvisol and Eutric Fluvisol) to wheat and cabbage. **Journal Environmental Radioactivity**, v. 82, n. 1, p. 63-79, 2005.
- EVRRARD, O.; NÉMERY, J.; GRATIOT, N.; DUVERT, C.; AYRAULT, S.; LEFÈVRE, I. POULENARD, J.; PRAT, C.; BONTÉ, P.; ESTEVES, M. Sediment dynamics during the rainy season in tropical highland catchments of central Mexico using fallout radionuclides. **Geomorphology**, v. 124, n. 1-2, p. 42-54, 2010. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.08.007>.
- FERREIRA JÚNIOR, A. L. G.; SAMPAIO, E. V. S. B.; PRIMO, D. C. Aplicação do ^{137}Cs para mensuração de erosão no Agreste de Pernambuco. **Caderno de Geografia**, v. 29, n. 58, 2019. doi: <https://doi.org/10.5752/P2318-2962.2019v29n58p836-846>.
- FRANCO, V. V.; SOUZA, J. O. P. Conectividade de sedimentos na Bacia Hidrográfica Riacho do Tigre, ambiente semiárido no município de São João do Tigre-PB. **Geosp – Espaço e Tempo (Online)**, São Paulo, v. 23, n. 3, p. 697-711, 2019. doi: <https://doi.org/10.11606/issn.2179-0892.geosp.2019.151940>.
- FRYIRS, K; BRIERLEY, G. **Practical applications of River Styles Framework as a tool for catchment-wide river management:** a case study from Bega Catchment New South Wales. Auckland, NZ: MacQuirie University, 2005.
- GALE, S. J.; HOARE, P.G. **Quaternary sediments:** petrographic methods for the study of unlithified rocks. London: Bethaven, 1991.
- GURGEL, S. P. P.; BEZERRA, F. H. R.; CORRÊA, A. C. B.; MARQUES, F. O.; MAIA, R. P. Cenozoic uplift and erosion of structural landforms in NE Brazil. **Geomorphology**, v. 186, n. 1, p. 68-84, 2013. doi: [10.1016/j.geomorph.2012.12.023](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.12.023).
- HACIYAKUPOGLU, S.; ERTEK, T. A.; WALLING, D. E.; OZTURK, Z. F.; KARAHAN, G.; ERGINAL, A. E.; CELEBI, N. Using caesium-137 measurements to investigated soil erosion rates in western Istanbul (NW Turkey). **Catena**, v. 64, n. 2-3, p. 222-231, 2005. doi: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.08.006>.
- HANDL, J.; SACHSE, R.; JAKOB, D.; MICHEL, R.; EVANGELISTA, H.; GONÇALVES, A. C.; FREITAS, A. C. Accumulation of ^{137}Cs in Brazilian soils and its transfer to plants under different climatic conditions. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 99, n. 2, p. 271-287, 2009. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2007.07.017>.
- JANGE, B.; MABIT, L.; DERCON, G.; WALLING, D. E.; ABAIDOO, R.; CHIKOYE, D.; STAHR, K. First use of the ^{137}Cs technique in Nigeria for estimating medium-term soil redistribution rates on cultivated farmland. **Soil and Tillage Research**, v. 110, n. 2, p. 211-220, 2010. doi: <https://doi.org/10.1016/j.still.2010.07.012>.
- KACHANOSKI, R. G. Estimating soil loss from changes in soil cesium-137. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 73, n. 4, p. 629-632, 1993. doi: <https://doi.org/10.4141/cjss93-060>.

- KAWAKUBO, F. S.; MORATO, R. G.; LUCHIARI, A. Processamento das imagens HGR SPOT 5 na determinação de classes de uso da terra e manchas de cobertura vegetal na região de Teodoro Sampaio – Pontal do Paranapanema. **Geosp – Espaço e Tempo (Online)**, São Paulo, v. 8, n. 1, p. 127-136, 2004. doi: <https://doi.org/10.11606>.
- LONG, Y.; ZHANG, X.; WEN, A.; HE, X. ^{137}Cs finger printing technique for erosion and sedimentation studies. **Journal of Mountain Science**, v. 9, p. 34-40, 2012. doi: <https://doi.org/10.1007/s11629-012-2203-2>.
- LOUGHRAN, R. J.; PENNOCK, D. J.; WALLING, D. E. Spatial distribution of Caesium-137. In: ZAPATA, F. (Org.). **Handbook for the assessment of soil erosion and sedimentation using environmental radionuclides**. Dordrecht, NL: Springer, 2002. p. 97-109. doi: https://doi.org/10.1007/0-306-48054-9_6.
- LU, X. X.; HIGGITT, D. L. Estimating erosion rates on sloping agricultural land in the Yangtze Three Gorges, China, from cesium-137 measurements. **Catena**, v. 39, n. 1, p. 33-51, 2000. doi: [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(99\)00081-8](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(99)00081-8).
- MABESOONE, J. M.; LOBO, H. R. C.; ROLIM, J. L. Ambiente semi-árido do Nordeste brasileiro: os rios efêmeros. **Estudos e Pesquisas**, v. 4, p. 83-91, 1984.
- MABIT, L.; MEUSBURGER, K.; IURIAN, A.-R.; OWENS, P.N.; TOLOZA, A.; ALEWELL, C. Sampling soil and sediment depth profiles at a fine-resolution with a new device for determining physical, chemical and biological properties: the Fine Increment Soil Collector (FISC). **Journal of Soils and Sediments**, v. 14, n. 3, p. 630-636, 2014. doi: <https://doi.org/10.1007/s11368-013-0834-8>.
- MENEZES, J. B.; ARAÚJO, M. S. B.; GALVÍNCIO, J. D.; SAMPAIO, E. V. S. B.; CORRÊA, A. C. B. Índice de vulnerabilidade à erosão para uma bacia na mesorregião do São Francisco pernambucano, a partir das relações entre morfogênese e pedogênese. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.8, n. 2, p.45-56, 2007. doi: <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v8i2.93>.
- MITCHELL, J. K.; BUDENZER, G. D.; McHENRY, J. R.; RITCHIE, J. C. Soil loss estimation from ^{137}Cs measurements. In: DEBOODT, M.; GABRIEL, D. (Org.). **Assessment of Erosion**. Chichester, UK: Wiley, 1980. p. 393-401.
- PENNOCK, D. J.; APPLEBY, P.G. Sample processing. In : ZAPATA, F.(Org.). **Handbook for the assessment of soil erosion and sedimentation using environmental radionuclides**. Dordrecht, NL: Springer, 2002. p. 59-65. doi: https://doi.org/10.1007/0-306-48054-9_4.
- PENTEADO, M. M. **Fundamentos de geomorfologia**. Rio de Janeiro: Fundação do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 1974.
- SHEPARD, F. P. Nomenclature based on sand-silt-clay ratios. **Journal of Sedimentary Research**, v. 24, n. 3, p.151-158, 1954. doi: <https://doi.org/10.1306/D4269774-2B26-11D7-8648000102C1865D>.
- SHUMM, S. A. **River variability and complexity**. New York: Cambridge University Press, 2005.

- SIMMS, A. D.; WOOLDROFFE, C.; JONES, B. G.; HEIJNIS, H.; MANN, R. A.; HARRISON, J. Use of ^{210}Pb e ^{137}Cs to simultaneously constrain ages and sources of post-dam sediments in the Cordeaux reservoir, Sydney, Australia. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 99, n. 7, p. 1111-1120, 2008. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2008.01.002>.
- SOUZA, J. O. P. **Sistema fluvial e planejamento local**: um caso semiárido – Bacia do Riacho Salgado, Belém de São Francisco-PE. Monografia (Graduação em Geografia) – Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.
- SOUZA, J. O. P.; CORRÊA, A. C. B. Conectividade e área de captação efetiva de um sistema fluvial semiárido: bacia do riacho Mulungu, Belém de São Francisco-PE. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia: UFU, v. 24, p. 319-332, maio/ago. 2012. doi: <https://doi.org/10.1590/S1982-45132012000200011>.
- SOUZA, J. O. P.; CORRÊA, A. C. B.; BRIERLEY, G. J. An approach to assess the impact of landscape connectivity and effective catchment area upon bedload sediment flux in Saco Creek Watershed, Semiarid Brazil. **Catena**, v. 138, n. 1, p. 13-29, 2016. doi: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.11.006>.
- WALLBRINCK, P. J.; WALLING, D. E.; HE, Q. Radionuclide measurement using HPGe Gamma Spectrometry. In: ZAPATA, F (Org.). **Handbook for the assessment of soil erosion and sedimentation using environmental radionuclides**. Dordrecht, NL: Springer, 2002. p. 67-96. doi: https://doi.org/10.1007/0-306-48054-9_5.
- WALLING, D. E.; QUINE, T. A. **Use of caesium-137 as a tracer of erosion and sedimentation**: handbook for the application of the caesium-137 technique. Exeter, UK: University of Exeter, 1993.
- WALLING, D. E.; HE, Q.; APLLEBY, P. G. Conversion models for use in soil-erosion, soil-redistribution and sedimentation investigations. In: ZAPATA, F (Org.). **Handbook for the assessment of soil erosion and sedimentation using environmental radionuclides**. Dordrecht, NL: Springer, 2002. p. 111-164. doi: https://doi.org/10.1007/0-306-48054-9_7.
- ZACCONE, C.; COCOZZA, C.; CHEBURKIN, A. K.; SHOTYK, W.; MIANO, T. M. Highly organic soils as “witnesses” of anthropogenic Pb, Cu, Zn, and ^{137}Cs inputs during centuries. **Water Air Soil Pollution Focus**, v.186, n. 1, p. 263-271, 2007. doi: <https://doi.org/10.1007/s11270-007-9482-1>.
- ZAPATA, F. The use of environmental radionuclides as tracers in soil erosion and sedimentation investigations: recent advances and future developments. **Soil & Tillage Research**, v. 69, n. 1-2, p. 3-13. 2003. doi: [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(02\)00124-1](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(02)00124-1).