

Geologia, Hidrologia e Solos | Geology, Hydrology, and Soils

Autore / Author: Robert F. Stallard



Inventário Rápido Biológico e Social No.33 | Rapid Biological and Social Inventory 33 Alto Rio Içá, Brasil, maio/May 2025

FEVEREIRO / FEBRUARY 2026

Como citar/Cite as: Stallard, Robert F. 2026. Geologia, Hidrologia e Solos / Geology, Hydrology, and Soils. Chapter of Campbell, J.M., R.E.Oakley, C.Rutt, N.C.A.Pitman, and Fernanda Werneck (eds.). 2026. Brasil: Alto Rio Içá — Biological and Social Rapid Inventory 33. Chicago: Field Museum of Natural History.



Veja o relatório completo /
View the entire report here



Field Museum of
Natural History



Instituto Nacional de
Pesquisas da Amazônia
(INPA)



Wildlife Conservation
Society - Brasil (WCS)



Instituto de
Desenvolvimento
Sustentável
Mamirauá (IDSAM)



Núcleo de Estudos
Socioambientais do
Amazonas (NESAM -
UEA/UFAM)

As Comunidades do Alto Rio Içá: Mamuriá I, Mamuriá II, Nova Esperança, Nova Floresta do Urutaú, São José, e Três Corações de Jesus

Capítulo 2 — Geologia, Hidrologia e Solos

Autore: Robert F. Stallard

Alvos de conservação: águas puras, vulneráveis à contaminação, que constituem fonte de água para consumo humano e as principais rotas de comunicação entre comunidades; sedimentos e solos facilmente erodíveis, recobertos por uma fina manta de raízes que limita a erosão e ajuda a reter os nutrientes necessários para plantas e animais; combinações variadas de regime hídrico, substrato e topografia que sustentam habitats diversos, incluindo alguns depósitos de turfa com cerca de 0,3 m de profundidade que se desenvolvem em antigos terraços remanescentes da Idade do Gelo; áreas dispersas de solos e afloramentos ricos em minerais, conhecidos como barreiros (canamá), que oferecem nutrientes aos animais e constituem centros de observação de fauna e de caça tradicional; áreas de terra firme com solos de areia quartzosa branca.

Introdução

Contexto

A bacia do rio Içá no Brasil é uma extensão da bacia muito maior e mais bem estudada do rio Putumayo, no Equador, Peru e Colômbia. A literatura geológica de cada país apresenta descrições detalhadas da geologia em terminologias e mapas que, em geral, se encerram nas fronteiras nacionais. Como a maioria das feições geológicas não reconhece fronteiras, as sínteses mais completas tendem a ser de origem e autoria internacionais. Sínteses recentes da história geológica do sistema do rio Amazonas e das paisagens adjacentes, cobrindo os últimos 10 milhões de anos (Ma), incluem Hoorn e Wesselingh (2010), Horbe et al. (2013), Menegazzo et al. (2016), Jaramillo et al. (2017) e Albert et al. (2018). Um tema subjacente a essas sínteses é que a biodiversidade da bacia amazônica moderna é impulsionada pela geocomplexidade da paisagem amazônica, criada por essa história de mudanças geológicas. Entre as mudanças principais estão a elevação da Cordilheira dos Andes e a abertura (ruptura) de barreiras geológicas para leste, à medida que os rios passaram a escoar nessa direção. Outros fenômenos importantes, ao longo do mesmo período, incluem oscilações substanciais (>150 m) no nível eustático global do mar.

Este inventário foi realizado dentro da bacia tectônica do Solimões, nas terras baixas do oeste amazônico. O rio Içá está encaixado em uma antiga planície de inundação que, no passado, se estendia pelo nordeste do Peru e sudeste da Colômbia, desde as encostas andinas a oeste e a Sierra del Divisor ao sul até, no mínimo, Manaus — e, provavelmente, até o Oceano Atlântico. Hoje, os remanescentes erodidos dessa

planície formam pequenos platôs, alcançando quase 150 m acima do nível do mar (m a.n.m.) no leste e mais de 200 m a.n.m. no oeste, caracterizados por solos pobres em nutrientes e por vegetação típica de florestas tropicais de baixa a muito baixa fertilidade. Diversos inventários rápidos anteriores visitaram esses platôs remanescentes (Stallard 2006, 2007, 2011, 2013, García-Villacorta et al. 2010, Stallard et al. 2021).

Seis formações e seus depósitos sedimentares afloram onde a antiga planície foi erodida. A mais antiga é a Formação Solimões/Pebas, depositada no oeste amazônico, a oeste do Arco do Purús, durante grande parte do Mioceno (19–6,5 milhões de anos [Ma]; Jaramillo et al. 2017). Essa formação é muito fossilífera e, por isso, bem datada. A Formação Solimões/Pebas foi depositada sob condições ambientais que favoreceram o acúmulo de minerais de alteração fácil, muitos dos quais liberam nutrientes para plantas e animais (por exemplo, cálcio, magnésio, potássio, sódio, enxofre e fósforo). Ao sul do Arco do Vaupés — incluindo a região do inventário — os sedimentos mais jovens têm cerca de 10 milhões de anos (Jaramillo et al. 2017), indicando que a porção superior da Formação Solimões/Pebas, hoje ainda preservada ao norte do Arco do Vaupés, foi removida por erosão.

Estratigraficamente acima da Formação Solimões/Pebas está a Formação Içá/Nauta Inferior (Formação Amazonas ou Amazônia Terciária Superior na Colômbia [Galvis et al. 1979]; Formação Içá no Brasil [Zavala et al. 1999]), depositada no Plio-Pleistoceno (5–2,3 Ma; Latrubesse et al. 2007, Stallard 2011). Ela possui poucos fósseis e é difícil de datar. Segundo Zavala et al. (1999), a porção inferior da Formação Nauta ocorre nas maiores altitudes — por exemplo, nos divisores entre os maiores rios, como Putumayo e Yaguas. Isso implica que a Formação Nauta inferior foi depositada durante a

formação da antiga planície de inundação. Assim, os solos do terraço mais alto, em torno de 200 m a.n.m., têm milhões de anos e são intensamente lixiviados, com níveis de nutrientes especialmente baixos (García-Villacorta et al. 2010, Stallard 2011). Os sedimentos da Içá/Nauta Inferior contém consideravelmente menos nutrientes do que os sedimentos da Formação Solimões/Pebas.

A Formação Içá/Nauta Superior (depósitos aluviais quaternários na Colômbia; Zavala et al. 1999) provavelmente data de período bem posterior ao início do Pleistoceno (2,3 Ma) e contém concentrações de nutrientes menores do que a Içá/Nauta Inferior (Stallard e Londoño 2016). Por vezes, ela é depositada diretamente sobre a Formação Solimões/Pebas, indicando que houve tempo suficiente para que a Içá/Nauta Inferior fosse erodida e para que a Formação Solimões/Pebas voltasse a aflorar. O contato entre essas formações e a Solimões/Pebas é levemente ondulado, um indício de erosão (Sánchez F. et al. 1999).

Horbe et al. (2013) analisaram seções da Formação Içá em seis locais ao longo do rio Solimões entre Tefé e Coari (a 500 km da nossa área de estudo). Usando minerais acessórios estáveis, identificaram uma porção inferior e outra superior nos afloramentos. Não está claro como essas porções se relacionam com as formações Nauta Inferior e Superior, mas aqui assumiremos que correspondem.

Rossetti et al. (2015) utilizaram uma técnica de datação sofisticada, porém relativamente imprecisa — a luminescência opticamente estimulada (OSL) — para determinar a idade da Formação Içá em seções ao longo de dois rios, um no norte e outro no sul do Brasil. As idades variaram de $65,4 \pm 16,9$ mil anos (ky) a $346,6 \pm 48,6$ ky. Essas datas são muito mais jovens do que a idade Plio-Pleistocena atribuída ao terraço regional. Isso também é consistente com esses sedimentos serem equivalentes ao Nauta Superior pleistocênico. Se a comparação entre Nauta Inferior e Superior for válida, então a Formação Içá Superior é posterior ao terraço regional.

A quinta formação consiste em diversos depósitos fluviais de idade pleistocênica, ricos em nutrientes quando depositados por rios com cabeceiras andinas (por exemplo, Putumayo/Içá) e pobres em nutrientes em outras situações (Kalliola et al. 1993). A sexta formação corresponde a sedimentos fluviais contemporâneos, não consolidados, que se depositam nas várzeas modernas; estes exibem os mesmos padrões de nutrientes observados nos depósitos pleistocênicos. O forte contraste entre as planícies de inundação fluviais e a terra firme é evidente em mapas de relevo sombreado da bacia amazônica (Klammer 1984). As planícies de inundação

mostram um mosaico de estruturas associadas à migração lateral dos canais fluviais ao longo de múltiplas gerações (Klammer 1984).

Geologia regional

Embora os Andes estejam muito a oeste desta região e o Oceano Atlântico ainda mais distante a leste, ambos desempenham papel importante na configuração da região do rio Içá. Diversos conjuntos de dados indicam que o rio Amazonas começou a transportar sedimentos até o oceano aproximadamente há 9 Ma (van Soelen et al. 2017, Albert et al. 2018). As características desse transporte mudaram ao longo do tempo, e essas mudanças parecem estar relacionadas a eventos tectônicos, variações do nível do mar e grandes capturas fluviais (Caputo e Soares 2016, Hoorn et al. 2017, Albert et al. 2018).

O soergimento e a erosão associada são a principal fonte de sedimentos fluviais, mas esse processo não foi um simples fluxo de oeste para leste. O Arco do Purús (Amazônia central brasileira) foi o limite oriental da bacia na qual se depositou a Formação Solimões/Pebas. O soergimento do Arco do Vaupés (sul da Colômbia) e a ruptura do Arco do Purús parecem ter desempenhado papel importante no início do transporte fluvial para leste. Por razões ainda não determinadas, os Andes centrais do Peru e as bacias sedimentares a oeste do Arco de Iquitos não foram as principais fontes de sedimentos do sistema amazônico inicial. Estudos geoquímicos sofisticados de sedimentos da Formação Içá indicam que esses sedimentos derivaram da região do Putumayo e do sul da Colômbia, ou possivelmente do sudoeste do Brasil e dos Andes do sul do Peru e da Bolívia (Horbe et al. 2013). Os sedimentos atuais e aqueles depositados em terraços mais jovens da Formação Içá derivam em grande medida dos Andes centrais do Peru, indicando que o Arco de Iquitos foi eventualmente rompido, expandindo a bacia amazônica e capturando as bacias hidrográficas a oeste.

As flutuações do nível do mar parecem ter desempenhado papel importante na configuração do vale amazônico e na localização dos depósitos sedimentares. Níveis do mar elevados, ao reduzirem o gradiente dos rios, podem promover a formação de terraços a até 3000 km do oceano; níveis do mar baixos, ao aumentarem o gradiente, favorecem incisões profundas do vale a montante. Quando o nível do mar está baixo, o rio Amazonas e seus tributários aprofundam seus canais, formando vales profundos talvez até o Peru (Klammer 1984, Irion et al. 1994, Stallard 2011, Albert et al. 2018).

Quando o nível do mar sobe em seguida, esses vales são preenchidos por sedimentos, formando vastas planícies aluviais (peneplanos) ou mega-leques (Wilkinson et al. 2010). Remanescentes dessas antigas planícies aluviais formam terraços. Como temos uma boa noção da história do nível do mar em escala global (nível eustático; Miller et al. 2005, Müller et al. 2008), as idades desses terraços podem ser estimadas (Klammer 1984).

O Plioceno começou com níveis do mar elevados: 49 m aos 5,33 Ma e 38 m aos 5,475 Ma. O nível de 49 m foi um dos mais altos em muitos milhões de anos e provavelmente teve forte impacto nos depósitos sedimentares em toda a planície amazônica. Seguiram-se numerosas oscilações do nível do mar, sendo a mais baixa de -67 m aos 3,305 Ma, quando sedimentos mais antigos teriam sido profundamente dissecados pela erosão. No início do Pleistoceno (2,6 Ma), o nível do mar aumentou duas vezes (25 m aos 2,39 Ma e 23 m aos 2,35 Ma). As formações Içá/Nauta Inferior e Içá/Nauta Superior e a Formação Iquitos, nas proximidades de Iquitos, tiveram de ser depositadas após o soerguimento mais recente dos Andes setentrionais, mas também após o nível mínimo de 3,305 Ma (Sánchez F. et al. 1999, Latrubesse et al. 2007, Stallard 2011, Stallard e Zapata-Pardo 2013, Stallard e Crouch 2015).

O que se seguiu foi a formação de mantos de gelo e glaciações que geraram enormes e rápidas oscilações do nível do mar, com amplitude crescente ao longo do tempo. O último grande terraço foi formado há 120.000 anos, durante o último período interglacial, quando o nível do mar estava 24 m acima do atual — o mais alto desde o registro de 25 m há 2,39 milhões de anos. A data de 120.000 anos é consistente com as idades medidas por Rossetti et al. (2015) para o que assumo ser a Formação Içá Superior. Isso foi seguido pelo terceiro nível do mar mais baixo (há 20.000 anos, -122 m) registrado em muitos milhões de anos (os outros níveis mínimos foram -124 m há 630.000 anos e -123 m há 440.000 anos). Mais recentemente, o nível do mar subiu rapidamente e, em 20.000 anos, o rio Amazonas — mas não tributários pobres em sedimentos — preencheu seus vales com sedimentos. Mapeamento LiDAR em escala regional, que tem sido uma ferramenta poderosa em escala local para a arqueologia amazônica, poderia contribuir muito para identificar padrões de terraços.

Descontinuidade geológica

Nossos três acampamentos foram estabelecidos próximos a um limite descrito e mapeado em Higgins et al. (2011). O trabalho de campo que fundamenta Higgins et al. (2011)

é um inventário cuidadoso de plantas do sub-bosque ao longo de uma transição, que também foi visitada em vários inventários rápidos. Aproximadamente há 2 Ma, cessou a deposição na vasta planície aluvial descrita acima. Citando Higgins et al. (2011): “Essa descontinuidade parece ser causada pela remoção generalizada de sedimentos superficiais pobres em cátions, expondo sedimentos subjacentes ricos em cátions.” Essa antiga planície aluvial começou a ser entalhada (incisada), talvez em função da queda do nível do mar ocorrida há 2,39 milhões de anos. A incisão vem se ampliando ao longo dos últimos dois milhões de anos. Os remanescentes de topo plano da planície aluvial continuam sofrendo intemperismo, e os solos continuam evoluindo. Como esses sedimentos derivaram de material previamente intemperizado (sedimento fluvial) e ficaram expostos por cerca de dois milhões de anos, os solos formados sobre essa planície aluvial são especialmente pobres em nutrientes. Higgins et al. (2011) afirmam que há 15 vezes menos cátions nesses solos do que nos solos muito mais jovens formados sobre sedimentos aluviais (os mesmos) expostos mais recentemente. A Formação Solimões/Pebas, que subjaz a Formação Nauta/Içá, não é necessariamente parte dessa história.

Dois características permitiram mapear essa descontinuidade com dados obtidos por sensores orbitais. Primeiro, a vegetação associada ao solo antigo é suficientemente distinta da vegetação sobre solos mais jovens para ser diferenciada espectralmente. Segundo, onde a superfície antiga ainda está amplamente intacta (onde ainda existem solos antigos), a topografia é consideravelmente mais suave do que em áreas onde houve erosão. Em essência, o limite de Higgins et al. (2011) é uma descontinuidade erosiva entre solos com cerca de 2 milhões de anos e solos muito mais jovens, formados após a erosão — e não um contato entre formações rochosas. Apesar do contraste nos nutrientes do solo e na composição da comunidade vegetal associada, em geral a diversidade de plantas dos dois tipos de solo não difere de modo marcante (Clinebell et al. 1995). Neste inventário, infelizmente, observamos apenas remanescentes de terra firme e não extensas áreas da antiga superfície elevada.

Solos e geologia

As características dos solos e as comunidades vegetais associadas parecem estar fortemente relacionadas às unidades geológicas subjacentes. Na ausência de afloramentos de embasamento rochoso, e apenas com base na topografia local e nos solos superficiais, é difícil distinguir as formações

Solimões/Pebas, Içá/Nauta Inferior e Içá/Nauta Superior. Os solos da Formação Solimões/Pebas são ricos em cátions e relativamente férteis, enquanto os das formações Plio-Pleistocenas são mais pobres em nutrientes. O desenvolvimento de uma camada espessa (5–25 cm) e contínua de raízes sobre todos os elementos topográficos da paisagem está associado a substratos extremamente pobres. Stark e Holley (1975) e Stark e Jordan (1978) demonstraram experimentalmente que essa camada desempenha papel importante na reciclagem eficiente de nutrientes e, portanto, na sua retenção. Os solos derivados dos sedimentos das formações Içá/Nauta Inferior e Içá/Nauta Superior são recobertos por essa camada de raízes, enquanto os solos desenvolvidos a partir das rochas da Formação Solimões/Pebas não a possuem (Stallard 2005, 2007, 2011, 2013). A maior parte dos solos aluviais associados a rios não andinos também apresenta uma camada de raízes bem desenvolvida.

Geologia econômica

Nenhuma das formações mais antigas contém ouro. No entanto, há ouro suficiente em sedimentos fluviais grossos e em aluviões recentes para tornar a mineração na bacia do Içá atrativa. Na mineração de ouro típica de garimpo clandestino, a contaminação por mercúrio e a destruição de florestas e rios configuram desafios ambientais graves.

Métodos

Visitei locais nos três acampamentos no Alto Içá entre 5 e 20 de maio de 2025. Para mais detalhes sobre os locais de estudo, veja o capítulo Panorama Regional.

O trabalho de campo durante o inventário rápido concentrou-se nas áreas ao longo dos sistemas de trilhas (a pé) e ao longo das margens de igarapés e rios em cada acampamento (a pé e de barco; o terceiro acampamento [São Cristóvão] foi quase exclusivamente por barco). Meu objetivo foi registrar feições distintivas e transições ao longo do trajeto percorrido pela equipe. Entre as feições distintivas estavam formas de relevo, cursos d'água, zonas de solo e transições, zonas de vegetação e transições, feições erosivas e afloramentos. Entre as características examinadas estavam a topografia, o solo, o aspecto da serapilheira e da manta de raízes e as propriedades da água.

Para solos e rocha, por vezes observei cor (Munsell 1954) e textura (Apêndice 1B em Stallard 2005), mas apenas transições marcantes ao longo de trilhas ou deslocamentos de barco

foram registradas. Houve poucas. Sedimentos de igarapés, rocha e solos foram ocasionalmente amostrados para uso como referência durante a redação. Quando possível, essas observações — juntamente com medições de pH e condutividade da água — foram relacionadas à geologia. A equipe de peixes coletou amostras de água e a equipe de botânica coletou solos e sedimentos em locais que eu não visitei. As amostras de água foram incorporadas aos dados reportados. Qualquer material sólido, em sua maioria amostras da Formação Solimões, foi deixado no INPA.

Para descrever drenagens e a química da água na região, examinei o maior número de igarapés possível em cada acampamento. Registrei os seguintes dados: localização geográfica, elevação, velocidade da corrente, cor da água, composição do leito, largura da margem e altura do barranco (Apêndice Y). Para os igarapés, a condutividade específica, o pH e a temperatura da água foram medidos com dois kits impermeáveis de teste de campo da Apera Instruments: o testador AI209 (pH e temperatura) e o AI316 (pH, condutividade elétrica e temperatura). Medi pH, condutividade elétrica (CE) e temperatura *in situ*. A condutividade também foi medida com um condutivímetro Amber Science, que se mostrou mais estável nas condições úmidas. Em cada local prioritário (aqueles com IDs de amostra conforme indicado no Apêndice Y), coletei uma amostra de 30 mL de água para determinar sólidos em suspensão e para repetir medições de pH e condutividade em Manaus. A correspondência entre os dados de campo e os dados de Manaus foi boa. Para esses mesmos locais, uma garrafa de 125 mL foi coletada para análise abrangente de constituintes maiores e nutrientes. Essas amostras foram esterilizadas em campo por luz ultravioleta, usando um Steripen em uma garrafa Nalgene HDPE de 1 L, boca larga. As amostras foram mantidas em sombra total para limitar variações de temperatura e exposição à luz. Todas essas amostras foram armazenadas no INPA para análises futuras.

Incluindo o presente inventário, 12 inventários rápidos utilizaram condutividade e pH para classificar águas superficiais (Stallard 2005, 2007a, 2007b, 2011, 2013, Stallard e Zapata-Pardo 2012, Stallard e Lindell 2014, Stallard e Crouch 2015, Stallard e Londoño 2016, Stallard et al. 2021, Stallard 2025). O uso de pH ($\text{pH} = -\log(\text{H}^+)$) e condutividade para classificar sistematicamente águas superficiais é incomum, em parte porque a condutividade é uma medida agregada de uma grande variedade de íons dissolvidos. Ao examinar águas diluídas e representar os dois parâmetros em um diagrama de dispersão, os dados tipicamente se distribuem em forma de “bumerangue” (ver Fig. YY). Em valores de $\text{pH} < 5,5$, a

condutividade cerca de sete vezes maior dos íons hidrogênio em comparação a outros íons faz com que a condutividade aumente à medida que o pH diminui. Em valores de pH >5,5, outros íons dominam e as condutividades tipicamente aumentam com o aumento do pH. Em inventários anteriores, a relação entre pH e condutividade foi comparada a valores determinados em toda a bacia amazônica e do sistema do rio Orinoco (Stallard e Edmond 1983, Stallard 1985, Edmond et al. 1995; Fig. YY).

Para acompanhar localização em campo, utilizei mapas GPS *on-site* em um iPhone 13 Pro Max e o aplicativo Gaia GPS, com um mapa topográfico de alta resolução da região, além de um Garmin GPSmap 62stc.

Resultados e Discussão

Observações de campo

Houve afloramentos da Formação Solimões próximos ao rio Içá e ao longo de todos os grandes tributários que estudamos. Um afloramento fotografado a montante do acampamento Urutauí pareceu ser da Formação Solimões, com a Formação Içá sobreposta. As camadas também estavam inclinadas, o que geralmente indica algum tipo de atividade tectônica. Também observamos afloramentos com camadas horizontais, com a Formação Içá sobre a Formação Solimões, no igarapé São Cristóvão, rio acima do acampamento satélite.

A paisagem ao redor de cada acampamento pareceu ser quase inteiramente da Formação Içá. Os solos eram franco-argilosos. Em altitudes mais baixas, a manta de raízes era fina e, ocasionalmente, inexistente. Os leitos dos igarapés eram geralmente lamacentos, tornando-se mais arenosos em altitudes maiores; alguns apresentavam leitos de cascalho quartzoso, leitos de fragmentos de canga (ironstone) e, por vezes, uma mistura dos dois. Ocasionalmente, seixos de quartzo foram encontrados sendo erodidos de encostas.

Em cada acampamento, algum trecho do sistema de trilhas atingiu pelo menos 140 m de altitude. Esses locais apresentaram, de longe, a manta de raízes mais espessa e plantas associadas a baixa fertilidade, incluindo, notavelmente, a palmeira caranaí (*Lepidocaryum tenue*). Em altitudes ligeiramente menores, as condutividades dos igarapés variaram entre 6 e 25 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Em altitudes mais elevadas, todos os igarapés apresentaram condutividades entre 5 e 6 $\mu\text{S}/\text{cm}$, corroborando a ideia de que a Formação Içá Inferior é recoberta por aluvião ou solo pobre em nutrientes. No acampamento Urutauí, a extensão da Trilha 1 termina em cerca de 150 m de altitude, em uma campina de topo com

floresta anã, manta de raízes espessa e um solo de areia quartzosa com pouca argila. As encostas laterais do topo sustentavam o que parecia ser uma floresta “de nuvem”, com bromélias abundantes e outras epífitas. Houve um pequeno deslizamento (escorregamento de solo) ao lado da trilha, abaixo da campina; o solo era amarelo-creme, predominantemente argiloso, com alguma areia. Um deslizamento por escorregamento de solo também foi observado na margem direita do igarapé São Cristóvão, rio acima do acampamento satélite.

A equipe do inventário registrou que, durante diferentes sobrevoos e na análise de imagens de satélite, numerosas cicatrizes de deslizamento são visíveis. Etter e Botero (1990) examinaram imagens de satélite e de sobrevoos no sudeste da Colômbia e no Brasil adjacente para avaliar a presença e a abundância de deslizamentos e grandes derrubadas (blowdowns) nessa região. Eles observam que deslizamentos requerem encostas íngremes, típicas do que vimos durante o inventário. Também é necessária chuva intensa. Precipitação suficiente — ao menos cerca de 200 mm por evento — produzirá deslizamentos mesmo em uma paisagem totalmente florestada e natural (Stallard 2023). Note-se que, embora deslizamentos e derrubadas removam árvores, os deslizamentos removem o solo e o banco de sementes associado; as derrubadas não.

Do outro lado do igarapé Urutauí, em frente ao acampamento, há uma extensa área de aluvião plano que provavelmente corresponde a um terraço depositado durante o interglacial anterior. Os solos são planos e arenosos, e há considerável manta de raízes. Essa paisagem plana inclui uma área bem desenvolvida de campina com uma “floresta de varas” envolvendo vegetação mais baixa e densa. Um igarapé de água preta foi amostrado nesse local. Um terraço semelhante ocorreu entre o acampamento Mamuriá e o rio Içá.

Curiosamente, a condutividade do igarapé Urutauí no acampamento (5,6 $\mu\text{S}/\text{cm}$) foi menor do que a condutividade da maioria dos igarapés amostrados no acampamento. Apenas dois igarapés de terra firme apresentaram condutividades menores, ambos com 5,2 $\mu\text{S}/\text{cm}$; os demais tiveram média de 18 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Isso indica que toda a drenagem a montante do igarapé, com 65 km², está drenando rocha e solos mais pobres em nutrientes do que aqueles do sistema de trilhas do acampamento Urutauí.

Houve diversas áreas em que animais vinham comer solos ou beber águas associadas ao solo (localmente chamadas canamás). Uma delas foi amostrada no acampamento Mamuriá. Com base na baixa condutividade da água nesse

local (65 $\mu\text{S}/\text{cm}$), em comparação com barreiros mais acima no rio Putumayo, que apresentam condutividades 3 a 30 vezes maiores, os canamás do Içá podem ser explicados por pequenas exposições da Formação Solimões (as “águas Pebas” podem ter condutividades superiores a 65 $\mu\text{S}/\text{cm}$), e não por nascentes salinas (que podem ser descartadas devido à baixa condutividade observada nesse local).

Síntese

A paisagem ao redor de todos os acampamentos é dominada por sedimentos das formações Içá Inferior (pré-terraço aluvial) e Içá Superior (pós-terraço aluvial). Isso é indicado pelos solos amarelos a marrons, pela areia de quartzo e, às vezes, por cascalho de quartzo ou de canga (ironstone) nos igarapés, bem como pela ocorrência ocasional de cascalho de quartzo ou de canga sendo erodido de encostas.

As medições de química da água (pH e condutividade; ver Figura GEO1) e a cor da água ajudam a refinar essa caracterização (Apêndice GEO1). Muitas das amostras são de águas ultrapuras, com condutividades $<10 \mu\text{S}/\text{cm}$. Isso é consistente tanto com a Formação Içá Inferior quanto com a Içá Superior. Os menores valores, entre 5 e 6 $\mu\text{S}/\text{cm}$, provêm de altitudes mais elevadas (exceto o igarapé Urutauí) e indicam ou a Formação Içá Superior ou os solos da antiga planície aluvial. Excluindo três amostras de águas pretas, a maioria das condutividades é $<30 \mu\text{S}/\text{cm}$, consistente com a Formação Içá Inferior. Todas as águas pretas foram encontradas em remanescentes planos de terraços holocênicos que antecedem a várzea moderna.

Chapter 2—Geology, Hydrology, and Soils

Author: Robert F. Stallard

Conservation targets: Pure waters, vulnerable to contamination, constituting a source of water for human consumption and the primary communication routes between communities; sediments and easily eroded soils covered by a thin root mat that limits erosion and helps retain the necessary nutrients for plants and animals; varied combinations of water regime, substrate and topography supporting diverse habitats, including some 0.3 m-deep peat deposits which develop on old remnant Ice Age terraces, dispersed areas of soils and outcrops rich in minerals, called clay licks (*canamá*), which offer nutrients to animals and constitute centers of fauna observation and traditional hunting; upland areas with soils with white quartz sand

Introduction

Background

The Içá River Basin in Brazil is an extension of the much larger and better researched Putumayo River Basin of Ecuador, Peru, and Colombia. The geological literature of each country presents detailed descriptions of geology in terminology and maps that stop at their national borders. Because most geological features do not recognize borders, the most complete summaries of geology tend to be of international origin and authors. Recent summaries of the geological history of the Amazon River system and adjacent landscapes covering the last 10 million years (Ma) include Hoorn and Wesselingh (2010), Horbe et al. (2013), Menegazzo et al. (2016), Jaramillo et al. (2017), and Albert et al. (2018). A theme that underlies these summaries is that the biodiversity of the modern Amazon Basin is driven by the geocomplexity of the Amazon landscape that was created by this history of geologic changes. Primary among these changes is the rise of the Andes Mountains and the associated breaching of geologic barriers to the east as rivers started to flow in that direction. Other important phenomena over the same time are the substantial (>150 m) oscillations in global eustatic sea level.

This inventory was located within the Solimões tectonic basin in the western Amazon lowlands. The Içá River is incised into an old floodplain that once stretched over northeast Peru and southeast Colombia, from the foothills of the Andes in the west and the Sierra del Divisor in the south to at least to Manaus, and likely to the Atlantic Ocean. Today, the eroded remnants of that plain form small plateaus, reaching nearly 150 m above sea level (masl) in the east and more than 200 masl in the west, characterized by nutrient-poor soils and

vegetation typical of nutrient-poor to very-nutrient-poor tropical forest. Several previous rapid inventories have visited these remnant plateaus (Stallard 2006, 2007, 2011, 2013, García-Villacorta et al. 2010, Stallard et al. 2021).

Six formations and their sedimentary deposits are exposed where the ancient floodplain has been eroded. The oldest is the Solimões/Pebas Formation, deposited in the western Amazon, west of the Purús Arch for much of the Miocene (19–6.5 million years [Ma]; Jaramillo et al. 2017). This formation is very fossiliferous and is therefore well dated. The Solimões/Pebas Formation was deposited under environmental conditions that promoted the accumulation of abundant minerals of easy alteration, many of which release nutrients for plants and animals (e.g., calcium, magnesium, potassium, sodium, sulfur, and phosphorus). South of the Vaupés arch, including in the inventory region, the youngest sediments are about 10 million years old (Jaramillo et al. 2017), an indication that the upper part of the Solimões/Pebas Formation, which is still located north of the Vaupes Arch, was removed by erosion.

Stratigraphically above the Solimões/Pebas Formation is the Lower Içá/Nauta Formation (Amazonas Formation or Upper Tertiary Amazon in Colombia [Galvis et al. 1979], Içá Formation in Brazil [Zavala et al. 1999]), which was deposited in the Plio-Pleistocene (5–2.3 Ma; Latrubesse et al. 2007, Stallard 2011). It has few fossils and is hard to date. According to Zavala et al. (1999), the lower Nauta Formation is found in the highest elevations, for example, in the divides between the largest rivers such as Putumayo and Yaguas. This implies that the lower Nauta Formation was deposited during the formation of the old floodplain. The soils of the highest terrace, about 200 masl, are therefore millions of years old and are heavily leached with especially low nutrient levels (García-

Villacorta et al. 2010, Stallard 2011). The Lower Içá/Nauta sediments contain considerably less nutrients than the Solimões/Pebas Formation sediments.

The Upper Içá/Nauta Formation (Quaternary alluvial deposits of Colombia; Zavala et al. 1999) likely dates significantly after the early Pleistocene (2.3 Ma), and contains lower nutrient concentrations than the Lower Içá/Nauta (Stallard and Londoño 2016). It is sometimes directly deposited over the Solimões/Pebas Formation, indicating that there was sufficient time and erosion of the Lower Içá/Nauta to re-expose the Solimões/Pebas Formation. The contact between these formations and the Solimões/Pebas Formation is slightly undulating, an indication of erosion (Sánchez F. et al. 1999).

Horbe et al. (2013) looked at Içá Formation sections at six sites along the Rio Solimões between Tefé and Coarí (500 km from our study area). Using stable accessory minerals, they identified a lower and an upper part to the outcrops. It is not clear how these relate to the Lower and Upper Nauta Formations, but here we will assume that they correspond.

Rossetti et al. (2015) used a sophisticated but rather imprecise dating technique, optically stimulated luminescence (OSL), to determine the age of the Içá Formation in sections along two rivers, one in northern and the other in southern Brazil. The ages ranged from 65.4 ± 16.9 ky to 346.6 ± 48.6 ky. These dates are much younger than the Plio-Pleistocene age for the regional terrace. This is also consistent with these sediments being equivalent to the Pleistocene Upper Nauta. If one assumes this comparison with the Lower and Upper Nauta Formation is valid, then the Upper Içá Formation postdates the regional terrace.

The fifth formation consists of several Pleistocene-age river deposits that are nutrient-rich when deposited from rivers with Andean headwaters (e.g. the Putumayo/Içá) and nutrient-poor elsewhere (Kalliola et al. 1993). The sixth formation is contemporary non-consolidated riverine sediment settling on the modern floodplains; these show the same nutrient patterns as the Pleistocene deposits. The strong contrast between the riverine floodplains and the *terra firme* is evident in the shaded relief maps of the Amazon Basin (Klammer 1984). The floodplains show a mix of structures associated with the lateral migration of the river channels over multiple generations (Klammer 1984).

Regional geology

Although the Andes are far to the west of this region and the Atlantic Ocean is even farther to the east, both play an important role in shaping the Rio Içá region. A variety of data indicates that the Amazon River began transporting sediment to the ocean approximately 9 Ma ago (van Soelen et al. 2017, Albert et al. 2018). The characteristics of this transport changed over time, and these changes seem to be related to tectonic events, changes in sea level, and large river captures (Caputo and Soares 2016, Hoorn et al. 2017, Albert et al. 2018).

Uplift and associated erosion is the main source of river sediment, but it has not been straightforward west to east. The Purús Arch (middle Brazilian Amazon) was the eastern limit of the basin in which the Solimões/Pebas Formation was deposited. The uplift of the Vaupés Arch (southern Colombia) and the breach of the Purús Arch seem to have played an important role in the initiation of river transport to the east. For still undetermined reasons, the Peruvian central Andes and the sedimentary basins to the west of the Iquitos Arch were not the main sediment sources of the early Amazon River system. Sophisticated geochemical studies of sediments from the Içá Formation indicate that the sediments were derived from the Putumayo region and southern Colombia or possibly from southwestern Brazil and the southern Peruvian and Bolivian Andes (Horbe et al. 2013). The current sediments and those deposited on younger terraces of the Içá Formation are largely derived from the Peruvian central Andes, indicating that the Iquitos Arch was eventually breached, expanding the Amazon River basin and capturing the hydrographic basins to the west.

Fluctuations of sea level seem to have played an important role in the configuration of the Amazon Valley and where sediment was deposited. High sea levels, by decreasing the river gradient, can promote the formation of terraces up to 3000 km from the ocean, and low sea levels, by increasing the river gradient, favor deep incisions in the valley upstream. When the sea level is low, the Amazon River and its tributaries cut into its channels forming deep valleys, perhaps as far as Peru (Klammer 1984, Irion et al. 1994, Stallard 2011, Albert et al. 2018). When the sea level subsequently rises, these valleys are filled with sediment, forming vast alluvial plains (peneplains) or mega-fans (Wilkinson et al., 2010). Remnants of the old alluvial plains form terraces. Because we have a reasonable idea about the history of sea level at the global scale (eustatic sea level; Miller et al. 2005, Müller et al. 2008), the ages of these terraces can be estimated (Klammer, 1984).

The Pliocene began with high sea levels: 49 m at 5.33 Ma and 38 m at 5.475 Ma. The 49-m sea level was one of the highest levels in many millions of years, and probably had a strong impact on the sediment deposits across the Amazon lowland. Numerous sea level oscillations followed, the lowest being from -67 m at 3.305 Ma, during which older sediments would have been deeply dissected by erosion. At the beginning of the Pleistocene (2.6 Ma) the sea level increased twice (25 m at 2.39 Ma and 23 m at 2.35 Ma). The Lower Içá/Nauta and Upper Içá/Nauta Formations and the Iquitos Formation near Iquitos all had to be deposited after the most recent uplift of the Northern Andes but also after the lowest sea level at 3.305 Ma (Sánchez F. et al. 1999, Latrubesse et al. 2007, Stallard 2011, Stallard and Zapata-Pardo 2013, Stallard and Crouch 2015).

What followed was the formation of ice sheets and glaciations that created huge, rapid oscillations in sea levels that increased in amplitude over time. The last large terrace was formed 120,000 years ago, during the last interglacial period, when the sea level was 24 m higher than the current one, being the highest since the 25 m record 2.39 million years ago. The 120,000 year-ago date is consistent with the ages measured by Rosettie et al. (2015) for what I assume is the Upper Içá Formation. This was followed by the third lowest sea level (20,000 years ago, of -122 m) recorded in many millions of years (the other lowest levels were -124 m 630,000 years ago and -123 m 440,000 years ago). Most recently, sea level rose rapidly, and in 20,000 years the Amazon River, but not sediment-poor tributaries, filled their valleys with sediment. Regional-scale LiDAR mapping, which has been a powerful tool at a local scale for Amazonian archeology, could do much to identify terrace patterns.

Geological discontinuity

Our three camps were established near a boundary described and drawn in Higgins et al. (2011). The fieldwork that underpins Higgins et al. (2011) is a careful inventory of understory plants across a transition, one that has also been visited in several rapid inventories. Roughly 2 Ma ago deposition ended on a vast alluvial plain, just described. Quoting Higgins et al. (2011), “This discontinuity appears to be caused by the widespread removal of cation-poor surface sediments to expose cation-rich sediments underneath.” This old alluvial plain started to be incised, perhaps because of a drop in sea level that happened at 2.39 million years ago. The incision has grown over the last two million years. The remnants of the flat-topped alluvial plain are still weathering

and soils are still evolving. Because these sediments were derived from previously weathered material (river sediment) and have been exposed for roughly two million years, the soils that have formed on this alluvial plain are especially nutrient-poor. Higgins et al. (2011) state that there are 15-fold less cations in these soils than in the much younger soils formed on (the same) more recently exposed alluvial sediments. The Solimões/Pebas Formation that underlies the Nauta/Içá Formation is not necessarily part of this story.

Two features allowed the mapping of this discontinuity using space-based data. First, the vegetation of the ancient soil is sufficiently different from that on the younger soils that it can be distinguished spectrally. Second, where the old surface is still largely intact (where there are still old soils), it has considerably smoother topography than areas where it has been eroded. In essence, the Higgins et al. (2011) boundary is an erosional discontinuity between 2 million year-old soils and much younger post-erosion soils and not a contact boundary between rock formations. Despite the contrast in soil nutrients and the composition of the associated plant community, in general the plant diversity of the two soil types does not differ markedly (Clinebell et al. 1995). In this inventory, unfortunately, we saw just upland remnants and not extensive areas of the old upland surface.

Soils and geology

Soil characteristics and associated plant communities appear to be strongly related to the underlying geological units. In the absence of bedrock exposure, and only based on local topography and surface soils, the Solimões/Pebas, Lower Içá/Nauta, and Upper Içá/Nauta Formations are difficult to distinguish. The soils of the Solimões/Pebas Formation are rich in cations and relatively fertile, while those of the Plio-Pleistocene formations are poorer in nutrients. The development of a thick (5–25 cm) and continuous root layer over all the topographic elements of the landscape is associated with extremely poor substrates. Stark and Holley (1975) and Stark and Jordan (1978) have experimentally demonstrated that this layer plays an important role in the efficient recycling of nutrients and therefore in their retention. The soils that come from the sediments of the Lower Içá/Nauta and Upper Içá/Nauta Formations are covered with the root layer, whereas the soils developed from the rocks of the Solimões/Pebas Formation lack it (Stallard 2005, 2007, 2011, 2013). Most of the alluvial soils associated with non-Andean rivers have a well-developed root layer.

Economic geology

None of the older formations are gold-bearing. Enough gold is found in coarse river sediments and recent alluvium, however, to make mining in the Içá basin attractive. For typical renegade gold mining, mercury contamination and forest and river destruction make for serious environmental challenges.

Methods

I visited sites at the three camps in the Upper Içá on 5–20 May 2025. For more details on the study sites see Fig. xx and the *Regional panorama* chapter on page xx.

Fieldwork during the rapid inventory focused on areas along the trail systems (by foot) and along the stream and riverbanks at each camp (by foot and boat; the third camp [São Cristóvão] was almost exclusively by boat). My aim was to record distinctive features and transitions along the team's route. Distinctive features included landforms, streams, soil zones and transitions, vegetation zones and transitions, and erosional features, and outcrops. Among the characteristics examined were topography, soil, appearance of leaf litter and root mat, and water properties.

For soils and bedrock, color (Munsell 1954) and texture (Appendix 1B in Stallard 2005) were sometimes observed, but only outstanding transitions along trails or boat rides were noted. There were few. Stream sediments, bedrock, and soils were occasionally sampled to use for reference during writing. If possible, these observations along with measured pH and conductivity of stream water were connected to geology. The fish team collected water samples and the botany team collected soils and sediment in places where I did not go. Water samples were added to the reported data. Any solid material, mostly samples of the Solimões Formation, was left at INPA.

To describe drainages and water chemistry in the region, I examined as many streams as reasonable at each campsite. The following data were recorded: geographic location, elevation, current speed, water color, streambed composition, bank width, and bank height (Appendix Y). For streams, water specific conductivity, pH, and temperature were measured with two waterproof field-testing kits by Apera Instruments: the AI209 pH and temperature tester and the AI316 pH, electrical conductivity, and temperature tester. I measured pH, electrical conductivity (EC), and temperature *in situ*. Conductivity was also measured using an Amber Science conductivity meter, which proved to be more stable in the moist conditions. One 30-mL sample of water was collected at

each priority site (those with sample ID's as indicated in Appendix Y), to determine suspended solids and to re-measure pH and conductivity in Manaus. The match between field data and Manaus data was good. For these same sites, one 125-mL bottle was collected for a comprehensive analysis of major constituents and nutrients. These samples were sterilized, in the field, using ultraviolet light from a Steripen in a 1-L wide-mouth HDPE Nalgene bottle. The samples were stored in full shade to limit temperature variation and exposure to light. All these samples were stored at INPA for future analysis.

Including the present inventory, 12 rapid inventories have used conductivity and pH to classify surface waters (Stallard 2005, 2007a, 2007b, 2011, 2013, Stallard and Zapata-Pardo 2012, Stallard and Lindell 2014, Stallard and Crouch 2015, Stallard and Londoño 2016, Stallard et al. 2021, Stallard 2025). The use of pH ($\text{pH} = -\log(\text{H}^+)$) and conductivity to classify surface waters in a systematic way is uncommon, in part because conductivity is an aggregate measurement of a wide variety of dissolved ions. When examining dilute waters and the two parameters are graphed in a scatterplot, the data are typically distributed in a boomerang shape (see Fig. YY). At values of $\text{pH} < 5.5$, the seven-fold greater conductivity of hydrogen ions compared to other ions causes conductivity to increase with decreasing pH. At values of $\text{pH} > 5.5$, other ions dominate, and conductivities typically increase with increasing pH. In previous inventories, the relationship between pH and conductivity was compared to values determined from across the Amazon and Orinoco River systems (Stallard and Edmond 1983, Stallard 1985, Edmond et al. 1995; Fig. YY).

To track location in the field, I deployed onsite GPS maps using an iPhone 13 Pro Max and the application Gaia GPS, with a fine-scale topographic map of the region, as well as a Garmin GPSmap 62stc.

Results and Discussion

Field observations

There were outcrops of the Solimões Formation near the Río Içá and along all the large tributaries we studied. An outcrop photographed upstream of the Urutauí Camp appeared to be the Solimões Formation with the Içá Formation on top. The beds were also tilted, usually an indication of some sort of tectonic activity. We also saw flat-lying outcrops with Içá Formation over Solimões Formation on the Igarapé São Cristóvão, upriver from the satellite camp.

The landscape around each camp appeared to be almost entirely Içá Formation. Soils were loamy. At lower elevations, root mat was thin and occasionally nonexistent. Stream beds were generally mud, becoming sandier at higher elevations; some had quartz-gravel beds, ironstone-fragment beds, and sometimes a mixture of the two. Occasionally, quartz pebbles were encountered eroding out of slopes.

At each camp, some part of the trail system attained at least 140 m in elevation. These sites had by far the thickest root mat and nutrient-poor-associated plants, including, notably, the caranaí palm (*Lepidocaryum tenue*). At slightly lower elevations, stream conductivities varied between 6 and 25 $\mu\text{S}/\text{cm}$. At the higher elevations, all the streams had conductivities between 5 and 6 $\mu\text{S}/\text{cm}$, supporting the idea that the Lower Içá Formation is topped by nutrient-poor alluvium or soil. At Camp Urutauí, the Trail 1 extension ends at about 150 m elevation in a summit campina with dwarf forest, thick root mat, and a quartz-sand soil with little clay. The side slopes of the summit supported what appeared to be cloud forest with abundant bromeliads and other epiphytes. There was a small landslide (a soil slip) next to the trail below the campina; the soil was creamy yellow, dominantly clay with some sand. A soil-slip landslide was also seen on the right side of Igarapé São Cristóvão, upriver from the satellite camp.

The inventory team noted that during various overflights and examination of satellite images, numerous landslide scars are visible. Etter and Botero (1990) examined images from satellites and overflights for southeastern Colombia and adjacent Brazil to assess the presence and abundance of landslides and large blow downs in this region. They note that landslides require steep hillslopes typical of what we saw during the inventory. Substantial rain is also required. Enough rain, at least about 200 mm per storm, will produce landslides even in a fully naturally forested landscape (Stallard, 2023). Note that while landslides and blowdowns both remove trees, landslides remove the soil and associated seed bank; blowdowns do not.

Across the Igarapé Urutauí from the camp is an extensive area of flat alluvium that was likely a terrace deposited during the previous interglacial. The soils are flat and sandy, and there is considerable root mat. This flat landscape included a well developed area of campina with a pole forest surrounding shorter, denser vegetation. A black-water stream was sampled here. A similar terrace was between Camp Mamuriá and the Rio Içá.

Interestingly, the conductivity of Igarapé Urutauí at the camp, 5.6 $\mu\text{S}/\text{cm}$, was lower than the conductivity of most of the streams sampled at the camp. Only two upland streams had lower conductivities, both 5.2 $\mu\text{S}/\text{cm}$; the remainder averaged 18 $\mu\text{S}/\text{cm}$. This indicates that the entire upstream drainage, 65 km², of the Igarapé is draining bedrock and soils that are more nutrient poor than those of the Camp Urutauí trail system.

There were several areas where animals came to eat soils or drink soil waters (locally called *canamás*). One was sampled at Camp Mamuriá. Based on the low conductivity of the water at this site (65 $\mu\text{S}/\text{cm}$) compared to salt licks farther up the Putumayo River, which have 3–30 times this conductivity, the Içá *canamás* could be explained by small exposures of the Solimões Formation (Pebas waters can have conductivities greater than 65 $\mu\text{S}/\text{cm}$) rather than salt springs (which could be excluded because of the low conductivity at this one site).

Synthesis

The landscape surrounding all camps is dominated by sediments from the Lower (pre-alluvial terrace) and Upper (post-alluvial terrace) Içá Formations. This is indicated by the yellow to brown soils, quartz sand and sometimes quartz or iron-stone gravel in streams, and occasional quartz or iron-stone gravel eroding from hillslopes.

Water chemistry measurements (pH and conductivity, see Figure GEO1) and water color help refine this characterization (Appendix GEO1). Many of the samples are ultrapure waters having conductivities of <10 $\mu\text{S}/\text{cm}$. These are consistent with both the Lower and Upper Içá Formation. The lowest values, between 5 and 6 $\mu\text{S}/\text{cm}$, are from higher altitudes, except for the Igarapé Urutauí, and indicate either the Upper Içá Formation or the soils of the old alluvial plain. Excluding three samples of black waters, most conductivities are <30 $\mu\text{S}/\text{cm}$, consistent with the Lower Içá Formation. All black waters were found in flat remnants of Holocene terraces that predate the modern *várzea*.

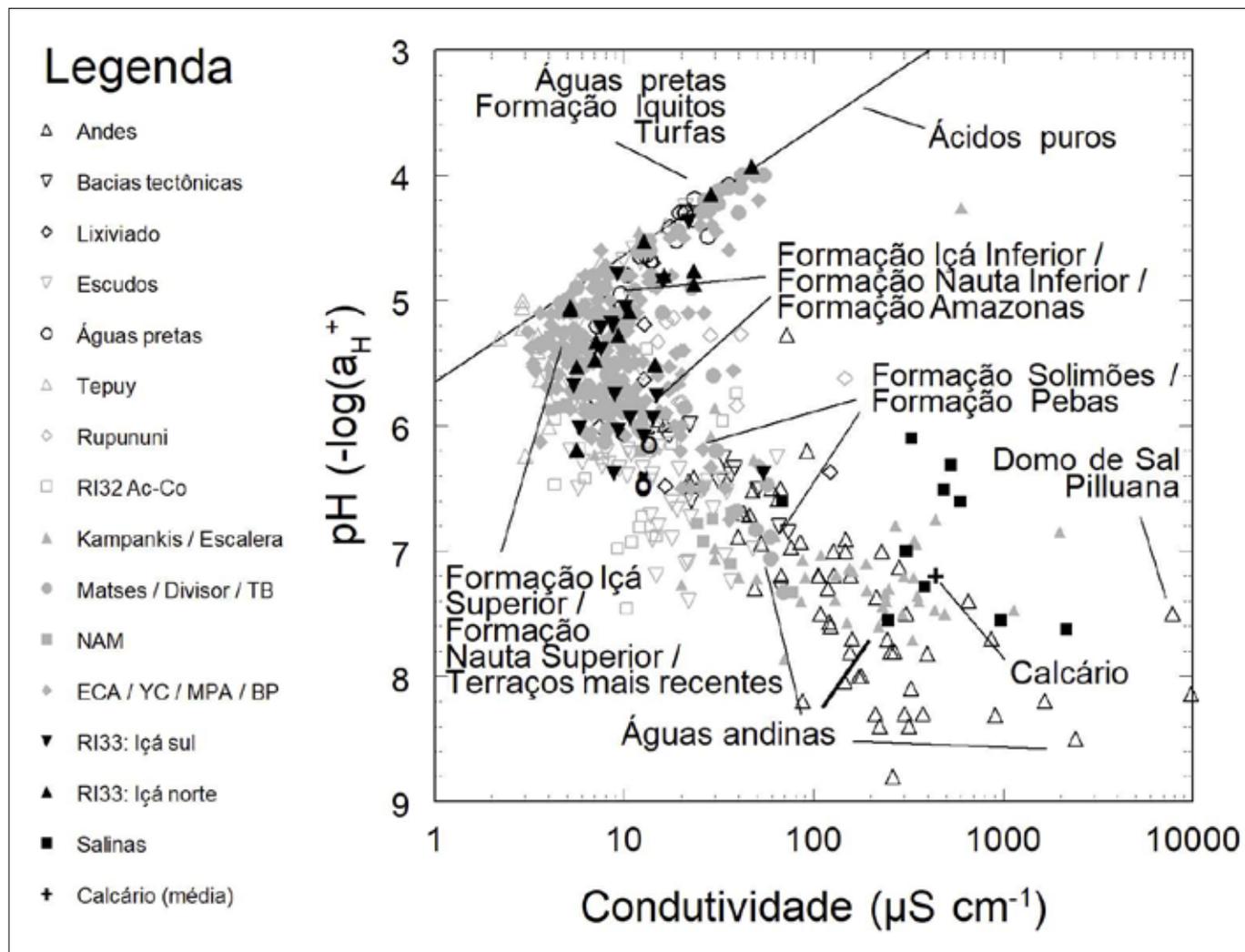


Figura 1. Medições de campo de pH e condutividade de águas coletadas na bacia do Içá e em outros locais da América do Sul. A condutividade está em micro-Siemens por centímetro ($\mu\text{S}/\text{cm}$). Os símbolos cinza abertos representam amostras de água de igarapés coletadas em inventários anteriores no Escudo das Guianas. Os símbolos cinza claro preenchidos representam amostras coletadas durante 10 inventários anteriores na Amazônia peruana (ver referências no texto) e espera-se que sejam semelhantes às águas encontradas na bacia do Içá. Os símbolos pretos abertos correspondem a numerosas amostras coletadas em outras partes das bacias Amazônica e do Orinoco. As amostras da bacia do Içá são representadas por símbolos pretos preenchidos.

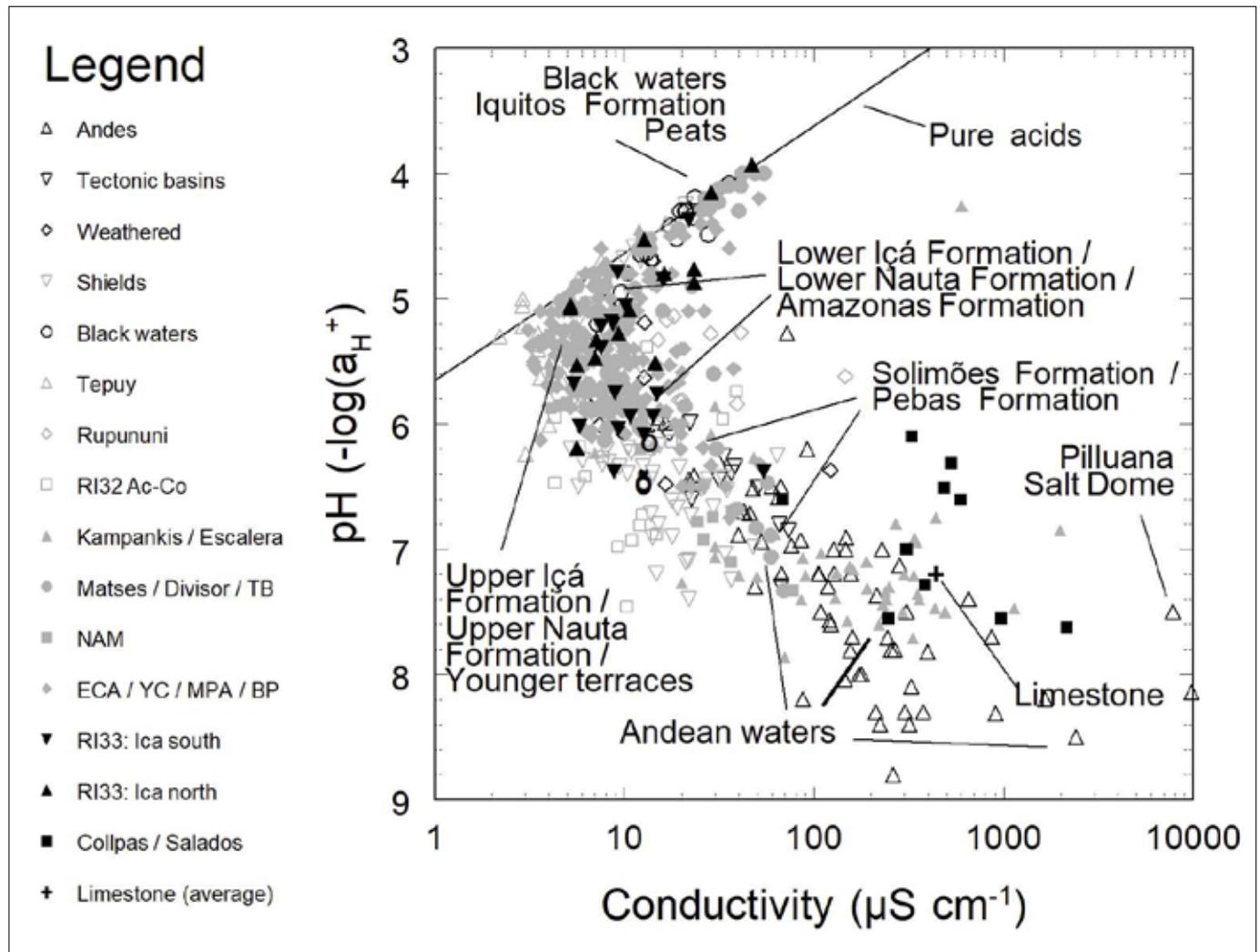


Figure 1. Field measurements of pH and conductivity of water collected in the Içá basin and from other sites in South America. Conductivity is in micro-Siemens per cm ($\mu\text{S}/\text{cm}$). The open gray symbols represent stream-water samples collected from previous Guiana Shield inventories. The solid light gray symbols represent samples collected during 10 previous inventories in Amazonian Peru (see references in text) and are expected to be like waters encountered in the Içá basin. The open black symbols correspond to numerous samples collected elsewhere across the Amazon and Orinoco basins. Samples from the Içá basin are plotted as solid black symbols.

APPENDIX 1

Biogeochemistry Stream Observations										
Site	Sample	Collector	Latitude	Longitude	Elevation	Date & Time	Temperature C	pH	Conductivity µS/cm	
C1 T1 0000	Ig. Sara	0	-2.978	-69.415	63.6	0	25.5	5.94	10.7	
C1 T1 0910	Stream to trail left	0	-2.984	-69.410	98.1	0	24.9	5.20	8.7	
C1 T1 1600	Stream to trail left	0	-2.990	-69.410	81.4	0	24.9	5.22	7.5	
C1 T1 1820	Stream to trail left	0	-2.992	-69.410	100.9	0	25.5	5.68	5.4	
C1 T3 1005	Fish stream	0	-2.984	-69.419	92.6	1900-01-00	--	6.09	12.7	
C1 T3 2750	Fish stream	0	-2.982	-69.421	90.1	1900-01-00	--	5.94	14.2	
C1 T3 4050	Fish stream	0	-2.973	-69.419	83.0	1900-01-00	--	6.38	54.1	
C1 T2 0575	Stream to trail left	0	-2.976	-69.410	73.5	1900-01-00	25.2	6.02	5.8	
C1 T2 4150	Stream to trail right	0	-2.983	-69.401	81.4	1900-01-00	25.4	4.85	16.0	
C1 T2 2750	Fish stream	0	-2.977	-69.397	91.7	1900-01-00	--	5.75	8.9	
C1 T2 3750	Fish stream	0	-2.984	-69.400	113.8	1900-01-00	--	6.04	9.3	
C1 T3 canamá	Mud lick	0	-2.975	-69.419	71.1	1900-01-00	25.5	6.60	68.2	
C1 T4 2900	Fish stream	0	-3.008	-69.384	93.3	1900-01-00	--	4.37	21.8	
C1 T4 3450	Fish stream	0	-3.004	-69.386	94.8	1900-01-00	--	4.79	9.2	
C1 T4 4400	Ig. Itú	0	-3.019	-69.375	86.1	1900-01-00	--	5.06	10.1	
C2 T2 1900	Fish stream	0	-2.711	-69.451	91.1	1900-01-00	--	6.19	5.6	
C2 T2 2700	Fish stream	0	-2.713	-69.444	103.7	1900-01-00	--	5.09	10.6	
C2 Ig. Ururutauí	Ig. Ururutauí	0	-2.726	-69.455	87.0	1900-01-00	26.8	5.53	5.6	
C2 T1 0075	Stream to trail right	0	-2.728	-69.456	72.2	1900-01-00	25.6	4.80	16.2	
C2 T1 0575	Stream to trail right	0	-2.728	-69.451	78.0	1900-01-00	25.4	4.76	23.2	
C2 T1 0675	Stream to trail right	0	-2.728	-69.451	85.0	1900-01-00	25.5	5.51	14.5	
C2 T1 0825	Stream to trail left	0	-2.729	-69.450	88.7	1900-01-00	25.7	5.47	7.0	
C2 T1 1350	Stream to trail left	0	-2.730	-69.446	87.3	1900-01-00	25.6	4.87	23.2	
C2 T1 1720	Stream to trail left	0	-2.731	-69.443	86.6	1900-01-00	25.4	5.33	7.1	
C2 T1 2080	Stream to trail left	0	-2.732	-69.437	99.0	1900-01-00	25.8	5.28	9.3	
C2 T1 2850	Stream to trail right	0	-2.731	-69.435	109.0	1900-01-00	25.7	5.07	5.2	
C2 T3 0510	Stream to trail right	0	-2.726	-69.463	78.4	1900-01-00	25.6	4.53	12.7	
C2 T3 2230	Stream to trail left	0	-2.732	-69.476	89.4	1900-01-00	25.7	4.15	28.6	
C2 T3 2780	Stream to trail right	0	-2.733	-69.480	86.9	1900-01-00	26.2	3.93	46.9	
C2 T1-EXT, 600m	Fish stream	0	-2.729	-69.427	103.0	1900-01-00	--	5.05	5.2	
C3, Ig. São Cristovão	Ig. São Cristovão	0	-2.988	-69.577	62.6	1900-01-00	26.2	5.39	7.5	
C3, Ig. Epingarda	Ig. Epingarda	0	-2.995	-69.578	75.9	1900-01-00	25.6	5.18	8.5	
C3 T1 4600	Fish stream	0	-3.041	-69.568	94.0	1900-01-00	--	6.38	8.8	
C3, Rio Içá	Rio Içá	0	-2.970	-69.583	58.0	1900-01-00	27.8	5.76	14.8	

	Flow	Bank material	Bed material	Bank height	Depth	Width	Water color	Sample #
	moderate	brown mud	brown mud	1.5	0.25	3.5	brown, slightly turbid	AM250001
	moderate	brown mud	brown mud	1.5	0.25	2.5	brown, slightly turbid	NO
	slight	brown mud	yellow sand + brown mud	1.5	0.2	1.75	brown, slightly turbid	NO
	moderate	yellow mud, some sand	light yellow sand	2.5	0.35	5.5	light brown, slightly turbid	AM250002
	--	--	--	--	--	--	--	NO
	--	--	--	--	--	--	--	NO
	--	--	--	--	--	--	--	NO
	big	brown mud	brown mud	1.5	0.25	3.5	brown, slightly turbid	NO
	slight	yellow mud, some sand	brown mud	1.5	0.2	1.75	light brown, slightly turbid	AM250003
	--	--	--	--	--	--	--	NO
	--	--	--	--	--	--	--	NO
	slight	brown mud	brown mud	0.2	0.2	2	clear	AM250004
	--	--	--	--	--	--	--	NO
	--	--	--	--	--	--	--	NO
	--	--	--	--	--	--	--	AM250005
	--	--	--	--	--	--	--	NO
	--	--	--	--	--	--	--	NO
	enormous	varied	varied	8	4	50	light brown, slightly turbid	AM250006
	tiny	brown mud	brown mud	0.5	0.2	1	clear	NO
	tiny	brown mud	brown mud	0.5	0.2	1	clear	NO
	moderate	brown mud	brown sand	1.5	0.2	3.5	clear	AM250007
	tiny	brown mud	brown sand	1	0.2	2	clear	NO
	tiny	brown mud	brown mud	1	0.2	2	clear	NO
	big	brown mud	brown sand	1.5	0.2	3.5	clear	NO
	tiny	brown mud	brown sand, gravel	0.5	0.1	1.75	clear	NO
	tiny	brown mud	brown sand	0.75	0.1	2	clear	NO
	moderate	brown mud	brown sand	1	0.4	2	light brown, slightly turbid	NO
	moderate	brown mud	brown sand	1	0.4	2.5	brown, clear	NO
	good	leaves	leaves	0.5	0.3	1	brown, clear	AM250008
	--	--	--	--	--	--	--	AM250009
	steady	varied	varied	8	4	50	brown, turbid	AM250010
	steady	varied	varied	flooded	flooded	flooded	brown, turbid	AM250011
	--	--	--	--	--	--	--	NO
	enormous	varied	varied	flooded	flooded	flooded	brown, turbid	AM250012

APPENDIX 2

Water Samples										
C1 T1 0000 lg. Sara	RFS	2025-05-05	13:40	-2.97753	-69.4147	T1 0000	25.5	10.7	5.94	
C1 T1 0910 str TL mod	RFS	2025-05-06	8:55	-2.98415	-69.41017	T1 0910	24.9	8.7	5.2	
T1 1600 str TL slight	RFS	2025-05-06	9:45	-2.99015	-69.41024	T1 1600	24.9	7.5	5.22	
C1 T1 1820 str TL big, sandy	RFS	2025-05-06	10:10	-2.99165	-69.40978	T1 1820	25.5	5.4	5.68	
C1 T3 1005	Fish	2025-05-06				T3 1005		12.7	6.09	
C1 T3 2750	Fish	2025-05-06				T3 2750		14.2	5.94	
C1 T3 4050	Fish	2025-05-06				T3 4050		54.1	6.38	
C1 T2 0573 str TL big	RFS	2025-05-07	9:00	-2.97641	-69.41032	T2 0575	25.2	5.8	6.02	
C1 T2 4150 str TR pipe	RFS	2025-05-07	13:00	-2.98313	-69.4009	T2 4150	25.4	16	4.85	
C1 T2 2750	Fish	2025-05-07				T2 2750		8.9	5.75	
C1 T2 3750	Fish	2025-05-07				T2 3750		9.3	6.04	
C1 T4 2900	Fish	2025-05-08				T4 2900		21.8	4.37	
C1 T4 3450	Fish	2025-05-08				T4 3450		9.2	4.79	
C1 T4 4400 Itú	Fish	2025-05-08				T4 4400		10.1	5.06	
C1 T3 Camaná	RFS	2025-05-08	11:00	-2.97463	-69.41946	T3 canama	25.5	68.2	6.6	
C2 lg. Ururutauí	RFS	2025-05-12	8:30	-2.72836	-69.44647	C2 lg. Ururutauí	26.8	5.6	5.53	
C2 T2 1900	Fish	2025-05-11				C2 T2 1900		5.6	6.19	
C2 T2 3700	Fish	2025-05-11				C2 T2 2700		10.6	5.09	
C2 T1 0075 str TR tiny	RFS	2025-05-12	8:00	-2.72553	-69.45528	C2 T1 0075	25.6	16.2	4.8	
C2 T1 0575	RFS	2025-05-12	8:30	-2.72755	-69.45135	C2 T1 0575	25.4	23.2	4.76	
C2 T1 0675 str TL mod	RFS	2025-05-12	9:00	-2.72795	-69.45071	C2 T1 0675	25.5	14.5	5.51	
C2 T1 0825 str TL tiny	RFS	2025-05-12	10:30	-2.72888	-69.44971	C2 T1 0825	25.7	7	5.47	
C2 T1 1350 str TL tiny	RFS	2025-05-12	12:30	-2.73033	-69.44583	C2 T1 1350	25.6	23.2	4.87	
C2 T1 1720 str TL big	RFS	2025-05-12	13:00	-2.73081	-69.4425	C2 T1 1720	25.4	7.1	5.33	
C2 T1 2080 str TL tiny	RFS / Fish	2025-05-12	13:30	-2.7324	-69.43707	C2 T1 2080	25.8	9.3	5.28	
C2 T1 2850 str TR tiny	RFS	2025-05-12	14:00	-2.73101	-69.43501	C2 T1 2850	25.7	5.2	5.07	
C2 T3 0510 str TR mod	RFS	2025-05-13	8:30	-2.72562	-69.46297	C2 T3 0510	25.6	12.7	4.53	
C2 T3 2230 str TL mod	RFS	2025-05-13	10:00	-2.72622	-69.46429	C2 T3 2230	25.7	28.6	4.15	
C2 T3 2780 str TR tiny	RFS	2025-05-13	11:00	-2.73314	-69.47962	C2 T3 2780	26.2	46.9	3.93	
C2 T1-EXT, 600m	fish	2025-05-13				C2 T1-EXT, 600m		5.2	5.05	
C3, lg. São Cristovão	RFS	2025-05-17	15:15	-2.98723	-69.57692	C3, lg. Sno Cristovno	26.2	7.5	5.39	
C3, lg. Epingarda	RFS	2025-05-18	15:15	-2.99529	-69.57832	C3, lg. Epingarda	25.6	8.5	5.18	
C3 T1 4600	fish	2025-05-18				C3 T1 4600		8.8	6.38	
C3, Rio Içá	RFS	2025-05-19	12:00	-2.96953	-69.58255	C3, Rio IH<	27.8	14.8	5.76	
C3, Rio Içá	Rio Içá	0	-2.970	-69.583	58.0	27.8	5.76	14.8		

Legend

str = stream

TL = flows to trail left

TR = flows to trail right

	moderate	brown mud	brown mud	1.5	0.25	3.5	brown, slightly turbid	AM250001
	moderate	brown mud	brown mud	1.5	0.25	2.5	brown, slightly turbid	NO
	slight	brown mud	yellow sand + brown mud	1.5	0.2	1.75	brown, slightly turbid	NO
	moderate	yellow mud, some sand	light yellow sand	2.5	0.35	5.5	light brown, slightly turbid	AM250002
								NO
								NO
								NO
	big	brown mud	brown mud	1.5	0.25	3.5	brown, slightly turbid	NO
	slight	yellow mud, some sand	brown mud	1.5	0.2	1.75	light brown, slightly turbid	AM250003
								NO
								NO
								NO
		light brown, slightly turbid						AM250005
	slight	brown mud	brown mud	0.2	0.2	2	clear	AM250004
	Enormous	varied	varied	8	4	50	light brown, slightly turbid	AM250006
							clear	NO
							clear	NO
	tiny	brown mud	brown mud	0.5	0.2	1	clear	NO
	tiny	brown mud	brown mud	0.5	0.2	1	clear	NO
	moderate	brown mud	brown sand	1.5	0.2	3.5	clear	AM250007
	tiny	brown mud	brown sand	1	0.2	2	clear	NO
	tiny	brown mud	brown mud	1	0.2	2	clear	NO
	big	brown mud	brown sand	1.5	0.2	3.5	clear	NO
	tiny	brown mud	brown sand, gravel	0.5	0.1	1.75	clear	NO
	tiny	brown mud	brown sand	0.75	0.1	2	clear	NO
	moderate	brown mud	brown sand	1	0.4	2	light brown, slightly turbid	NO
	moderate	brown mud	brown sand	1	0.4	2.5	brown, clear	NO
	good	leaves	leaves	0.5	0.3	1	brown, clear	AM250008
							clear	AM250009
	steady	varied	varied	8	4	50	brown, turbid	AM250010
	steady	varied	varied	flooded	flooded	flooded	brown, turbid	AM250011
							clear	NO
	enormous	varied	varied	flooded	flooded	flooded	brown, turbid	AM250012
	enormous	varied	varied	flooded	flooded	flooded	brown, turbid	AM250012

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS / BIBLIOGRAPHY

- Albert, J.S., Val, P., & Hoorn, C. 2018.** The changing course of the Amazon River in the Neogene: center stage for Neotropical diversification. *Neotropical Ichthyology*, 16(3), e180033.
- Caputo, M.V., & Soares, E.A.A. 2016.** Eustatic and tectonic change effects in the reversion of the transcontinental Amazon River drainage system. *Brazilian Journal of Geology*, 46(2), 301–328.
- Clinebell, R.R.I., Phillips, O.L., Gentry, A.H., Stark, N., & Zuuring, H. 1995.** Prediction of neotropical tree and liana species richness from soil and climatic data. *Biodiversity and Conservation*, 4(1), 56–90.
- Edmond, J.M., Palmer, M.R., Measures, C.I., Grant, B., & Stallard, R.F. 1995.** The fluvial geochemistry and denudation rate of the Guayana Shield in Venezuela, Colombia, and Brazil. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(16), 3301–3325.
- Etter, A., & Botero, P.J. (1990).** Efectos de procesos climáticos y geomorfológicos en la dinámica del bosque húmedo tropical de la Amazonia colombiana. *Colombia Amazonica*, 4(2), 7–21.
- García-Villacorta, R., Dávila, N., Foster, R., Huamantupa, I., & Vriesendorp, C. 2006.** Vegetación y flora/Vegetation and flora. In *Perú: Majuna* edited by M.P. Gilmore, C. Vriesendorp, W. S. Alverson, Á. Del Campo, R. Von May, C. López Wong, & S. Ríos Ochoa, pp. 58–61, 160–163, 218–219, 248. Chicago, Illinois: The Field Museum.
- Higgins, M.A., Ruokolainen, K., Tuomisto, H., Llerena, N., Cardenas, G., Phillips, O.L., Vásquez, R., Räsänen, M. 2011.** Geological control of floristic composition in Amazonian forests. *Journal of Biogeography*, 38(11), 2136–2149.
- Hoorn, C., & Wesselingh, F.P. 2010.** *Amazonia: Landscape and Species Evolution: A Look into the Past*. West Sussex, UK: Wiley-Blackwell.
- Hoorn, C.M., Bogotá-A, G.R., Romero-Baez, M., Lammertsma, E.I., Flantua, S.G.A., Dantas, E.L., Dino, R., do Carmo, D.A., & Chemale, F.J. 2017.** The Amazon at sea: Onset and stages of the Amazon River from a marine record, with special reference to Neogene plant turnover in the drainage basin. *Global Planetary Change*, 153, 51–65.
- Horbe, A.M.C., Motta, M.B., de Almeida, C.M., Dantas, E.L., & Vieira, L.C. 2013.** Provenance of Pliocene and recent sedimentary deposits in western Amazônia Brazil: Consequences for the paleodrainage of the Solimões-Amazonas River. *Sedimentary Geology*, 296, 9–20.
- Irion, G., Müller, J., Mello, J.N.d., & Junk, W. 1994.** Quarternary geology of the central Amazonian lowland area. *Revista Internacional de Geología*, 15(1/2), 27–33.
- Jaramillo, C., Romero, I., D'Apolito, C., Bayona, G., Duarte, E., Louwye, S., Escobar, J., Luque, J., Carrillo-Briceño, J.D., Zapata, V., Mora, A., Schouten, S., Zavada, M., Harrington, G., Ortiz, J., & Wesselingh, F.P. 2017.** Miocene flooding events of western Amazonia. *Science Advances*, 3(e1601693), 1–12.
- Kalliola, R., Puhakka, M., & Danjoy, W. 1993.** *Amazonia Peruana: Vegetación Humeda Tropical en el Llano Subandino*. Jyväskylä, Finland: Gummerus Printing.
- Klammer, G. 1984.** The relief of the extra-Andean Amazon basin. In *The Amazon, Limnology and Landscape Ecology of a Mighty Tropical River and its Basin*, edited by H. Sioli, pp. 47–83. Dordrecht, The Netherlands: Dr. W. Junk Publishers.
- Latrubesse, E.M., da Silva, S.A.F., Cozzuol, M., & Absy, M.L. 2007.** Late Miocene continental sedimentation in southwestern Amazonia and its regional significance: Biotic and geological evidence. *Journal of South American Earth Sciences*, 23(1), 61–80.
- Menegazzo, M.C., Catuneanu, O., & Chang, H.K. 2016.** The South American retroarc foreland system: The development of the Bauru Basin in the back-bulge province. *Marine and Petroleum Geology*, 73, 131–156.
- Metz, M., Mitasova, H., & Harmon, R.S. 2011.** Efficient extraction of drainage networks from massive, radar-based elevation models with least cost path search. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(2), 667–678.
- Miller, K.G., Kominz, M.A., Browning, J.V., Wright, J.D., Mountain, G.S., Katz, M.E., Sugarman, P.J., Cramer, B.S., Christie-Blick, N., & Pekar, S.F. 2005.** The Phanerozoic record of global sea-level change. *Science*, 310(5752), 1293–1298.
- Müller, R.D., Sdrolia, M., Gaina, C., Steinberger, B., & Heine, C. 2008.** Long-term sea-level fluctuations driven by ocean basin dynamics. *Science*, 319(5868), 1357–1362.
- Munsell Color Company. 1954.** *Soil Color Charts*. Baltimore, Maryland: Munsell Color Company.
- Rossetti, D.F., Cohen, M.C.L., Tatumi, S.H., Sawakuchi, A.O., Cremon, É.H., Mittani, J.C.R., Bertani, T.C., Munita, C.J.A.S., Tudela, D.R.G., Yee, M., & Moya, G. 2015.** Mid-Late Pleistocene OSL chronology in western Amazonia and implications for the transcontinental Amazon pathway. *Sedimentary Geology*, 330, 1–15.
- Sánchez F.A., De la Cruz W.J., Monge M.R., Jorge, C.F., Herrera T.I., Valencia M.M., Romero F.D., Cervante G.J., & Cuba M.A. 1999.** *Geología de los cuadrángulos de Puerto Arturo, Flor de Agosto, San Antonio del Estrecho, Nuevo Perú, San Filipe, Río Algodón, Quebrada Airambo, Mazán, Francisco de Orellana, Huata, Iquitos, Río Maniti, Yanashi, Tamshiyacu, Río Tamshiyacu, Buenjardín, Ramón Castilla, Río Yavarí-Mirín y Buenavista*. Lima, Perú: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, Sector de Energía y Minas.
- Stallard, R.F. 1985.** River chemistry, geology, geomorphology, and soils in the Amazon and Orinoco basins. In *The Chemistry of Weathering*, edited by J. I. Drever, pp. 293–316. Dordrecht, Holland: D. Reidel Publishing Co.

- Stallard, R.F. 2005.** Procesos del paisaje: geología, hidrología y suelos / Landscape processes: geology, hydrology, and soils, In *Perú: Matsés*, edited by C. Vriesendorp, N. Pitman, J. I. Rojas Moscoso, L. Rivera Chávez, L. Calixto Méndez, M. Vela Collantes, & P. Fasabi Rimachi, Vol. 16, pp. 57–63, 170–176, 230–249. Chicago, Illinois: The Field Museum.
- Stallard, R.F. 2006.** Geología y hidrología / Geology and hydrology, In *Perú: Sierra del Divisor*, edited by C. Vriesendorp, T. S. Schulenberg, D. K. Moskovits, & J.-I. Rojas Moscoso, Vol. 17, pp. 58–61, 160–163, 218–219, 248. Chicago, Illinois: The Field Museum.
- Stallard, R.F. 2007.** Geología, hidrología y suelos / Geology, hydrology, and soils, In *Perú: Nanay-Mazán-Arabela*, edited by C. Vriesendorp, J. A. Álvarez, N. Barbagelata, W. S. Alverson, & D. K. Moskovits, Vol. 18, pp. 44–50, 114–119, 156–162. Chicago, Illinois: The Field Museum.
- Stallard, R.F. 2011.** Procesos paisajísticos: geología, hidrología y suelos / Landscape processes: geology, hydrology, and soils. In *Perú: Yaguas-Cotuhé*, edited by N. Pitman, C. Vriesendorp, D. K. Moskovits, R. von May, D. Alvira, T. Wachter, D. F. Stotz, & Á. del Campo, Vol. 23, pp. 72–86, 199–210, 272–275. Chicago, Illinois: The Field Museum.
- Stallard, R.F. 2013.** Geología, hidrología y suelos / Geology, hydrology, and soils. In *Perú: Ere-Campuya-Algodón*, edited by N. Pitman, E. Ruelas Inzunza, C. Vriesendorp, D. F. Stotz, T. Wachter, Á. del Campo, D. Alvira, B. Rodríguez Grández, R. C. Smith, A. R. Sáenz Rodríguez, & P. Soria Ruiz, Vol. 25, pp. 74–85, 221–231, 296–330. Chicago, Illinois: The Field Museum.
- Stallard, R.F. 2023.** Extreme rainstorms and landslides in the Panama Canal Watershed – Lessons learned from the storms of December 2010. Paper presented at the Soil Erosion Research Under a Changing Climate, Aguadilla, Puerto Rico, January 8–13, 2023, USA.
- Stallard, R.F. 2025.** Geology, hydrology, and soils. In *Guyana: Acarai-Corentyne Corridor*, edited by N. Pitman, C. Rutt, L. S. de Souza, R. E. Oakley, F. Carrasco-Rueda, S. Picq, & J. M. Campbell, Vol. 32, pp. 102–109. Chicago, Illinois: The Field Museum, Vol. 32, pp. 102–109. Chicago, Illinois: The Field Museum.
- Stallard, R.F., Ángel Amaya, J., Botero, P., & Salas, J. 2021.** Geología, suelos y agua / Geology, soils and water. In *Colombia, Perú: Bajo Putumayo-Yaguas-Cotuhé*, edited by C. C. Jarrett, M. E. Thompson, N. Pitman, C. F. Vriesendorp, D. Alvira Reyes, A. A. Lemos, F. Carrasco-Rueda, W. Matapi Yucuna, A. Salazar Molano, A. R. Sáenz Rodríguez, F. Ferreyra, Á. del Campo, M. Morales, A. Alfonso, T. Torres Tuesta, M. C. Herrera Vargas, C. García Ortega, V. Cardona Uribe, N. Kotlinski, D. K. Moskovits, L. S. de Souza, & D. F. Stotz, Vol. 31, pp. 107–124, 358–374, 500–527. Chicago, Illinois: The Field Museum.
- Stallard, R.F., & Crouch, T.D. 2015.** Geología, hidrología y suelos / Geology, hydrology, and soils. In *Perú: Tepiche-Blanco*, edited by N. Pitman, C. Vriesendorp, L. Rivera Chávez, T. Wachter, D. Alvira Reyes, Á. del Campo, G. Gagliardi-Urrutia, D. Rivera González, L. Trejejo, D. Rivera González, & S. Heilpern, Vol. 27, pp. 80–96, 264–278, 374–375. Chicago, Illinois: The Field Museum.
- Stallard, R.F., & Edmond, J.M. 1983.** Geochemistry of the Amazon 2. The influence of geology and weathering environment on the dissolved-load. *Journal of Geophysical Research-Oceans and Atmospheres*, 88(C14), 9671–9688.
- Stallard, R.F., & Lindell, L. 2014.** Geología, hidrología y suelos / Geology, hydrology, and soils. In *Perú: Cordillera Escalera-Loreto* edited by N. Pitman, C. Vriesendorp, D. Alvira, J. A. Markel, M. Johnston, E. Ruelas Inzunza, A. Lancha Pizango, G. Sarmiento Valenzuela, P. Álvarez-Loayza, J. Homan, T. Wachter, Á. del Campo, S. D. F., & H. Sebastian, Vol. 26, pp. 84–98, 280–292, 402–407. Chicago, Illinois: The Field Museum.
- Stallard, R.F., & Londoño, S.C. 2016.** Geología, hidrología y suelos / Geology, hydrology, and soils. In *Perú: Medio Putumayo-Algodón*, edited by N. Pitman, A. Bravo, S. Claramunt, C. Vriesendorp, D. A. Reyes, A. Ravikumar, Á. del Campo, D. F. Stotz, T. Wachter, S. Heilpern, B. Rodríguez Grández, A. R. Sáenz Rodríguez, & R. C. Smith, Vol. 28, pp. 58–65, 176–182, 250–270. Chicago, Illinois: The Field Museum.
- Stallard, R.F., & Zapata, V. 2013.** Geología, hidrología y suelos / Geology, hydrology, and soils. In *Perú: Cerros de Kampankis* edited by N. Pitman, E. Ruelas Inzunza, D. Alvira, C. Vriesendorp, D. K. Moskovits, Á. del Campo, T. Wachter, D. F. Stotz, S. Noningo Sesén, T. Cerrón, & R. C. Smith, Vol. 24, pp. 76–86, 233–242, 318–319. Chicago, Illinois: The Field Museum.
- Stark, N., & Holley, C. 1975.** Final report on studies of nutrient cycling on white and black water areas in Amazonia. *Acta Amazonica*, 5, 51–76.
- Stark, N.M., & Jordan, C.F. 1978.** Nutrient retention by the root mat of an Amazonian rain forest. *Ecology*, 59(3), 434–437.
- van Soelen, E.E., Kim, J.-H., Santos, R.V., Dantas, E.L., Vasconcelos de Almeida, F., Pires, J.P., Roddaz, M., & Sinnighe Damsté, J.S. 2017.** A 30 Ma history of the Amazon River inferred from terrigenous sediments and organic matter on the Ceará Rise. *Earth and Planetary Science Letters*, 474, 40–48.
- Wilkinson, M.J., Marshall, L.G., Lundberg, J.G., & Kreslavsky, M.H. 2010.** Megafan environments in northern South America and their impact on Amazon Neogene aquatic ecosystems In *Amazonia: - Landscape and Species Evolution: A Look into the Past*, edited by C. Hoorn & F. P. Wesselingh, pp. 162–184. West Sussex, UK: Wiley-Blackwell.
- Zavala C.B., Guzmán M.A., Valenzuela O.G., De la Cruz M.O., Núñez J.S., Rosas C.M., Aldana A.M., Usnayo F.D., & Quispe, A. Luis. 1999.** *Geología de los cuadrángulos de Puchana, Remanso, San Martín de Soledad, Quebrada Esperanza, Río Yahuillo, Quebrada Lupuna, Río Yaguas, Primavera, Pebas, Río Atacuari, Río Cotuhé, Quebrada Chontadero, San Francisco, Chambira, Caballococha, Can Juan de Cacao, Caroline, San Pablo de Loreto, San Pedro, Islandia, Isla Chinería y Lagogrande.* Lima, Perú: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, Sector de Energía y Minas.d.