Verbundprojekt BiodivERsA-CLAMBIO

Paläoklimatische Rekonstruktion der Überschwemmungsregime und Trockenereignisse amazonischer Überschwemmungswälder zur Abschätzung der Vulnerabilität und des Nutzungspotenzials

-Schlussbericht-

FKZ 16LC2025A

Zuwendungsempfänger: Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – Institut für Geographie und Geoökologie – Bereich Aueninstitut

Projektlaufzeit: 01.04.2021 – 31.03.2024

Berichtszeitraum: 01.04.2021 – 31.03.2024

Projektdurchführung und -Leitung:

Prof. Dr. Florian Wittmann, Abt. Auenökologie, Institut für Geographie und Geoökologie, Karlsruher Institut für Technologie

Josefstr. 1, 76437 Rastatt

https://www.ifgg.kit.edu/

florian.wittmann@kit.edu

Tel. +49 7222 3807-0

INHALTSANGABE

I – Kurzdarstellung **S.**

1. Aufgabenstellung 1
2. Wissenschaftlich-technischer Stand, an den angeknüpft wurde 1
3. Planung und Ablauf 1
4. Wichtigste Ergebnisse 2

II – Eingehende Darstellung **S.**

1. Erzielte und vorgegebene Ziele unter Verwendung der Zuwendung 1
2. Planung und zeitlicher Ablauf 4
3. Wissenschaftlich-technischer Stand, an den angeknüpft wurde 5
4. Zusammenarbeit mit anderen Stellen 6
5. Wichtigste Positionen des zahlungsmäßigen Nachweises 7
6. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit 8
7. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit 8
8. Bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens 9
9. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen 10
   - 9.1 Erfolgte Veröffentlichungen mit unmittelbarem Projektbezug 10
   - 9.2 Erfolgte Veröffentlichungen in Kooperation zum Projekt 11
   - 9.3 Laufende Master- und Doktorarbeiten 12
   - 9.4 Abgeschlossene Bachelor- und Masterarbeiten 12
   - 9.5 Geplante Veröffentlichungen 13
   - 9.6 Kongress- und Fachvorträge 13
10. Verwendete Literatur 14

III – Erfolgskontrollbericht **S.**

1. Beitrag zu förderpolitischen Zielen 1
2. Wissenschaftlich-technisches Ergebnis, Nebenergebnisse, Erfahrungen 1
   - 2.1 Biodiversität oligotropher Auenwälder 1
   - 2.2 Baumwachstum 2
   - 2.3 Historische hydroklimatische Validierung 3
   - 2.4 Nebenergebnisse 3
   - 2.5 Erfahrungen 4
3. Fortschreibung des Verwertungsplans 5
   - 3.1 Wissenschaftlich-technischer Erfolgsaussichten, Nutzbarkeit der Daten 5
   - 3.2 Zeithorizont 6

3.3 Wissenschaftliche Anschlussfähigkeit 6
4. Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben 7
5. Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer 7
6. Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung 7

ANHANG – Wissenschaftliche Publikationen

I – Kurzdarstellung

1. Aufgabenstellung

Aufgabe und Ziel des Teilprojekts war, die Vulnerabilität oligotropher Schwarz- und Klarwasser-Überschwemmungswälder Amazoniens (igapó), insbesondere ihrer Diversität und Produktivität, auf hydroklimatische Extremereignisse, wie Dürren, Feuer und Überschwemmungen zu untersuchen. Hierbei standen zwei räumlich entgegengesetzte Regionen im Fokus, die in NW-Amazonien gelegene Region des oberen/mittleren Rio Negro (Schwarzwasser), sowie die in SE-Amazonien gelegene Region des mittleren/unteren Rio Xingu (Klarwasser). Unter Verwendung dendro-klimatologischer Methoden von ausgewählten Jahresringen wurde erarbeitet, wie häufige Baumarten der Auenwälder in diesen beiden Regionen in ihrem Zuwachsverhalten auf hydroklimatische Extremereignisse in der Vergangenheit reagierten. Die Zuwachs- und paläoklimatologischen Rekonstruktionen bilden die Grundlage zur Modellierung der biotischen Reaktion der amazonischen Auenwälder unter unterschiedlichen Klimaszenarien.

2. Wissenschaftlicher Stand, an den angeknüpft wurde

Das Amazonasbecken ist das größte hydrologische Becken der Erde, von welchem ca. 30% seiner Fläche aus einem komplexen System bewaldeter Feuchtgebiete bestehen (Junk et al. 2011, 2014). Oligotrophe Auenwälder entlang von Schwarz- und Klarwasserflüssen („igapó“) nehmen einen Flächenanteil von ca. 300.000 km^2 ein (Wittmann et al. 2022). Studien in amazonischen Feuchtgebieten beschreiben zunehmend den Einfluss des Klimawandels auf die amazonische Biota der Flüsse und Auen, speziell hinsichtlich des vermehrten Auftretens extremer Dürre- und Hochwasserperioden (z.B. Parolin et al. 2010, Barichivich et al. 2018). Zur Zeit der Niedrigwasserstände sind die Auenwälder zudem natürlichen oder anthropogen induzierten Feuern ausgesetzt (Carvalho et al. 2021). Die rezente Intensivierung des hydrologischen Regimes Amazoniens umfasst im Vergleich zum langjährigen Mittel erhöhte Niederschläge und Oberflächenabflüsse während der saisonalen Regenzeiten (seit 1980), aber auch generell erhöhte Jahresniederschläge (seit 1990), bei gleichzeitig signifikanter Verringerung der Niederschläge während der saisonalen Trockenzeiten (Marengo et al. 2015, Gloor et al. 2015). Derartige Änderungen im Wasserkreislauf führen potenziell zu veränderten Nahrungsketten, Etablierungs- und Wachstumsstörungen, erhöhte Mortalität nativer Pflanzenpopulationen und somit letztlich zum Artensterben oder deren regionalen Verdrängung (Mahli et al. 2008, Wittmann et al. 2013). Im Zuge dieser Problematik soll das Projektvorhaben deshalb untersuchen, wie sich hydroklimatische Extremereignisse auf das Baumwachstum der wichtigsten Indikator-Baumarten der Schwarz- und Klarwasser-Auenwälder auswirken.

3. Planung und Ablauf

Im Rahmen desVorhabens wurden fünf Geländeexkursionen durchgeführt, drei an den Rio Xingu (SE-Amazonien), und zwei an den Rio Negro (NW-Amazonien). In den

Überschwemmungswäldern beider Flüsse wurden insgesamt jeweils 9 ha Untersuchungsfläche auf unterschiedlicher Topografie bezüglich des Mittelwasserstandes des Flusses eingerichtet, in welchen alle Bäume ≥ 10 cm Brusthöhendurchmesser mit nummerierten Aluminiumplaketten versehen, in ihren Stammdurchmessern und Baumhöhen vermessen, und in ihrer Baumart bestimmt wurden. Kleinere Individuen wurden stichprobenartig in drei 25 m^2 großen Flächen je 1 ha-Untersuchungsfläche, in einem „nested plot design“ (Stohlgren et al. 1995) aufgenommen. Die durchschnittliche Gelände- bzw. Überschwemmungshöhe wurde an jedem Baumstamm innerhalb der Untersuchungsflächen über die sichtbare Wassermarke des Höchstwasserstandes des Vorjahres erfasst und mit dem nächstgelegenen Flusspegel in Beziehung gesetzt. Bodenproben zur physisch-chemischen Analyse wurden in allen Untersuchungsflächen entnommen und im Bodenlabor der Embrapa, Manaus, analysiert.
In jeder Untersuchungsfläche erfolgte die Auswahl von mindestens einer und maximal drei Baumarten zur Entnahme von Holzbohrkernen mittels Handbohrer an mindestens 20 und maximal 100 Individuen je Baumart und Fläche bzw. Überflutungsniveau. Die Bohrkerne wurden im dendrochronologischen Labor der AG MAUA am INPA, Manaus, zur dendrochronologischen Wachstumsanalyse vorbereitet und analysiert. Die Vermessung der Jahresringe erfolgte unter Verwendung einer LINTAB-Messtation (Rinntech), die Erstellung von Wachstumskurven bzw. historische Vergleiche mit Klima- und hydrologischen Daten unter Verwendung der Software TSAP (Time Series Analysis and Presentation) sowie WinDendro.

4. Wichtigste Ergebnisse

Insgesamt wurden 7.225 Individuen und 143 Baumarten am Rio Negro, sowie 7.610 Individuen und 114 Arten am Rio Xingu erfasst. Die durchschnittliche Artenzahl je Untersuchungsfläche betrug 25 - 65 Baumarten ha^{-1} am Rio Negro, und 24 - 44 Baumarten ha^{-1} am Rio Xingu. Die relative Artenarmut des Rio Xingu ist vermutlich auf die geringere Flutamplitude (ca. 5 m im Gegensatz zum Rio Negro mit ca. 11 m), generell geringere Jahresniederschläge mit längeren Trockenzeiten, höhere Entwaldungsraten, sowie auf das gestörte Flutregime durch den Bau der Staumauer Belo Monte zurückzuführen. Am Rio Negro und insbesondere nahe dem Zusammenfluss mit dem Rio Jaú wurden Brandflächen von mehreren 10ern km^2 Überschwemmungswald beobachtet, die nach Rücksprache mit den lokalen Anwohnern aus dem Jahr 2015 stammen. Insgesamt wurden von fünf Baumarten vergleichende Wachstumschronologien erstellt, die die Wachstumsbedingungen in den Auwäldern beider Flüsse über bis zu 158 Jahre (seit 1862) dokumentieren. In beiden Untersuchungsräumen zeigte sich eine negative Korrelation zwischen radialem Holzwachstum und Überschwemmungshöhe und -dauer, eine zweite, weniger stark ausgeprägte Wachstumsreduktion erfolgte in Jahren mit extremen Niedrigwasser- bzw. Dürrephasen, die überwiegend während El-Niño-Ereignissen auftraten. Klimatische Wachstumsreduktionen sind artspezifisch unterschiedlich – trotzdem waren sie im raumzeitlichen Vergleich ausgeprägter am klimatisch feuchteren Rio Negro als am trockeneren Rio Xingu.

II – Eingehende Darstellung

1. Erzielte und vorgegebene Ziele unter Verwendung der Zuwendung

Vorgegebene wissenschaftliche Ziele des Projekts sind im Folgenden aufgelistet und erzielte Ergebnisse bzw. Änderungen für jedes wissenschaftliche Ziel angegeben:

WP1) Erfassung der Artendiversität, Waldstruktur und Populationsdynamik am Rio Negro und Rio Xingu:

Die erzielten Ergebnisse wurden erreicht, allerdings mit einem leicht veränderten Design in der Verortung der floristischen Aufnahmen gegenüber den ursprünglichen Plänen. Ursprünglich sah das Projekt vor, drei Flussabschnitte am unteren Rio Xingu zu untersuchen. Nach Rücksprache mit dem Konsortium und Mitarbeitern des brasilianischen Instituts für Umwelt und Soziales (Instituto Socioambiental – ISA), welches sich maßgeblich dem Schutz der indigenen Bevölkerung widmet, wurde entschieden, zwei der drei zu untersuchenden Flussabschnitte oberhalb bzw. zwischen den Staumauern (lokal unter dem Namen „Volta Grande“ bekannt) von Belo Monte einzurichten – am mittleren Rio Xingu. Laut ISA und Veröffentlichungen verschiedener Arbeitsgruppen (Quaresma et al. 2024, Juruna et al. 2025, s.9.1) hat die obere der beiden Staumauern von Belo Monte, die 2016 in Betrieb genommen wurde, trotz verschiedener Ausgleichsmaßnahmen einen drastischen Einfluss auf das hydrologische Regime entlang des Flussabschnitts Volta Grande, was sich zunehmend negativ auf die aquatische Biodiversität, auf das Artensterben von Auwald-Baumarten, sowie die Ressourcennutzung und Lebensqualität der indigenen Bevölkerung auswirkt. Wie sich das hydrologische Regime unterhalb der zweiten Staumauer verändert hat, und welche potenziellen Auswirkungen dies auf die Auenwälder haben könnte, ist jedoch weitgehend unbekannt. Mit der Verteilung der zu untersuchenden Flussabschnitte auf 1) oberhalb der ersten Staumauer (Kontrolle), 2) zwischen den beiden Staumauern (seltener und weniger hoch überflutet als vor der Errichtung des Wasserkraftwerks) und 3) unterhalb der zweiten Staumauer (häufiger und länger überflutet als vor der Errichtung des Wasserkraftwerks) konnte so auf die Belange der indigenen Flussanwohner am mittleren und unteren Rio Xingu eingegangen werden, die mit dem Bau des Wasserkraftwerks Belo Monte einhergehenden Veränderungen des hydrologischen Regimes, und seinen potenziellen Folgen auf die Flora und Fauna, unabhängig zu dokumentieren.

Am oberen/mittleren Rio Negro wurden die drei zu untersuchenden Flussabschnitte wie geplant inventarisiert, 1) nahe der Stadt Barcelos, oberer Rio Negro 2) auf dem Flussarchipel Mariuá, oberer Rio Negro, und 3) nahe dem Zusammenfluss mit dem Rio Jaú,

mittlerer Rio Negro.

Die Baumartenbestimmungen, u.a. unter Mitarbeit von spezialisierten Botanikern des INPA, sowie Nutzung des im INPA-Herbarium archivierten botanischen Materials, sind weitgehend abgeschlossen. Demnach wurden 88% aller aufgenommenen Individuen auf Artenebene bestimmt, 10,5% wurden auf Gattungsebene bestimmt, und lediglich 1,5% aller aufgenommenen Individuen konnten nur auf Familienebene bestimmt werden (zumeist Jungbäume des Unterwuchses ohne reproduktive Merkmale, wie Blüten oder Früchte zur Zeit der Geländeaufnahme). Gemäß den landesüblichen Bestimmungen wurden alle botanischen Präparate, die im Rahmen diese Projektvorhabens generiert wurden, in das Herbarium des INPA integriert, und stehen somit auch weiteren botanischen Untersuchungen zur Verfügung.

WP2) Bestimmung des jährlichen Holzzuwachses der wichtigsten Indikator-Baumarten:

Die erzielten Ergebnisse wurden mehrheitlich erreicht, allerdings erwies sich die Jahrringanalyse an vielen Baumarten trotz Verwendung von hochauflösenden Okularen als langwierig und schwierig – und musste in vielen Fällen aufgegeben werden, was den Erfolg des Projektvorhabens zeitlich um insgesamt ca. 12 Monate verzögerte. Um das Ziel zu erreichen, an jedem Fluss von insgesamt sechs Indikator-Baumarten eine Wachstumschronologie zu erstellen, wurden insgesamt 21 Arten beprobt und analysiert – in den meisten Fällen führten die Jahresringe in der Kreuzdatierung zwischen Bohrkernen desselben Individuums oder zwischen Individuen derselben Art zu keinem brauchbaren Ergebnis, u.a. wegen des Fehlens sichtbarer Jahresringe oder der Ausbildung von „falschen Jahrringen“ (Bäume reagieren auf spontane Stressereignisse mit Wachstumsreduktionen während der eigentlich günstigen Vegetationsperiode). Von fünf Baumarten, die an beiden Flüssen in ausreichender Individuenzahl vertreten waren, sind vergleichende Wachstumschronologien erstellt worden, für Bereiche hoher Überflutung (>150 Fluttage im Jahr): *Macrolobium acaciifolium* (Fabaceae) und *Hevea spruceana* (Euphorbiaceae); Bereiche mittlerer Überflutung (50-100 Fluttage im Jahr): *Hevea guianensis* (Euphorbiaceae) und *Vatairea guianensis* (Fabaceae) und Bereiche geringer Überflutung (< 50 Fluttage im Jahr): *Macrolobium bifolium* (Fabaceae). Die Chronologien von zwei weiteren Arten (*Handroanthus barbatus* – Bignoniaceae und *Virola surinamensis* - Myristicaceae) - beide im Bereich geringer Überflutung, befinden sich derzeit noch in Bearbeitung.
Die Mindest- und maximalen Alter der untersuchten Baumarten (die Mindestalter ergeben sich daraus, dass nur Bäume ≥ 10 cm Brusthöhendurchmesser in die Analyse einbezogen wurden) betrugen 29-152 Jahre in *M. acaciifolium*, 14-158 Jahre in *H. spruceana*, 16-138 Jahre in H. *guianensis*, 12-114 Jahre in *V. guianensis*, und 14-146 Jahre in *M. bifolium*. Vier der fünf bislang ausgewerteten Baumarten (*M. acaciifolium, H spruceana, H. guianensis, M. bifolium*) weisen bei vergleichbaren topografischen Standorten und

Überflutungsdauern höhere durchschnittliche mittlere Wachstumsraten am Rio Xingu (6,232±0,744 mm Jahr^{-1}) als am Rio Negro (5,812±0,698 mm Jahr^{-1}) auf, bei *V. guianensis* gibt es keine signifikanten Wachstumsunterschiede zwischen den beiden Flüssen. Die verbesserten Wachstumsbedingungen am Rio Xingu dürften auf das vergleichsweise bessere Nährstoffangebot der Alluvialböden zurückzuführen sein.

WP3) Erfassung der klimatischen und hydrologischen Wachstumsbeziehungen:

Vorläufige Ergebnisse indizieren eine enge Korrelation von Zuwachsraten und Überflutungsregime bzw. der Länge der terrestrischen Phase während der letzten 150 Jahre – eine weitere, schwächere Wachstumsreduktion im Jahresverlauf findet bei drei von fünf Baumarten in besonders trockenen Jahren (z.B. während El Niño – Ereignissen) statt. Der Vergleich zwischen den Standorten und Baumarten belegt einen signifikant höheren, mittleren radialen Holzzuwachs am Rio Xingu. Höher und länger überschwemmte Individuen am selben Standort weisen einen signifikant geringeren, radialen Holzzuwachs auf, als höher gelegene und kürzer überschwemmte Individuen. Weitere, detailliertere Analysen der Wachstumschronologien zu hydro-klimatischen Faktoren (cumulative water deficit, Temperaturen) befinden sich derzeit in Bearbeitung im dendrochronologischen Labor des INPA-Max Planck (AG MAUA). Wir erwarten den vollständigen Abschluss dieser Analysen bis März 2025.

WP4) Erfassung des Trends der biotischen Reaktion auf Störungsregime im Zuge des Klimawandels und Erstellung von Vulnerabilitätsindices einschließlich der aktuellen und potenziellen Ressourcennutzung durch die indigene und nicht-indigene Bevölkerung:

Dieses Arbeitspaket sieht den Vergleich aller Zuwachsraten der beprobten Baumarten an allen Standorten vor, um die Auswirkungen über die Wachstumsreaktion des Waldbestandes auf den Klimawandel unter Berücksichtigung der Nutzungszyklen der Baumarten durch die lokale Bevölkerung abzuschätzen. Die untersuchten Baumarten stellen nur wenige direkte Ressourcen für die indigene Bevölkerung dar, wie z.B. die Nutzung der Samen von *H. guianensis* und *H. spruceana* zur Herstellung von Schmuck, sowie die Nutzung von *M. acaciifolium*, *M. bifolium* und *V. guianensis* als Bau- und Brennholz (Wittmann et al. 2010). Trotzdem leisten die Baumarten wichtige Ökosystemleistungen, so z.B. die Frucht- und Samenproduktion zu Zeiten des Hochwassers, welche eine wichtige Nahrungsquelle für lokale Fischarten und somit der gesamten Nahrungskette darstellt (Correa et al. 2015, Wittmann et al. 2022). Im Bereich von Volta Grande werden viele ehemals überschwemmte Waldbereiche durch das veränderte Flutregime im Zuge des Baus von Wasserkraftwerk und Dämmen nicht mehr regelmäßig überflutet (Quaresma et al. 2024, Juruna et al. 2025, s. 9.1). Die Früchte und Samen der untersuchten Baumarten fallen somit nicht mehr ins Wasser, was sich einerseits negativ auf die natürliche Verbreitung der Baumarten, und andererseits auf das Nahrungsangebot

fruchtfressender Fischarten auswirkt. Dementsprechend berichtet die indigene Bevölkerung und das ISA von stark zurückgehenden Fischbeständen an diesem Flussabschnitt, was als Konsequenz veränderte Diäten der indigenen Bevölkerung nach sich zieht (Assunção et al. 2024, Quaresma et al. 2024, Juruna et al. 2025, s. 9.1).

Insgesamt ist der Zeitraum seit dem Bau des Wasserkraftwerks Belo Monte zu kurz, um zuverlässige Aussagen über die künftige Entwicklung des Überschwemmungswaldes in den betroffenen Gebieten zu machen. Von älteren Wasserkraftwerken bestehen indes langjährige Erfahrungen unserer AG hinsichtlich der Auswirkungen von Dämmen auf veränderte hydrologische Regime und auf die Flora und Fauna der Auenwälder. So konnten am ebenfalls oligotrophen Schwarzwasserfluss Uatumã (NE der Stadt Manaus, Zentralamazonien) und das in den 1980er Jahren errichtete Wasserkraftwerk „Balbina“ das Massensterben von Auenwald-Baumarten von bis zu 150 km stromabwärts der Staumauer nachgewiesen werden (Assahira et al. 2017, Wittmann et al. 2019, Schöngart et al. 2021). Bei ausbleibenden Überschwemmungen kommt es nach und nach zum Ausfall von fluttoleranten Baumarten zugunsten rein terrestrischer Sekundärarten, die jedoch viele wichtige Ökosystemleistung der nativen Baumarten nicht erfüllen, und deshalb nicht von aquatischen Organismen gefressen bzw. verbreitet werden (Lobo et al. 2019, Neves et al. 2019, Resende et al. 2020, Schöngart et al. 2021). Viele der fluttoleranten Baumarten Amazoniens sind endemisch, und die Auenwälder tragen zu einem erheblichen Teil zur Arten- und Habitatvielfalt (Betadiversität) Amazoniens bei (Wittmann et al. 2017, 2022, Householder et al. 2024, s. 9.1). Die anthropogen induzierten hydrologischen Veränderungen sind somit schwerwiegender als die, die durch den Klimawandel verursacht werden. Gerade deshalb bieten sie die Chance, die Toleranz von Überschwemmungswald-Bäumen hinsichtlich veränderter Flutregime unter naturnahen Bedingungen zu untersuchen. Die vorläufigen Ergebnisse dieses Projektvorhabens weisen dabei auf standort- und artspezifische Reaktionen der Baumarten hin, die einer Verallgemeinerung (z.B. die in verschiedenen rezenten Publikationen beschriebenen „tipping points“ der amazonischen Biodiversität und Produktivität im Klimawandel - z.B. Lovejoy and Nobre 2018, Banerjee et al. 2022, Marques 2024) entgegenstehen. Die so inventarisierten Flächen, v.a. am Rio Xingu, werden somit ein künftiges monitoring erlauben, welches die Konsequenzen der fehlenden Überschwemmungen zwischen den Staumauern, und die erhöhten Überschwemmungen unterhalb der Staumauern zuverlässig begleiten kann.

2. Planung und zeitlicher Ablauf

Die Feldarbeit begann aufgrund der Corona-Situation und den sich hieraus ergebenden Restriktionen für Dienstreisen und vor Ort erst im November 2021, mit einer Exkursion aller Arbeitsgruppen des Verbundprojektes an den mittleren Rio Negro (Flussarchipel Mariuá). Alle Exkursionen am Rio Negro und die zum unteren Rio Xingu erfolgten auf einem in Manaus gemieteten Bootes von 18 m Länge, welches neben Anreise und Transport zu den zu

untersuchenden Flussabschnitten als Forschungs- und Übernachtungsstation vor Ort diente. Für die Exkursion an den mittleren Rio Xingu (Flussabschnitt Volta Grande, und stromaufwärts) erfolgte die Anreise auf dem Landweg von der Stadt Belém (Bundesstaat Pará, Ost-Amazonien) aus, vor Ort wurde die Exkursion durch Nutzung der Infrastruktur des ISA (Pkw, Boote, Außenbord-Motoren) bzw. durch Auftragsarbeit von lokalen Anwohnern realisiert. Die Dauer der Exkursionen betrug je nach An- und Abfahrzeiten jeweils zwischen 16-25 Tagen.

Der zeitliche Ablauf der Exkursionen war wie folgt:

November 2021: Exkursion an das Flussarchipel Mariuá, nahe dem Zusammenfluss mit dem Rio Branco, mittlerer Rio Negro, sowie nahe der Stadt Barcelos, oberer Rio Negro (Bootsexkursion von Manaus).

September 2022: Unterer Rio Xingu, unterhalb der Staumauer Belo Monte, am Zusammenfluss mit dem Rio Acaraí (Bootsexkursion von Manaus).

Januar 2023: Vorerkundung am mittleren Rio Xingu durch Quaresma, oberhalb der Staumauer von Belo Monte (Volta Grande), Kontaktaufnahme mit indigenen Anwohnern und Flächenauswahl (Exkursion auf dem Landweg, von Belém).

August/September 2023: Exkursion an den mittleren Rio Xingu, oberhalb der Staumauer von Belo Monte (Volta Grande) (Exkursion auf dem Landweg, von Belém).

Februar 2024: Exkursion an den mittleren Rio Negro, nahe dem Zusammenfluss mit dem Rio Jaú (Bootsexkursion von Manaus).

Die Auswertung hinsichtlich der Artenbestimmungen, Populationsanalysen, radialer Holzzuwachs, Biomasse und Wachstumschronologien erfolgten mehrheitlich durch Master-Studierende des INPA über die gesamte Projektlaufzeit, und dauern in einigen Aspekten (z.B. noch ausstehende Chronologie, Populationsanalysen) noch an.

3. Wissenschaftlich-technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Das Amazonasbecken umfasst eine Fläche von 6.8 Millionen km^2 und ist das größte hydrologische Becken der Erde. Seine Vegetation unterteilt sich zu einem Anteil von ca. 70% in nicht überschwemmten Regenwald (terra firme Wald) und zu einem Anteil von ca. 30% in ein komplexes System meist bewaldeter Feuchtgebiete (Junk et al. 2011, 2014). Das Amazonasbecken trägt mit 16-18% zum weltweiten Oberflächenabfluss bei und beinhaltet vier der zehn wasserreichsten Flüsse der Erde. Seine Vegetation spielt eine Schlüsselrolle in den weltweiten Kohlenstoff- und Wasserkreisläufen und wirkt sich maßgeblich auf energetische Prozesse des weltweiten Klimas aus (Andreae et al. 2015). Studien in amazonischen Regenwäldern und Feuchtgebieten beschreiben zunehmend den Einfluss des Klimawandels auf die amazonische Biota, speziell hinsichtlich veränderter hydrologischer Regime, wie z.B. durch das vermehrte Auftreten extremer Dürre- und Hochwasserperioden

(z.B. Parolin et al. 2010, Schöngart et al. 2024). So umfasst die rezente Intensivierung des hydrologischen Regimes Amazoniens im Vergleich zum langjährigen Mittel erhöhte Niederschläge und Oberflächenabflüsse während der saisonalen Regenzeiten (seit 1980), aber auch generell erhöhte Jahresniederschläge (seit 1990), bei gleichzeitiger Verringerung der Niederschläge während der saisonalen Trockenzeiten (Marengo 2009, Marengo et al. 2015, Gloor et al. 2015, Granato-Souza et al. 2020). So wurden für die extremen Dürreperioden des zentralen und östlichen Amazonasbeckens während der Jahre 2005 (Phillips et al. 2009) und 2010 (Lewis et al. 2011) beispielsweise die erhöhte Mortalitätsrate von Bäumen beschrieben, was u.a. die Kohlenstoffbilanz des tropischen Regenwaldes in diesen Jahren klimawirksam verändert hat. Derartige Änderungen im Wasserkreislauf führen potenziell zu veränderten Nahrungsketten, Etablierungs- und Wachstumsstörungen, erhöhte Mortalität nativer Pflanzenpopulationen und somit letztlich zum Artensterben oder deren regionalen Verdrängung (Mahli et al. 2008, Wittmann et al. 2013).

Für Auenwälder dienen gestörte Flutregime der Flüsse durch den Bau von Dämmen und Wasserkraftwerken als extremes Modell der künftigen Klimaentwicklung. Dabei sind die ökologischen Konsequenzen des Aufstaus der Flüsse weit über den Bereich der Stauhaltungen hinaus vielfältig: Als unmittelbare Folge verändern Staudämme das natürliche Flutregime, an welches sich die Biota der Auen über evolutionäre Zeiträume angepasst hat (Wittmann et al. 2013, 2022 – s. 9.1). Weitere, kurzfristige Folgen sind erhebliche Veränderungen des Schweb- und Feststoffhaushalts der Fließgewässer (Latrubesse et al. 2017), die Veränderung von Gewässertemperatur, -chemismus und -transparenz, sowie die Unterbrechung der hydrologischen Konnektivität für Drift und Migration von aquatischen und semi-aquatischen Organismen (Nilsson & Berggren 2000). Darüber hinaus erfordert der Bau von Stauanlagen großflächige Entwaldungen in den Reservoiren und durch die Anlage von Straßen und Stromtrassen und begünstigt durch die infrastrukturelle Erschließung den Zustrom von Siedlern, bei gleichzeitiger Verdrängung oder Umsiedlung lokaler Anwohner und/oder die komplette Veränderung ihrer Lebensweise (Fearnside 2015). Als Konsequenz ist der Regenwald um die Wasserkraftwerke und Stauhaltungen nach wenigen Jahren bereits intensiv fragmentiert, was ein lokal deutlich modifiziertes Lokalklima mit z.B. erhöhter Frequenz von Fallwinden und von Starkregenereignissen, aber deutlich reduzierten Jahresniederschlagssummen nach sich zieht (Yin et al. 2014). Dieser „edge effect“ begünstigt wiederrum das Baumsterben feuchtesensitiver Arten und setzt somit einen Trend steigender Entwaldungsraten in Gang.

Im Zuge dieser Problematik untersucht das Projektvorhaben deshalb, wie sich hydroklimatische Extremereignisse und veränderte Flutregime auf das Baumwachstum der wichtigsten Indikator-Baumarten der Schwar- und Klarwasser-Auenwälder auswirken.

4. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Voraussetzungen für das Vorhabens war die Zusammenarbeit mit Kollegen des Nationalen Instituts für Amazonasforschung (INPA, v.a. Schöngart, Piedade, Ribas), Manaus, die Nutzung

der Infrastruktur des INPA, sowie die Möglichkeit, brasilianische Post-graduierten Studierende (Masterarbeiten) vom INPA (Kurse Botanik, Waldbau, Ökologie) in das Vorhaben einzubinden.

Den Kooperationspartnern von Clambio stellt das hiesige Projekt i. W. die floristischen Daten der untersuchten Waldinventuren in den verschiedenen Räumen zur Verfügung, die zu verschiedenen Fragestellungen (z.B. Diversität, Kohlenstoffbilanzen, Produktivität, Bildung von Methan) genutzt werden. Das Projekt stellt ferner wichtige Kohlenstoff-Bilanzierungen als „ground truthing“ für Modellierungen auf Gesamt-Amazonien mittels Fernerkundung dar. Das Projekt kooperiert zudem mit lokalen Instituten und Schutzgebieten, indem Artenlisten, Schutzstatus von Arten, Biodiversität, Biomasse- und Kohlenstoffspeicher sowie Wachstumsmodellierungen für nachhaltige Nutzungsoptionen zur Verfügung gestellt werden, z.B. für lokale Gemeinden, die indigene Bevölkerung und das ISA, sowie den Schutzgebieten und Reservaten (z.B. Jaú National Park).

Außerhalb von Clambio kooperiert das Vorhaben maßgeblich mit der AG MAUA (INPA) sowie das dort, vom brasilianischen Council für Forschung (CNPq) finanzierte und angesiedelte PELD-Program (Long-term monitoring of ecological research) der amazonischen Schwarzwasser-Auenwälder. Bei bereits abgeschlossenen und laufenden Masterarbeiten bestehen Kooperationen zur Föderalen Universität Brasilia (UFBR); dem Brasil. Institut für Feuchtgebietsforschung (INAU), sowie der Föderalen Universität Amazonas (UFAM). Im Bereich floristischer Aufnahmen und Diversitätsforschung bestehen Kooperationen zum Amazon Tree Diversity Network - ATDN, Leiden, Niederlande; Amazon Forest Inventory Network - RAINFOR, Leeds, Großbritannien; University of California – Berkeley, USA und University of Texas, Austin, USA. Von Vorteil erwiesen sich zudem die finanzielle, logistische und fachliche Anbindung an das vom BMBF finanzierte Teilprojekt „ATTO-HydroTraits“ (Verbundvorhaben ATTOplus – Teilprojekt 4: „Diversität der hydraulisch-funktionalen Eigenschaften und Strategietypen der Waldökosysteme im Einzugsbereich des ATTO-Turms in Zeiten des hydrologischen Klimawandels“ – FKZ: 01LK2101D).

5. Wichtigste Positionen des zahlungsmäßigen Nachweises

<u>April 2021-Dezember 2021</u>:

-Ausgabenart 0812, Post-Doc Gehalt anteilig (40%) Dr. Ethan Householder (ab 30.09.2021-31.12.2021), Belege Nr. 13214433, 13202692, 13181141, 13166325.

-Ausgabenart 0822, Beleg Nr. 80130839 (Sachausgaben) für die Durchführung der Exkursion an den oberen Rio Negro (Mariuá Archipel und nahe der Stadt Barcelos).

<u>Januar 2022-Dezember 2022</u>:

-Ausgabenart 0812, Post-Doc Gehalt anteilig (40%) Dr. Ethan Householder (01.01.2022-31.07.2022) sowie Dr. Adriano Quaresma (50%) (01.05.2022-31.12.2022), Belege Nr.

13405793, 13386334, 13389831, 13372684, 13357726, 13342681, 13322807, 13325543, 13307670, 13310407, 13292458, 13295169, 13277683, 13262385, 13246776, und 13229673.

-Ausgabenart 0822, Belege Nr. 20724366 (Beschäftigungsentgelte) und 20794965 (Sachausgaben) für die Durchführung der Exkursion an den unteren Rio Xingu.

Januar 2023-Dezember 2023:

-Ausgabenart 0812, Post-Doc Gehalt anteilig (50%) Dr. Adriano Quaresma (01.01.2023-31.12.2023), Belege Nr. 13584546, 13565243, 135448482, 13532083, 13515471, 13498831, 13482790, 13467673, 13452546, 13437409 und 13418100.

-Ausgabenart 0843, Beleg Nr. 20794965 für die Durchführung der Exkursion an den oberen Rio Xingu (Volta Grande).

Januar 2024-März 2024:

-Ausgabenart 0812, Post-Doc Gehalt anteilig (50%) Dr. Adriano Quaresma (01.01.2024-31.03.2024), Belege Nr. 13664644, 13646983 und 13620173.

-Ausgabenart 0835, Beleg Nr. 20794965 für die Durchführung einer Exkursion an den mittleren Rio Negro (Rio Jaú).

6. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Zuwendung war notwendig, da Unkosten beim a) Personal, b) Reisekosten, c) Feldarbeit und Probenentnahme, und d) Analysen anfielen, die nicht durch institutseigene Mittel finanziert werden konnten.

Die geleistete Arbeit war angemessen, und führte trotz der durch die Corona-Pandemie bedingten Verzögerungen in der Feld- und Laborarbeit zu innovativen Ergebnissen mit einzigartigen wissenschaftlichen Erkenntnissen.

7. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit

Die zu erwartende Ergebnisse des Projektvorhabens über die Baumarten-Diversität im Zusammenhang mit indexierten Wachstumschronologien werden zuverlässige Abschätzungen über die Reaktion von Indikator-Baumarten des Schwarz- und Klarwasser-Auenwälder Amazoniens auf laufende und künftige Änderungen der hydrologischen Regime erlauben, sowie sie durch Klimamodelle (z.B., IPCC 2021) prognostiziert werden. Da v.a. im Überschwemmungswald die ökologischen Nischen der wichtigsten Baumarten entlang des Flutgradienten inzwischen bekannt sind (Householder et al., 2021, s. 9.2), ermöglichen die im Rahmen dieses Projektes generierten Daten zuverlässige Abschätzungen zur Reaktion der untersuchten Baumarten auf veränderte hydrologische Regime, die neben den

Klimaänderungen auch durch die Anlage von Dämmen im Zuge des Baus von Wasserkraftwerken verursacht werden. Des Weiteren wird die Abhängigkeit des Waldwachstums zum Weltklima aufgezeigt, wie z.B. zu den jährlichen, dekadalen, und multidekadalen Anomalien der Oberflächentemperaturen des tropischen Atlantiks und Pazifiks (Schöngart et al. 2004, Marengo, 2009). Diese Ergebnisse werden die Erstellung eines Vulnerabilitäts-Index zur Trocken- und Feuchte-Sensitivität der Baumarten ermöglichen. Unter Nutzung Amazonien-weiter Datenbanken zum Vorkommen, Verbreitung, Stammzahl und oberirdischer Holzbiomasse von Baumarten (beispielsweise ATDN, RAINFOR), erlauben die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens erhobenen Daten auch Hochrechnungen für andere Regionen Amazoniens.

Als Teilergebnis des Forschungsvorhabens mit guter wissenschaftlicher Verwertbarkeit sind zudem die spezifischen Wachstumsmodelle der Baumarten hervorzuheben. Spezifische Wachstumsmodelle erlauben Aussagen über das Wachstumsverhalten und Produktivität der Baumarten und sind deshalb für forstwirtschaftliche und umweltpolitische Belange von hohem Interesse. Das Forscherteam hat solche Wachstumsmodelle bereits für mehr als 30 Baumarten der zentralamazonischen Várzea-Wälder (Weißwasser-Überschwemmungswälder) erstellt (z.B. Schöngart et al. 2005, 2007, Schöngart 2008, Wittmann et al. 2009), auf deren Grundlage in 2010 neue Regularien zum artspezifischem Nutzungszyklus und Mindesteinschlag-Stammdurchmesser seitens des staatlichen Ministeriums für Nachhaltigkeit (Secretaria de Desenvolvimento Sustentável-SDS) des Staates Amazonas, Brasilien, erlassen wurden. Zudem können die Wachstumsmodelle zur Klimarekonstruktion, und in ihrem phänotypischen und ökosystemaren Vergleich als Indikatoren ökologisch funktionaler Attribute (*functional traits*) des Wassernutzungspotentials und weiterer, biotisch und abiotischer Faktoren verwendet werden, mit gutem Potential an wissenschaftlichen Publikationen in internationalen Fachzeitschriften.

Ein weiterer Aspekt der wissenschaftlichen Verwertbarkeit sind die im Rahmen dieses Projektvorhabens durchgeführten Arbeiten zur Erfassung, Beschreibung und Quantifizierung der epiphytischen (Aufsitzer-)Pflanzenarten auf den Auwald-Bäumen (s. 9.1, 9.3, 9.4). In der Gesamtheit der ökologischen Zusammenhänge gehören die oligotrophen Schwarzwasser- und Klarwasser-Überschwemmungswälder zu den am wenigsten untersuchten Ökosystemen Amazoniens. Die Arbeiten zu den Zusammenhängen zwischen Baum- und Epiphytenarten unserer AG sind somit einzigartig für dieses Ökosystem, so dass wir noch einige innovative Publikationen erwarten. Darüber hinaus bieten sich ebenfalls Untersuchungen zu anderen, von Bäumen abhängige Organismengruppen an, wie z.B. zu symbiontischen Endo- und Ekto-Mykorrhiza, Bestäuber, Verbreiter, etc.

8. Bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens

Seit Projektbeginn erschienen verschiedene Publikationen zu den Folgen des Klimawandels in

Amazonien, sowie dessen Auswirkung auf den Abfluss amazonischer Flüsse, sowie das in Frequenz und Intensität zunehmende Auftreten von klimatischen Extremen (z.B. Espinoza et al. 2021, Parrens et al. 2023, Vergasta et al. 2023, Marengo et al. 2024, Schöngart et al. 2024), sowie dessen Auswirkungen auf das Baumwachstum (z.B. Cintra et al. 2021, Durgante et al. 2023, Mori et al. 2024, Sá et al. 2024, s. 9.1). Im Wesentlichen belegen diese Publikationen den zunehmenden Trend der Zunahme von extremen Klimaereignissen und deren Auswirkungen auf die Physiologie und Produktivität der amazonischen Baumarten. Zunehmend kommt es bei diesen Untersuchungen zur Quantifizierung hydraulisch-funktionaler Eigenschaften (functional traits) von Bäumen, die als Indikatoren veränderter Physiologie und Wachstumsstörungen dienen können (z.B. Fontes et al. 2020, Durgante et al. 2023, Mori et al. 2024, s. 9.2).
Zwischenzeitlich wurde in Kooperation mit Forschern vom INPA und KIT ein Modell ökologischer Nischen von 111 Baumarten des Schwarzwasser-Überschwemmungswaldes des Rio Negro entlang des Flutgradienten entwickelt (Householder et al. 2021, s. 9.2). Das Verbreitungsmodell wird als Basis für die Erstellung des Vulnerabilitäts-Index für die hier untersuchten Baumarten des Überschwemmungswaldes verwendet, da die maximale Toleranz gegenüber Änderungen der hydrologischen Regime nun bekannt ist, und anhand der Ergebnisse dieses Projektvorhabens physiologisch charakterisiert werden kann. Für die Baumarten der terrestrischen Ökosysteme werden Klimaänderungen unterschiedlicher Szenarien des Intergovernmental Panel of Climate Change (2021) verwendet.

9. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

9.1 Erfolgte Veröffentlichung mit unmittelbarem Projektbezug

-Sá PA, Schöngart J, Wittmann F, Piedade MTF, Tomazello Filho M, Oliveira RS, Horna V, Parolin P, Durgante FM (2024): Hydrological and climate intensification induces conservative behavior in the *Hydrochorea corymbosa* xylem production in a central Amazon floodplain forest. *Frontiers in Ecology and Evolution* 12: doi.org/10.3389/fevo.2024.1292132.

-Quaresma AC, Zuquim G, Demarchi LO, Ribas CC, Wittmann F, et al. (2024): Belo Monte dam Impacts: Protagonism of local people in research and monitoring reveals ecosystem service decay in Amazonian flooded vegetation. Under review in *Perspectives in Ecology and Conservation* – Pecon. Preprint published at ResearchSquare doi.org/10.21203/rs.3.rs-5090303/v1.

-Juruna JJP, Silva R, Reis OB, Assunção AM, Silva AS, Silva HB, Juruna JJP, NunesJA, Kleme MSS, Ferreira PP, Juruna RTVS, Santos RS, Lima SR, Lima SB, Pereira TJC, Quaresma A, Sawakuchi AO, Ribas CC, Ritter CD, Carneiro CC, De Paula EMS, Zuquim G, Palmquist H, Wahnfried I, Jesus JS, Muriel-Cunha J, Zuanon J, Pezzuti JCB, Medeiros MSS, Lopes PFM, Mantovanelli TR (2024): Indigenous and ribeirinho's monitoring reveals socio-

environmental impacts of severe Xingu River drought driven by Belo Monte, the world's fifth-largest hydroelectric power plant in the Amazon (2025). In press in *Biological Conservation*. Preprint published at ResearchSquare, doi.org/10.21203/rs.3.rs-5090322/v2.

-Householder JE, Wittmann F, Schöngart J, et al. (2024): One sixth of Amazonian tree diversity is dependent on river floodplains. *Nature Ecology & Evolution* doi.org: 10.1038/s41559-024-02364-1.

-Santos da Silva J, Piedade MTF, Klein VP, Durgante FM, Wittmann F, Quaresma AC (2023): Large diameters and tree bark physical attributes drive vascular epiphyte-phorophyte relationships in Amazonian black-water floodplain forests. *Plant Ecology* 225:1-11. doi.org: 10.1007/s11258-023-01387-1.

-Wittmann F, Householder JE, Piedade MTF, et al. (2022): A review of the ecological and biogeographic differences of Amazonian floodplain forests. *Water* 14:3360, doi.org/10.3390/w14213360.

-Quaresma AC, Zartman CE, Piedade MTF, Wittmann F, et al. (2022): The Amazon Epiphyte Network: A first glimpse into continental-scale patterns of Amazonian vascular epiphyte assemblages. *Frontiers in Forests and Global Change* 5:828759. doi.org: 10.3389/ffgc.2022.828759.

9.2 Erfolgte Veröffentlichungen in Kooperation zum Projekt

- Mori GB, Schöngart J, Schietti J, Householder JE, Robin M, Wittmann F, Poorter L, Piedade MTF (2024): Ecosystem type affects how Amazonian tree species invest in stem and twig wood. *Functional Ecology* 38:1486-1496. doi.org/10.1111/1365-2435.14572.

-Conde MLG, Piedade MTF, Wittmann F, Nascimento RGM, Schöngart J (2024): Evaluation of the management potential of timber resources in Clearwater floodplain forests in the Amazon using growth models. *Journal of Environmental Management* 351:119781. doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119781.

-Durgante F, Higuchi N, Ohashi S, Householder JE, Nogueira Lima AJ, Ishizuka M, Wittmann F, et al. (2023): Soil fertility and drought interact to determine large variations in wood production for a hyperdominant Amazonian tree species. *Frontiers in Forests and Global Change* 5, doi.org/10.3389/ffgc.2022.1065645.

-Alves YLA, Durgante FM, Piedade MTF, Wittmann F, Schöngart J (2023): Tree growth performance and xylem functional arrangements of *Macrolobium* Schreb. (Fabaceae) in different wetland forests in the Central Amazon basin. *Trees* doi.org/10.1007/s00468-023-02469-3.

-Gonçalves JQ, Durgante FM, Wittmann F, Piedade MTF, Rodriguez DRO, Tomazello-Filho M, Parolin P, Schöngart J (2021): Minimum temperature and evapotranspiration in central Amazonian floodplains limit tree growth of *Nectandra amazonum* (Lauraceae). *Trees* (online): doi.org/10.1007/s00468-021-02126-7.

-Carvalho TC, Wittmann F, Piedade MTF, Resende AF, Silva TSF, Schöngart J (2021): Fires in Amazonian blackwater floodplain forests: Causes, human dimension, and implications for conservation. *Frontiers in Forests and Global Change* 4:755441. doi: 10.3389/ffgc.2021.755441.

-Householder JE, Schöngart J, Piedade MTF, Junk WJ, Ter Steege H, et al. (2021): Modelling the ecological responses of tree species to the flood pulse of the Amazon Negro River floodplains. *Frontiers in Ecology and Evolution* 9:628606. doi: 10.3389/fevo.2021.628606.

-Schöngart J, Wittmann F, Resende AF, Assahira C, Lobo GS, Neves JRD, Rocha M, et al. (2021): The shadow of the Balbina dam: a synthesis of over 35 years of downstream impacts on floodplain forests in Central Amazonia. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 31:117-1131. doi:10.1002/aqc.3526.

9.3 Laufende Master- und Doktorarbeiten

-Dayane dos Santos Silva: Age and diameter increment of Amazonian black-water floodplain tree species in relation to the abundance and diversity of vascular epiphyte species. (Masterarbeit), Beginn: März 2023, Post-Graduierten Kurs Botanik am INPA, Betreuer: Quaresma, Wittmann; Stipendium seitens des Brasilianischen Council für Wissenschaft und Technik-CNPq). Voraussichtlicher Abschluss: März 2025.

-Randolpho Dias Terceiro: Distribution patterns and biogeography of vascular epiphytes in Amazonian black-water floodplain forests (Doktorarbeit), Beginn: August 2021, Post-Graduierten Kurs Botanik am INPA, Betreuer: Quaresma, Piedade; Stipendium seitens des Brasilianischen Council für Wissenschaft und Technik-CNPq). Voraussichtlicher Abschluss: August 2025.

9.4. Abgeschlossene Bachelor- und Masterarbeiten

-Adson Henrique da Silva Mota: Establishment and growth of *Macolobium acaciifolium* in central Amazonian black-water floodplain forests" (Bachelorarbeit), Beginn: Februar 2022, Kurs Botanik an der Föderalen Universität Amazonas (UFAM), Betreuer: Schöngart, Piedade; Juni 2024.

-Jeisiane Santos da Silva: Functional variation in stem barks of trees in central Amazonian black-water floodplain forests in relation to the occurrence and abundance of vascular epiphyte species. (Masterarbeit), Beginn: November 2020, Post-Graduierten Kurs Botanik am INPA, Betreuer: Quaresma, Piedade; Stipendium seitens des Brasilianischen Council für Wissenschaft und Technik-CNPq). Abschluss: November 2022.

-Keller Mauricio dos Santos Lucas: Effectivity of conservation units for the protection of Amazonian vascular epiphytes. (Masterarbeit), Beginn: August 2021, Post-Graduierten Kurs Botanik am INPA, Betreuer: Quaresma, Lopes; Stipendium seitens des

Brasilianischen Council für Wissenschaft und Technik-CNPq). Abschluss: August 2023.

-Samuel Feitosa do Carmo: Diversity and distribution of epiphytic bryophytes in central Amazonian black-water floodplain forests. (Masterarbeit), Beginn: August 2021, Post-Graduierten Kurs Botanik am INPA, Betreuer: Quaresma; Stipendium seitens des Brasilianischen Council für Wissenschaft und Technik-CNPq). Abschluss: Februar 2024.

9.5 Geplante Veröffentlichungen

-Quaresma, Wittmann, et al.: Diversity, forest structure and population dynamics of tree species in Amazonian black-water and clear-water floodplain forests.

Mori, Wittmann, Schöngart, et al.: Aboveground wood biomass and C-sequestration of black-water and clear-water floodplain forests.

Wittmann, Quaresma, Schöngart, et al.: Floristic composition and aboveground wood biomass of clear-water floodplain forests along the Xingu Volta Grande river stretch.

-Schöngart, Quaresma et al.: Comparative mean radial increment of two *Hevea* species in different floodplain forests of the Amazon basin.

-Da Silva Mota, Schöngart, et al.: Paleoclimatic and paleo-hydrological reconstruction of the growth conditons of *Macrolobium acaciifolium* at the lower Negro and lower Xingu Rivers.

-Wittmann, Schöngart, Quaresma, et al.: A vulnerability index of Amazonian floodplain forests to fire and climate change.

-Santos Lucas, Quaresma, et al.: Effectivity of conservation units for the protection of Amazonian vascular epiphytes.

-Ribas CC, Tuomisto H, Wittmann F, et al.: A review of the drivers of Amazonian biodiversity losses.

-Householder, Wittmann, et al.: HOF models revisited: Modelling annual wood increment and carbon sequestration in Amazonian floodplain forests based on historical climate and river-level data.

9.6 Kongress- und Fachvorträge

-

-Wittmann F (2021): Aquatic Biodiversity International Conference - ABIC, Sibiu-Rumänien, 21.09.2021

-Wittmann F (2021): Deltas and Wetlands, Danube Delta National Institute, Tulcea, Rumänien. 15.09.2021.

-Schöngart J (2021): IV Simpósio de Biologia Aquática e Pesca na Amazonia. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), Manaus, Brasilien, 10.11.2021.

-Durgante FM (2021): Virtual ATTO Workshop, INPA, Manaus, Brasilien, 04.10.-08.10.2021.

-Wittmann F (2023): ATTO-Workshop (Manaus, Brasilien): Präsentation von 5 Postern zu vorläufigen Resultaten des Projektvorhabens.

-Wittmann, F (2024): European Conference of Tropical Ecology, Lissabon, Portugal.
-Householder, JE (2024): European Conference of Tropical Ecology, Lissabon, Portugal.

10. Verwendete Literatur

Alves YLA, Durgante FM, Piedade MTF, Wittmann F, Schöngart J (2023): Tree growth performance and xylem functional arrangements of Macrolobium Schreb. (Fabaceae) in different wetland forests in the Central Amazon basin. Trees doi.org/10.1007/s00468-023-02469-3.

Andreae MO, Acevedo AC, Araújo A, *et al.*, (2015): The Amazon Tall Tower Observatory (ATTO) in the remote Amazon basin: overview of first results from ecosystem ecology, meteorology, trace gas, and aerosol measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics* 15: 10723-10776.

Assahira C, Piedade MTF, Trumbore SE, Wittmann F, Cintra BBL, Batista ES, Resende AF de, Schöngart J (2017): Tree mortality of a flood-adapted species in response of hydrographic changes caused by an Amazonian River dam. Forest Ecology and Management 396:113-123.

Assunção AM, Sampaio da Silva A, Da Silva HB, Juruna JJP, et al. (2024): Voices of the Xingu: Community-based monitoring reveals the impacts of the permanent drought imposed to an Amazonian River by the Belo Monte Hydroelectric Power Plant. ResearchSquare, doi.org/10.21203/rs.3.rs-5090322/v2.

Banerjee O, Cicowiez M, Macedo MN, Malek Z, et al. (2022): Can we avert an Amazon tipping point?The economic and environmental costs. Environmental Research Letters 17:125005.

Barichivich J, Gloor E, Peylin P, Brienen RJW, Schöngart J, Espinoza JC, Pattnayak KC (2018): Recent intensification of Amazon flooding extremes driven by strengthened Walker circulation. Science Advances 4:eaat8758.

Carvalho TC, Wittmann F, Piedade MTF, Resende AF, Silva TSF, Schöngart J (2021): Fires in Amazonian blackwater floodplain forests: Causes, human dimension, and implications for conservation. Frontiers in Forests and Global Change 4:755441. doi: 10.3389/ffgc.2021.755441.

Cintra BBL, Gloor M, Boom A, Schöngart J, Baker JCA, Cruz FW, Clerici S, Brienen RJW (2021): Tree-ring oxygen isotopes record a decrease in Amazon dry season rainfall over the past 40 years. Climate Dynamics 10.1007/s00382-021-06046-7.

Conde MLG, Piedade MTF, Wittmann F, Nascimento RGM, Schöngart J (2024): Evaluation of the management potential of timber resources in Clearwater floodplain forests in the Amazon using growth models. Journal of Environmental Management 351:119781. doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119781.

Correa SB, Costa-Pereira R, Fleming T, Goulding M, Anderson JT (2015): Neotropical fish-fruit interactions: Eco-evolutionary dynamics and conservation. Biol. Rev. 90:1263–1278.

Durgante F, Higuchi N, Ohashi S, Householder JE, Nogueira Lima AJ, Ishizuka M, Wittmann F, Dos Santos J, Carneiro VMC, Xu X, Nacimento CC, Schöngart J, Piedade MTF, Schmitt ARK, Alves YLA, Lehmann J, Gimenez BO, Ourique LK, Trumbore S (2023): Soil fertility and drought interact to determine large variations in wood production for a hyperdominant Amazonian tree species. Frontiers in Forests and Global Change 5, doi.org/10.3389/ffgc.2022.1065645.

Engelbrecht, BMJ, Comita LS, Condit R, *et al.* (2007) Drought sensitivity shapes species distribution patterns in tropical forestes. *Nature* 447: 80-82.

Espinoza J-C, Marengo JA, Schöngart J, Jimenez JC (2021): The new historical flood of 2021 in the Amazon River compared to major floods of the 21st century: Atmospheric features in the context of the intensification of floods. Weather and Climate Extremes 35:100406.

Fearnside PM (2015): Emissions from tropical hydropower and the IPCC. Environmental Science & Policy 50:225-239.

Ferreira LV (2000): Effect of flooding duration on species richness, floristic composition and forest structure in river margin habitats in Amazonian blackwater floodplain forests: implications for future design of protected areas. Biodivers Conserv 9:1–14.

Fontes CG, Fine PVA, Wittmann F, Bittencourt PRL, Piedade MTF, Higuchi N, Chambers JQ, Dawson TE (2020): Convergent evolution of tree hydraulic traits in Amazonian habitats: implications for community assemblage and vulnerability to drought. New Phytologist 228:106-120. doi: 10.1111/nph.16675.

Gloor, M., Barichivich, J., Ziv, G., Brienen, R., Schöngart, J., Peylin, P., et al. (2015): Recent Amazon climate as background for possible ongoing and future changes of Amazon humid forests. Glob. Biogeochem. Cycles 29:1384–1399.

Gonçalves JQ, Durgante FM, Wittmann F, Piedade MTF, Ortega Rodriguez DR, Tomazello-Filho M, Parolin P, Schöngart J (2021): Minimum temperature and evapotranspiration in Central Amazonian floodplains limit tree growth of *Nectandra amazonum* (Lauraceae). Trees-Structure and Function. doi:10.1007/s00468-021-02126-7.

Granato-Souza D, Stahle DW, Torbenson MCA, Howard IM, Barbosa AC, Feng S, Fernandes K, Schöngart J (2020): Multidecadal changes in wet season precipitation totals over the eastern Amazon. Geophysical Research Letters 10.1029/2020GL087478.

Householder JE, Schöngart J, Piedade MTF, Junk WJ, Ter Steege H, Montero JC, Assis RL, et al. (2021): Modelling the ecological responses of tree species to the flood pulse of the Amazon Negro River floodplains. Frontiers in Ecology and Evolution 9:628606. doi: 10.3389/fevo.2021.628606.

Householder JE, Wittmann F, Schöngart J, Piedade MTF, Junk WJ, Latrubesse EM, et al. (2024): One sixth of Amazonian tree diversity is dependent on river floodplains. Nature Ecology & Evolution doi.org/10.1038/s41559-024-02364-1.

IPCC Sixt Assessment Report, https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/.

Junk WJ, Piedade MTF, Schöngart J, Cohn-Haft M, Adeney JM, Wittmann F (2011): A classification of major naturally-occurring Amazonian lowland wetlands. *Wetlands* 31: 623-640.

Junk WJ, Piedade MTF, Wittmann F, Kandus P, Lacerda LD, Bozelli RL, Esteves FA, Nunes da Cunha C, Maltchik L, Schöngart J, Schaeffer-Novelli Y, Agostinho AA (2014): Brazilian wetlands: their definition, delineation and classification for research, sustainable management and protection. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 24: 5-22.

Juruna JJP, Silva RC, Reis OB, Assunção AM, et al. (2024): Community-based monitoring reveals the impacts of the permanent river drought imposed by the Belo Monte Hydroelectric Power Plant at Volta Grande do Xingu, Amazonia. ResearchSquare, doi.org/10.21203/rs.3.rs-5090322/v1.

Latrubesse EM, Arima EY, Dunne T, Park E, Baker VR, d'Horta FM, Wight C, Wittmann F, Zuanon J, Baker PA, Ribas CC, Norgaard RB, Filizola N, Ansar A, Flyvbjerg E, Stevaux JC (2017): Damming the rivers of the Amazon basin. Nature 546: 363-369.

Lewis, S.L., Brando, P.M., Phillips, O.L., et al. (2011): The 2010 Amazon drought. Science 331:554.

Lobo GS, Wittmann F, Piedade MTF (2019): Response of black-water floodplain (igapó) forests to flood pulse regulation in a dammed Amazonian river. Forest Ecology and Management 434:110-118. doi: 10.1016/j.foreco.2018.12.001.

Lopes A, Demarchi LO, Franco AC, Ferreira AB, Ferreira CS, Wittmann F, Santiago IN, da Cruz J, da Silva JS, Schöngart J, de Souza SNG, Piedade MTF (2021): Predicting the potential distribution of aquatic herbaceous plants in oligotrophic central Amazonian wetland ecosystems. Acta Botanica Brasilica. doi: 10.1590/0102-33062020abb0188.

Lovejoy TE, Nobre C (2018): Amazon Tipping Point. Science Advances 4:eaat2340 (2018).

Mahli Y, Roberts JT, Betts RA, *et al.* (2008): Climate change, deforestation and the fate of the Amazon. *Science* 319: 169-172.

Marengo JA (2009): Long-term trends and cycles in the hydrometeorology of the Amazon basin since the late 1920s. *Hydrological Processes* 23: 3236–3244.

Marengo JA, Espinoza JC (2015): Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: causes, trends and impacts. *International Journal of Climatology* (doi: 10.1002/joc.4420).

Marengo JA, Espinoza JC (2016): Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: causes, trends and impacts. Int J Climatol 36:1033–1050.

Marengo JA, Espinoza JC, Fu R, et al. (2024): Long-term variability, extremes and changes in temperature and hydrometeorology in the Amazon region: A review. Acta Amazonica 54: e54es22098.

Marques L (2024): Crossing tipping points in the Amazon rainforest: The decisive decade. The Highlander Journal 3:4-33.

Montero JC, Piedade MTF, Wittmann F (2014): Floristic variation across 600 km of black-water inundation forests (igapó) along the Brazilian Negro River. Hydrobiologia 729:229-246.

Mori GB, Schöngart J, Schietti J, Householder JE, Robin M, Wittmann F, Poorter L, Piedade MTF (2024): Ecosystem type affects how Amazonian tree species invest in stem and twig wood. Functional Ecology 38:1486-1496. doi.org/10.1111/1365-2435.14572.

Neves JRD, Piedade MTF, Resende AF, Feitosa YO, Schöngart J (2019): Impact of climatic and hydrological disturbances on black-water floodplain forests in Central Amazonia. Biotropica 51:484–489.

Nilsson C, Berggren K (2000): Alterations of riparian ecosystems caused by river regulation. BioScience 50:783-792.

Parolin P, De Simone O, Haase K, Waldhoff D, Rottenberger S, Kuhn U, et al. (2004): Central Amazon floodplain forests: Tree survival in a pulsing system. Bot. Rev. 70:357–380.

Parolin P, Lucas C, Piedade MTF, Wittmann F (2010): Drought responses of flood-tolerant trees in Amazonian floodplains. *Annals of Botany* 105: 129-139.

Parrens M, Al Bitar A, Fleischmann A (2023): Monitoring extreme floods and droughts in the Amazon Basin with surface-water-based indices. Journal of Hydrometeorology 24:1417-1436.

Phillips, O.L., Aragão, L.E.O.C., Lewis, S.L., et al. (2009): Drought sensitivity of the Amazon rainforest. Science 323: 1344-1347.

Quaresma AC, Zartman CE, Piedade MTF, Wittmann F, et al. (2022): The Amazon Epiphyte Network: A first glimpse into continental-scale patterns of Amazonian vascular epiphyte assemblages. Frontiers in Forests and Global Change 5:828759. doi.org: 10.3389/ffgc.2022.828759.

Quaresma A, Zuquim G, Demarchi LO, Ribas CC, Wittmann F, Assuncao AM, et al. (2024): Belo Monte dam impacts: Protagonism of local people in research and monitoring reveals ecosystem service decay in Amazonian flooded vegetation. Research Square doi.org/10.21203/rs.3.rs-5090303/v1.

Resende AF, Piedade MTF, Feitosa YO, Andrade VHF, Trumbore SE, Durgante FM, Macedo MO, Schöngart J (2020): Flood pulse disturbances as a threat for long-living Amazonian trees. New Phytologist 227:1790-1803. doi: 10.1111/nph.16665.

Sá PA, Schöngart J, Wittmann F, Piedade MTF, Tomazello Filho M, Oliveira RS, Horna V, Parolin P, Durgante FM (2024): Hydrological and climate intensification induces conservative behavior in the Hydrochorea corymbosa xylem production in a central Amazon floodplain forest. Frontiers in Ecology and Evolution 12: doi.org/10.3389/fevo.2024.1292132.

Santos da Silva J, Piedade MTF, Klein VP, Durgante FM, Wittmann F, Quaresma AC (2023): Large diameters and tree bark physical attributes drive vascular epiphyte-phorophyte relationships in Amazonian black-water floodplain forests. Plant Ecology 225:1-11. doi.org: 10.1007/s11258-023-01387-1.

Schöngart J, Junk WJ, Piedade MTF, *et al*. (2004): Teleconnection between tree growth in the Amazonian floodplains and the El Niño-Southern Oscillation effect. *Global Change Biology* 10: 683–692.

Schöngart J, Wittmann F, Piedade MTF, Junk WJ, Worbes M (2005): Wood growth patterns of *Macrolobium acaciifolium* (Benth.) Benth. (Fabaceae) in Amazonian black-water and white-water floodplain forests. *Oecologia* 145: 454-461.

Schöngart J, Wittmann F, Worbes M, Piedade MTF, Krambeck HJ, Junk WJ (2007): Management options for *Ficus insipida* Willd. (Moraceae) in Amazonian white-water floodplain forests. *Annals of Forest Science* 64: 657-664.

Schöngart, J. (2008): Growth-oriented logging (GOL): A new concept towards sustainable forest management in Central Amazonian varzea floodplains. For Ecol Manage 256:46-58.

Schöngart J, Wittmann F, Resende AF, Assahira C, Lobo GS, Neves JRD, Rocha M, Mori GB, Quaresma AC, Demarchi LO, Albuquerque BW, Feitosa YO, Costa GS, Feitoza GV, Durgante FM, Lopes A, Trumbore SE,

Silva TSF, Ter Steege H, Val AL, Junk WJ, Piedade MTF (2021): The shadow of the Balbina dam: a synthesis of over 35 years of downstream impacts on floodplain forests in Central Amazonia. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems 31:117-1131. Doi:10.1002/aqc.3526.

Schöngart J, Wittmann F, Junk WJ, Lopes A, Demarchi LO, Mori GB, Resende AF, Durgante F, Quaresma AC, Householder JE, Costa G, Albuquerque BW, Rocha M, Alves Y, Reboucas E, Franco AC, Ferreira CS, Parolin P, Piedade MTF (2024): Fate of floodplain forests in a changing Amazon. In: Silva de Souza S, Braz-Mota S, Val AL (eds.): The future of Amazonian aquatic biota. Springer, New York, pp. 163-222.

Sombroek W (2001): Spatial and temporal patterns of Amazon rainfall. Consequences for the planning of agricultural occupation and the protection of primary forests. Ambio 30:388-396.

Stahle DW, Torbenson MCA, Howard IM, Granato-Souza D, Barbosa AC, Feng S, Schöngart J, Lopez L, Villalba R, Villanueva J, Fernandes K (2020): Pan American interactions of amazon precipitation, streamflow and tree growth extremes. Environmental Research Letters 15:104092.

Stohlgren TJ, Falkner MB, Schell LD (1995): A Modified-Whittaker nested vegetation sampling method. Vegetatio 117:113-121.

Targhetta N, Kesselmeier J, Wittmann F (2015): Effects of the hydroedaphic gradient on tree species composition and aboveground wood biomass of oligotrophic forest ecosystems in the central Amazon basin. Folia Geobotanica 50:185-205.

Vergasta LA, Correia FWS, Satyamurty P, Chou SC, Lyra AA, Brito Gomes W, Fleischmann A, Papa F (2023): An assessment of the present hydroclimatic regime of the Madeira River basin using climate and hydrological models. Hydrological Sciences Journal 68:1338-1357.

Wittmann F, Schöngart J, Montero JC, Motzer T, Junk WJ, Piedade MTF, Queiroz HL, Worbes M (2006): Tree species composition and diversity gradients in white-water forests across the Amazon basin. Journal of Biogeography 33: 1334-1347.

Wittmann F, Schöngart J, Queiroz HL, De Oliveira Wittmann A, Conserva AS, Piedade MTF, Kesselmeier J, Junk WJ (2009): The Amazon Floodplain Demonstration Site: Sustainable timber production and management of Central Amazonian white-water floodplains. *Ecohydrology and Hydrobiology* 9: 41-54.

Wittmann F, Schöngart J, Brito JM, Oliveira Wittmann A, Parolin P, Piedade MTF, Junk WJ, Guillaumet J-L (2010): Manual of tree species from central Amazonian white-water (várzea) floodplains: Taxonomy, Ecology and Use. Text in English and Portuguese. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - INPA, Manaus, ISBN 978-85-211-0067-6, 298 p.

Wittmann, F., Householder, E., Piedade, M.T.F., Assis, R.L., Schöngart, J., Parolin, P. & Junk, W.J. (2013): Habitat specificity, endemism and the neotropical distribution of Amazonian white-water floodplain trees. *Ecography* 36:690-707.

Wittmann F, Marques MCM, Damasceno Júnior C, Budke JC, Piedade MTF, Oliveira Wittmann A, Montero JC, Assis RL, Targhetta N, Parolin P, Junk WJ, Householder JE (2017): The Brazilian freshwater wetscape: changes in tree community diversity and composition on climatic and geographic gradients. PloS one 12(4):e0175003.

Wittmann F, Damm C, Schöngart J (2019): Der Sandwich-Effekt: Einengung von Habitaten durch Staudämme gefährdet die größten und artenreichsten Überschwemmungswälder der Erde. Auenmagazin 15:49-53.

Wittmann F, Householder JE, Piedade MTF, Schöngart J, Demarchi LO, Quaresma AC, Junk WJ (2022): A review of the ecological and biogeographic differences of Amazonian floodplain forests. Water 14:3360, doi.org/10.3390/w14213360.

Worbes M (1984): Periodische Zuwachszonen an Bäumen zentralamazonischer Überschwemmungswälder. Naturwissenschaften 71:157–158.

Worbes M (1989): Growth rings, increment and age of tree in inundation forest, savannas and a mountain forest in the Neotropics. IAWA Bull 10(2):109–122.

Worbes M, Fichtler E (2010): Wood anatomy and tree ring structure and their importance for tropical dendrochronology. In: Junk WJ, Piedade MTF, Wittmann F, Schöngart J, Parolin P (eds.): Amazonian Floodplain forests: Ecophysiology, Biodiversity and Sustainable Management. Ecological Studies 210,

Springer Verlag, Heidelberg, Berlin, New York, ISBN 978-90-481-8724-9, pp. 329-346.
Yin L, Fu R, Zhang Y-F, et al. (2014): What controls the interannual variation of the wet season onsets over the Amazon? Journal of Geophysical Research: Atmospheres 119: 2314–2328.

-