

# Rastreamento de origem e georreferenciamento de vestígios criminais com base em traçadores isotópicos e elementares

Coordenadores: *Luiz Antonio Martinelli* – CENA/USP  
*Fábio Costa* – INC/PF  
***Gabriela Nardoto*** - UnB

- **Objetivo geral:** consolidar o uso de isótopos estáveis em Ciências Forenses no país
- **Objetivo científico:** aperfeiçoamento de modelos isotópicos de atribuição de origem geográfica: (i) *drogas ilícitas naturais* como cocaína e maconha, (ii) *remanescentes humanos* (ossos e dentes) e (iii) *madeiras extraídas ilegalmente na região amazônica*.
- **Objetivo acadêmico:** formação de alunos e técnicos especializados no uso da metodologia isotópica voltada à Ciência Forense.
- **Objetivo tecnológico:** A consolidação do uso rotineiro de métodos isotópicos no combate ao crime, inicialmente, através da Polícia Federal; mas como meta de médio a longo-prazo, incorporar o uso desta metodologia também em órgãos estaduais de segurança.

# Equipe

## SEMINÁRIO DE IMPLEMENTAÇÃO

Edital 16/2021 – Procad Segurança Pública e Ciências Forenses

**Bastos, M. Q. R.,** *Museu Nacional/UFRJ* – bioantropólogo, análise material dentário e ósseo

**Carmargo, P.,** *CENA* – coordenação analítica, análise isótopos estáveis

**Costa, F.,** *INC-PF* – coordenação transferência tecnologia, construção de *isoscapes*

**Duarte-Neto, P.,** *UFRPE* – modelos matemáticos de atribuições de origem geográfica

**Freitas, J. M.,** *INC-PF* – drogas naturais

**Higuchi, N.,** *INPA* – identificação de madeiras comercializadas na Amazônia

**Kafino, C.,** *INC-PF* – geóloga, análises de isótopos estáveis

**Machado, C. E. P.,** *INC-PF* – odontologia forense

**Martinelli, L. A.,** *CENA* – coordenação geral e científica, interpretação isótopos estáveis

**Moreira, Marcelo Zacharias,** *CENA* – análises isotópicas, análise isótopos estáveis

**Nardoto, G. B.,** *UnB* – coordenação acadêmica, interpretação isótopos estáveis

**Rodrigues-Carvalho, C.,** *Museu Nacional/UFRJ* – antropologia forense

**Santos, Roberto Ventura,** *UnB* – análises e interpretação razões isotópicas

**Saraiva, A. –** *Ex-Superintendência Polícia Federal, AM*, análises madeiras da Amazônia

**Sena-Souza, J. P.,** *Universidade Federal de Montes Claros* – construção de *isoscapes*

**Tinoco, R.,** *Universidade Salgado de Oliveira* -odontologia forense



Projeto de pós-doutorado:

***Aprimoramento de isoscapes de  $\delta^2\text{H}$  e  $\delta^{18}\text{O}$  para o Brasil***

***Eduardo Mariano***

Projeto de doutorado:

**Distribuição espacial (isoscapes) da razão isotópica da água de abastecimento de municípios do Nordeste brasileiro**

***Carina Carlos de Arruda***

***Perita Criminal Polícia Civil do Estado do Piauí***

Projeto de doutorado:

**Uso da composição do isótopo estável de oxigênio na determinação da origem de espécies madeireiras de interesse comercial oriundas da região Amazônica**

***Ana Cláudia Batista***

Projeto de mestrado:

**Caracterização da variação isotópica de C e N de populações contemporâneas para identificação humana**

***Juliana Soares Emenes***



**2014:** Programa Ciências Forenses nº 25/2014 (Pró-Forense)  
**Desenvolvimento e aperfeiçoamento de metodologias baseadas em marcadores moleculares e isótopos estáveis aplicáveis no combate aos crimes contra a fauna brasileira**  
Coordenadora: *Gabriela Nardoto*

**2017:** workshop **Ciência Contra o Tráfico de Animais Silvestres**, organizado pelo projeto **Origem** da *Polícia Federal*  
Coordenador: *Fábio Costa*

**2019:** Superintendência da Polícia Federal em Manaus adquire um Isotope Ratio Mass Spectrometry (IRMS)  
*Alexandre Saraiva*

**2019: RENIF – Rede Nacional de Isótopos Forenses** ([www.renifbrasil.org](http://www.renifbrasil.org)), criada durante o *InterForensics* na cidade de São Paulo



**2019 - 1º Workshop Nacional sobre Isótopos Forenses.**

**2020 - 2º Workshop Nacional sobre Isótopos Forenses.**

**2021 (Agosto) - 2º Workshop Nacional sobre Isótopos Forenses.**

**2020: LANIF** – Laboratório Nacional de Isotopia Forense, Instituto Nacional de Criminalística (INC), Polícia Federal, Brasília

Aquisição IRMS – Isotope Ratio Mass Spectrometry (Está chegando).

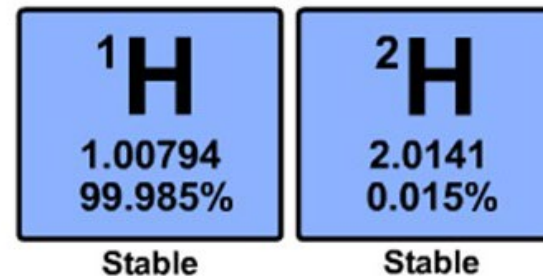
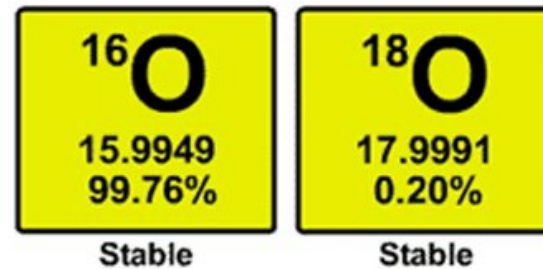
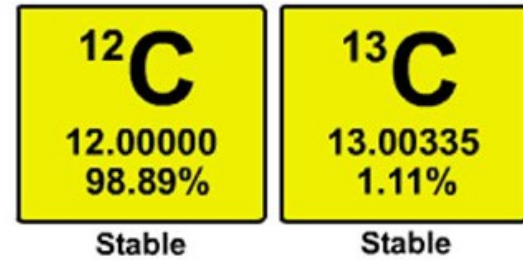
*Jorge M. Freitas*

*Camilla Kafino*

*Fábio Costa*

# Metodologia Isotópica

**ISÓTOPOS ESTÁVEIS**  
mesmo  $n$  prótons  
diferente  $n$  nêutrons



$$R = \frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}}$$

$$R = \frac{^{15}\text{N}}{^{14}\text{N}}$$

$$R = \frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}}$$

$$R = \frac{^2\text{H}}{^1\text{H}}$$

$$\delta = \frac{R_{amostra}}{R_{padrão}} - 1$$

Atomic species	Atomic species	R
Carbon	PDB	0.0112372
Nitrogen	Atmosphere	0.0036765
Oxygen	VSMOW	0.0020005
Deuterium	VSMOW	0.0001558

$$\delta^{13}\text{C} = \left( \frac{0.0109554}{0.0112372} - 1 \right) = -0.0250774$$

$$\delta^{13}\text{C} = -0.0250774 \times 1000 = -25.1\text{‰}$$

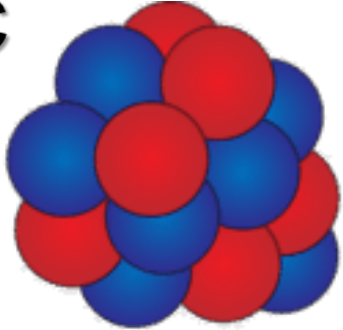
$\delta^{13}\text{C}$

$\delta^{15}\text{N}$

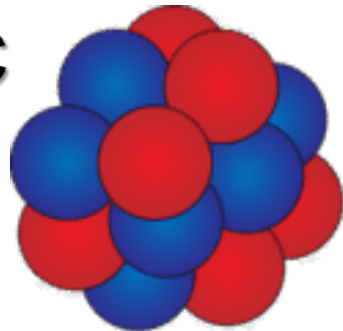
$\delta^{18}\text{O}$

$\delta^2\text{H}$   
( $\delta\text{D}$ )

$^{13}\text{C}$



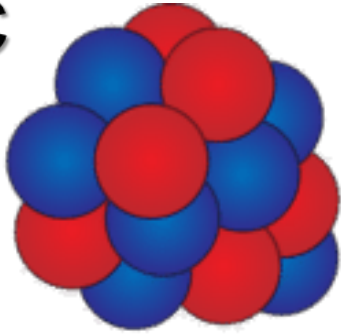
$^{12}\text{C}$



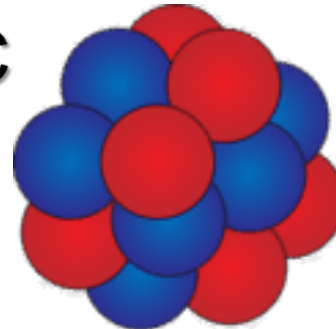


# Isotopic discrimination or fractionation

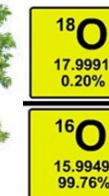
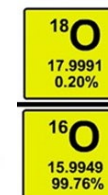
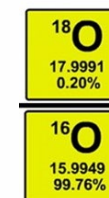
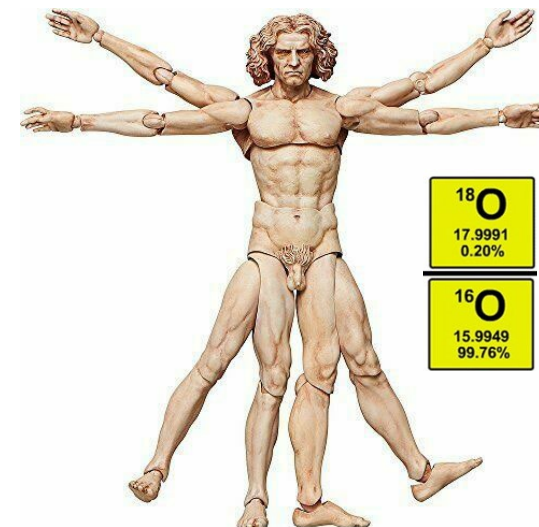
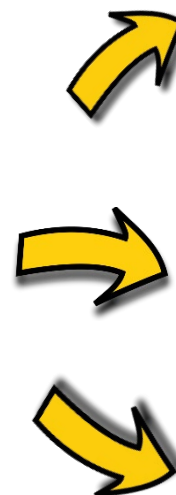
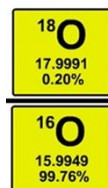
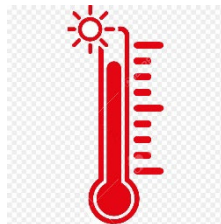
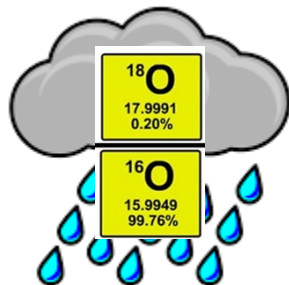
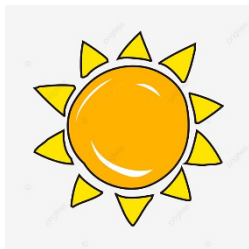
$^{13}\text{C}$



$^{12}\text{C}$



# Metodologia Isotópica



# Isoscapes

## Água de chuva - Brasil

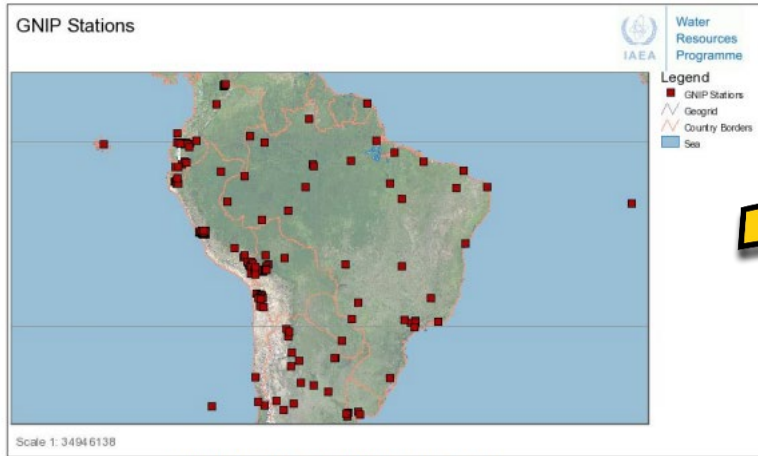
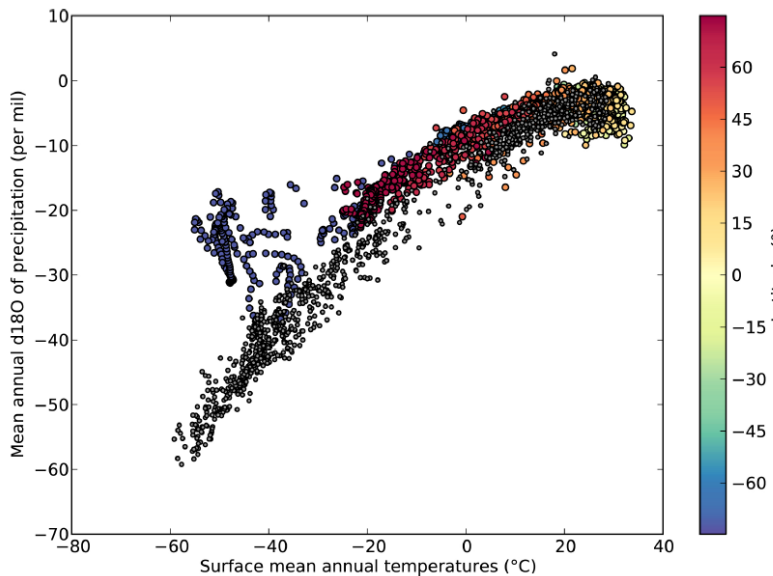
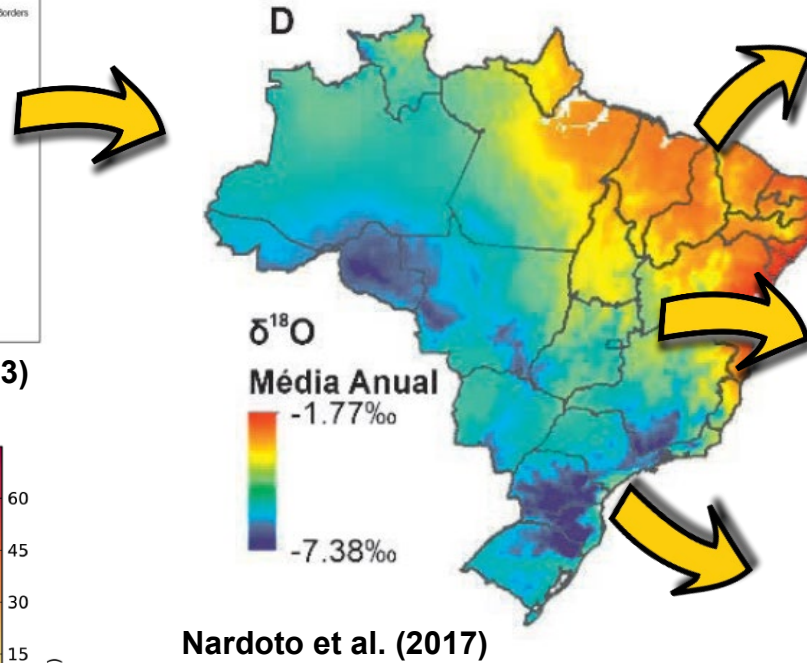


Figure 2. Brazilian GNIP stations [5]. Cota et al. (2013)



Terzel et al. (2013)



*Madeira ilegal  
Amazônia*



*Drogas ilícitas:  
maconha & cocaína*



*Restos humanos:  
dentes & ossos*



- **Objetivo científico:** aperfeiçoamento de modelos isotópicos de atribuição de origem geográfica:
- *(i) madeiras extraídas ilegalmente na região amazônica.*
- *(ii) remanescentes humanos (ossos e dentes) e*
- *(iii) drogas ilícitas naturais como cocaína e maconha,*

# Avanços desde ao último workshop

## Madeiras região Amazônica



### 1. Aprimoramento das isoscapes de precipitação

*Construção de isoscapes mensais e anuais, utilizando-se o script IsoriX (R) desenvolvido por Courtiol et al. (2019)*

Courtiol, Alexandre, François Rousset, Marie-Sophie Rohwäder, David X. Soto, Linn Lehnert, Christian C. Voigt, Keith A. Hobson, Leonard I. Wassenaar, and Stephanie Kramer-Schadt. 2019. "Isoscape Computation and Inference of Spatial Origins with Mixed Models Using the R Package Isorix." In *Tracking Animal Migration with Stable Isotopes*, edited by Keith A. Hobson and Leonard I. Wassenaar, second. London: Academic Press.

### 2. Coleta e análise de amostras de água de abastecimento em diversos municípios brasileiros

### 3. Construção de isoscapes ( $d^{18}O$ ) para água de folhas a partir do modelo Craig-Gordon

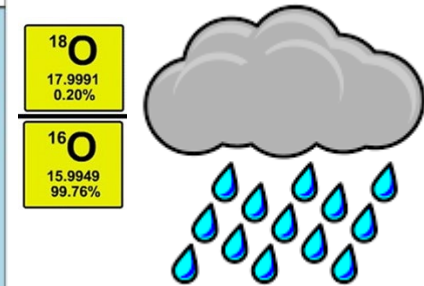
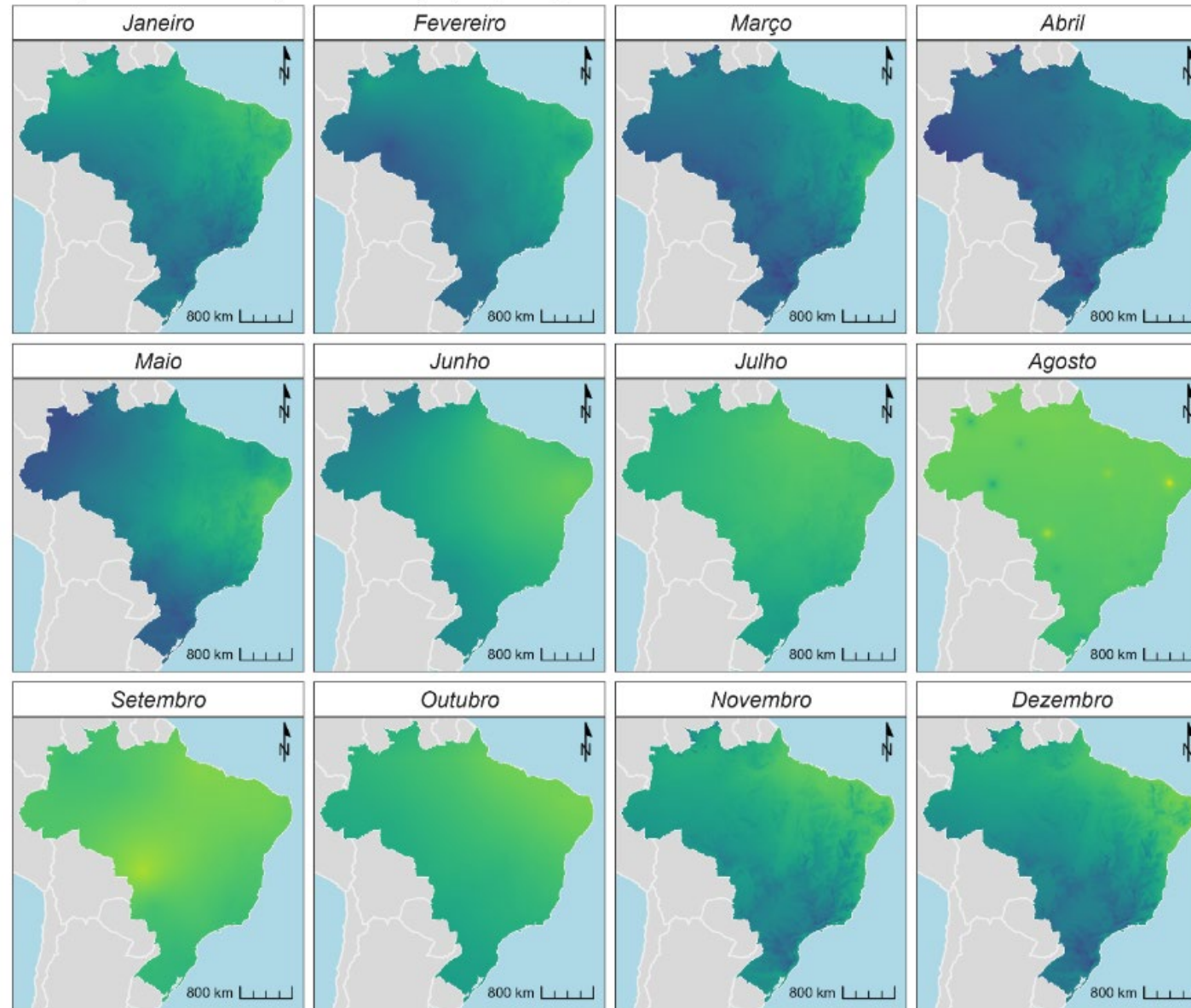
### 4. Construção de isoscapes ( $d^{18}O$ ) para celulose a partir do modelo Craig-Gordon

### 5. Coleta e determinações isotópicas de amostras de madeira na região Amazônica

### 6. Seleção de métodos de extração de celulose visando menor tempo e consumo de reagente

# Isoscapes mensais de $\delta^{18}\text{O}$ elaboradas com o pacote ISORIX

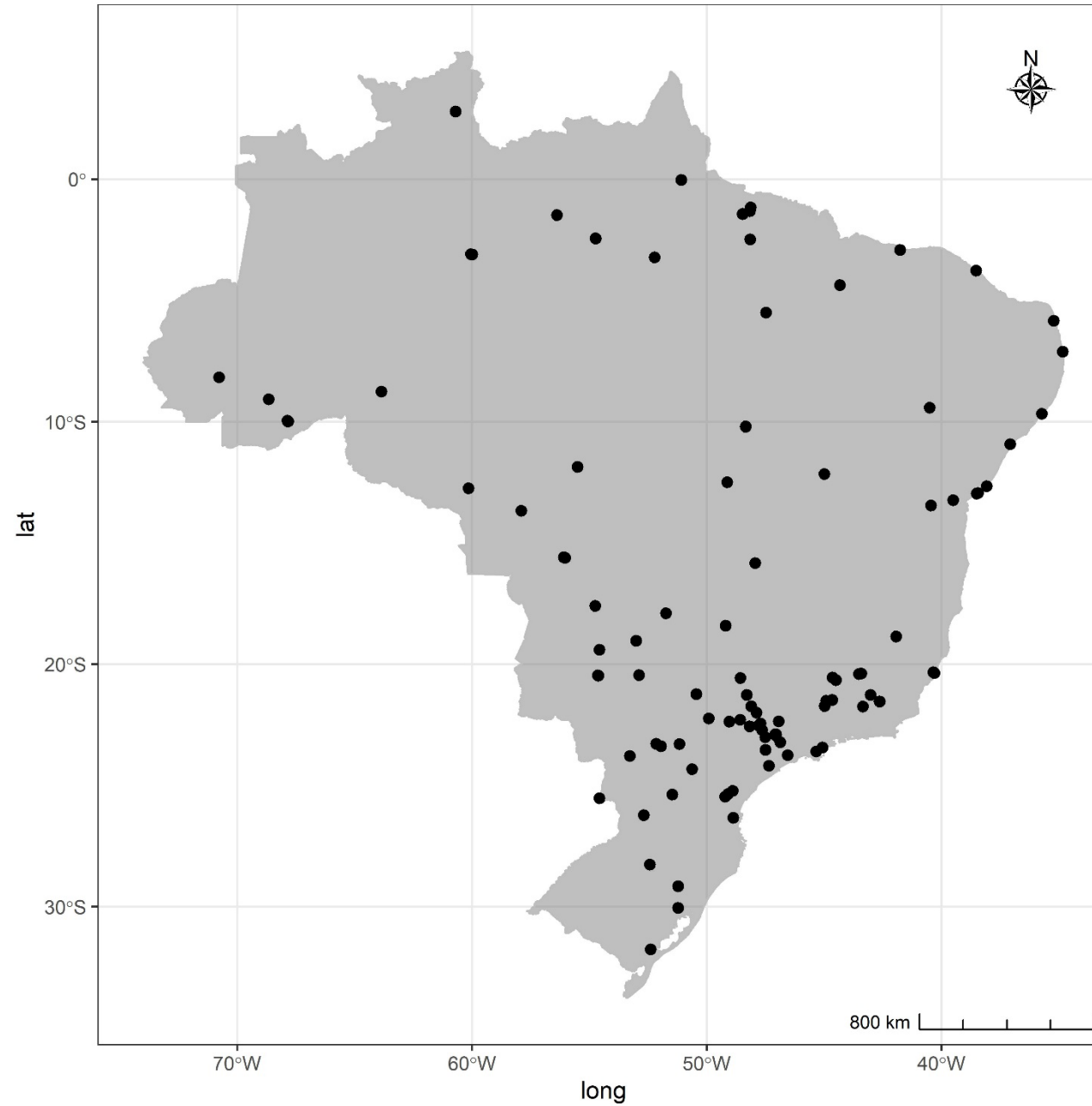
Isoscapes Mensais de Oxigênio da Precipitação (GNIP)



$\delta^{18}\text{O}_{\text{Precipitação}} (\text{‰})$

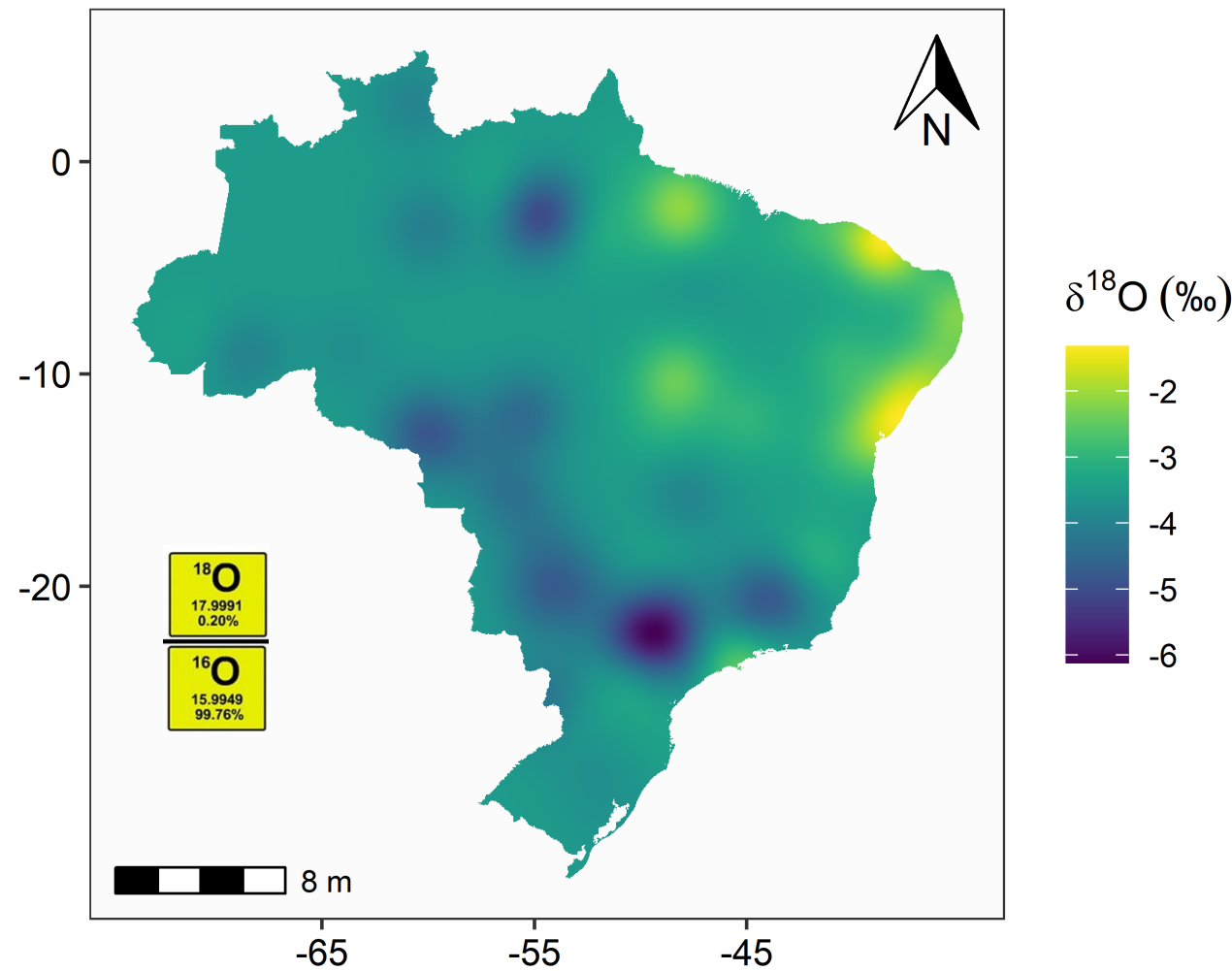


# Coleta e análise de amostras de água de abastecimento em diversos municípios brasileiros



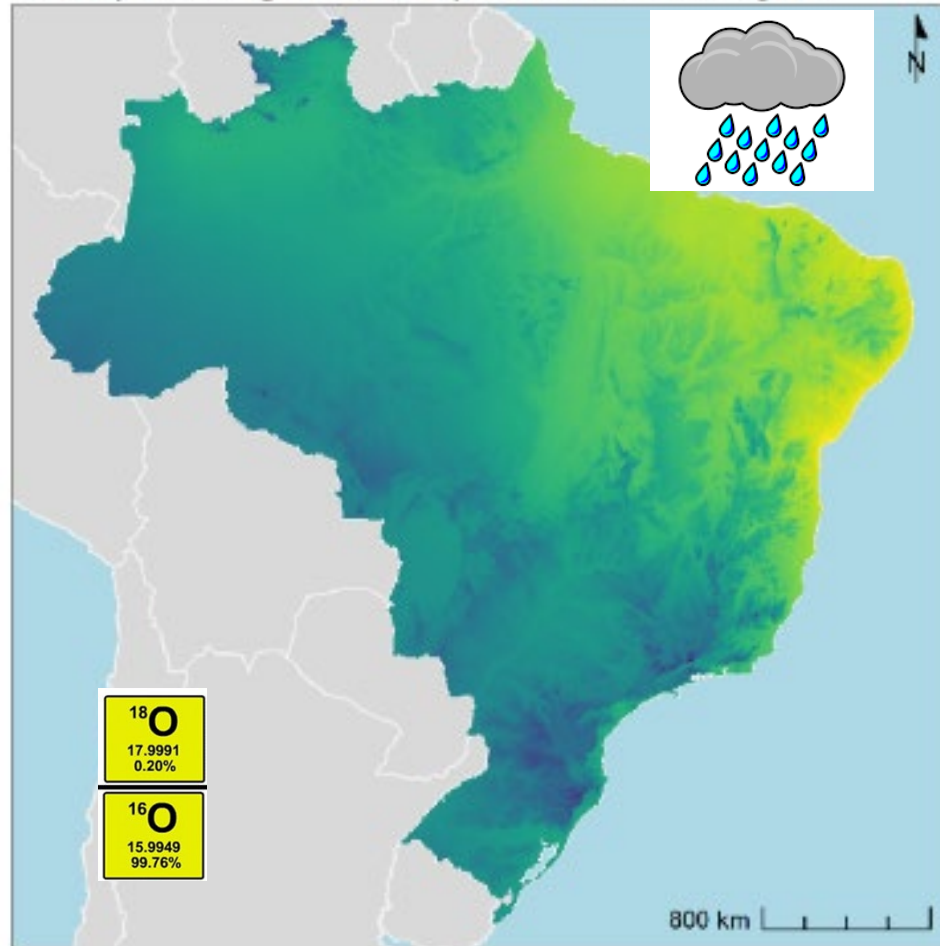


Isoscapes anual sobre valores de  $\delta^{18}\text{O}$  elaborada a partir de  
água de abastecimento público  
(em desenvolvimento)

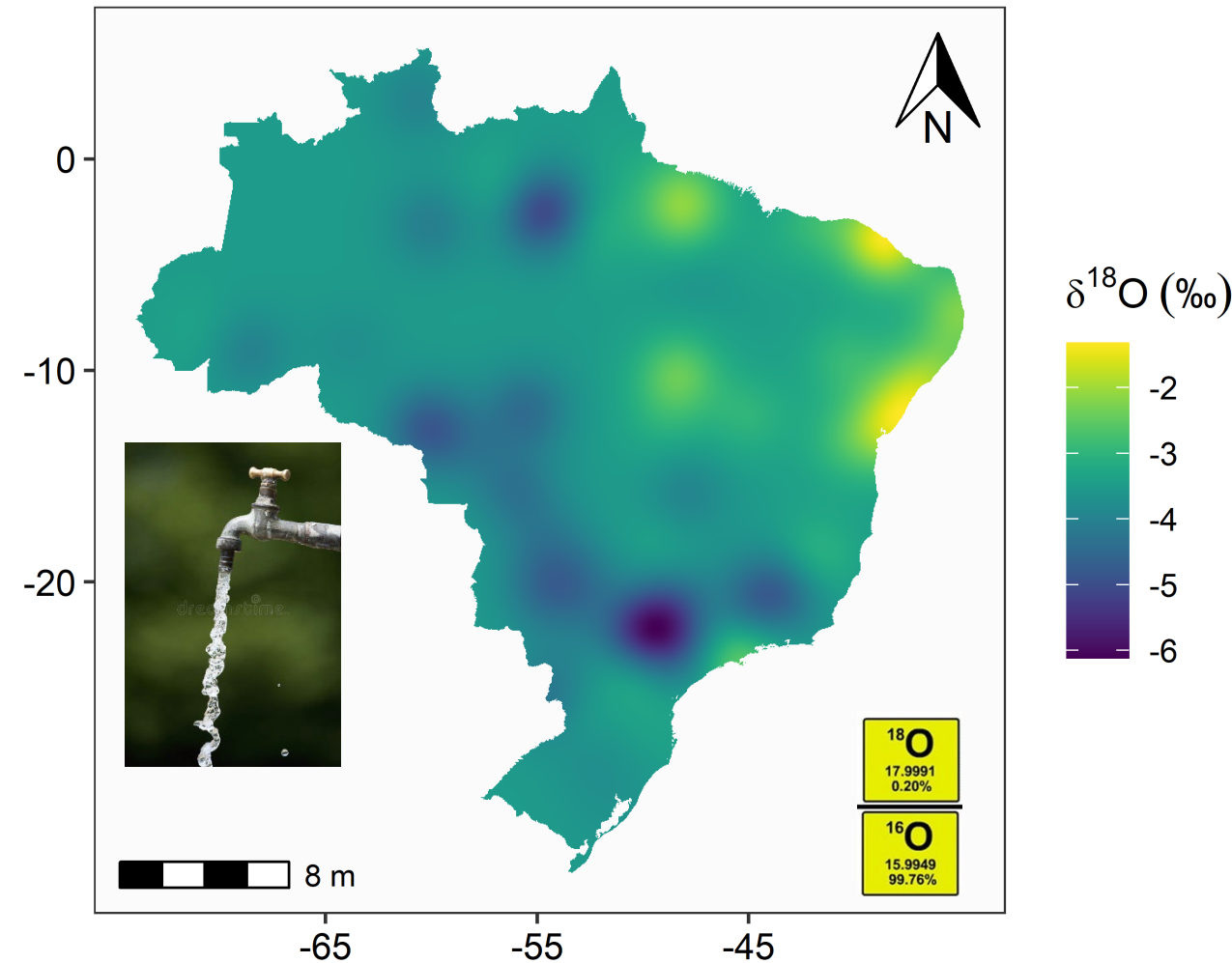


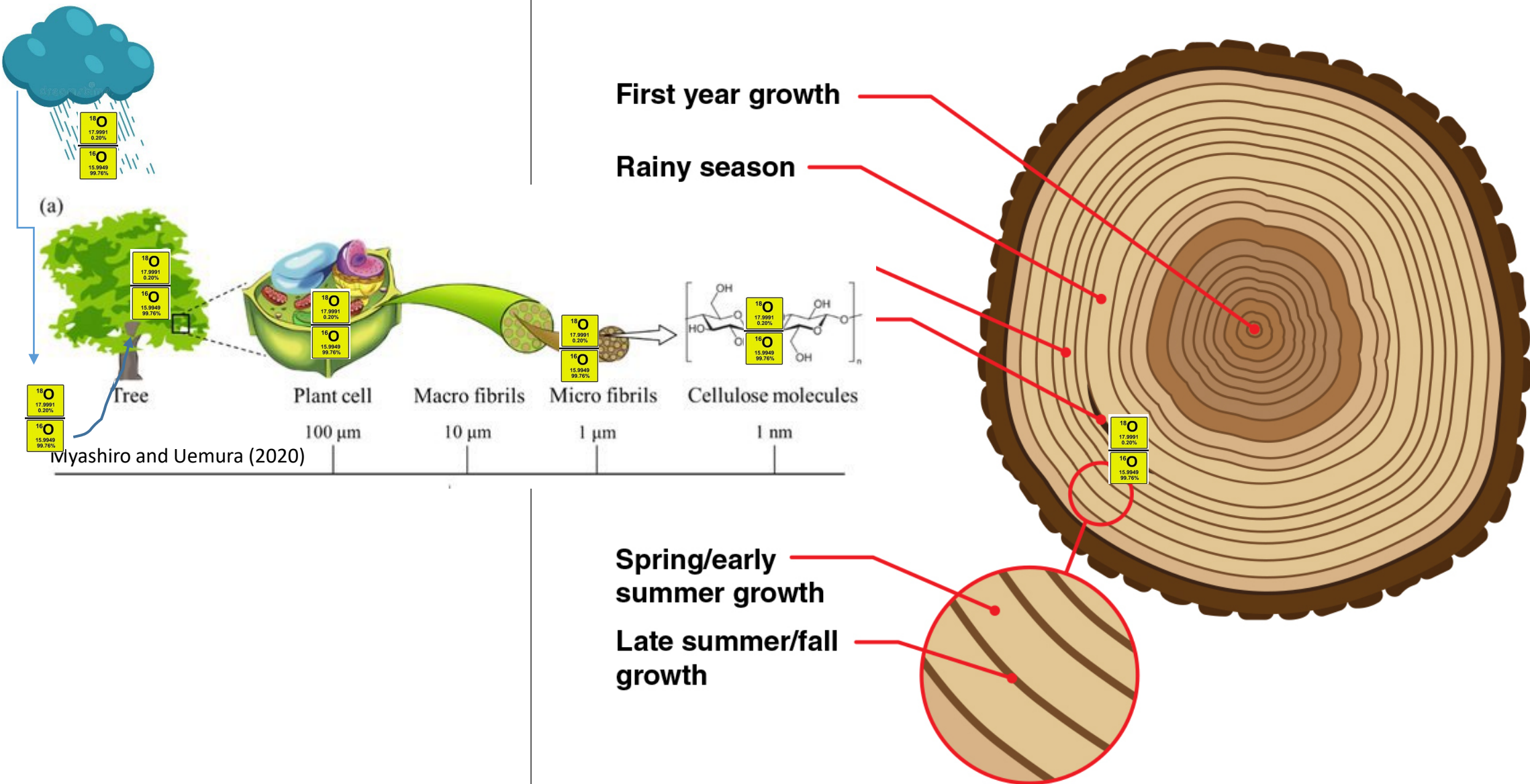
Isoscapes anual  $\delta^{18}\text{O}$  **precipitação** elaboradas com o pacote ISORIX

Isoscape de oxigênio anual para a **PRECIPITAÇÃO**



Isoscapes anual  $\delta^{18}\text{O}$  **água de torneira** elaboradas através de interpolação espacial



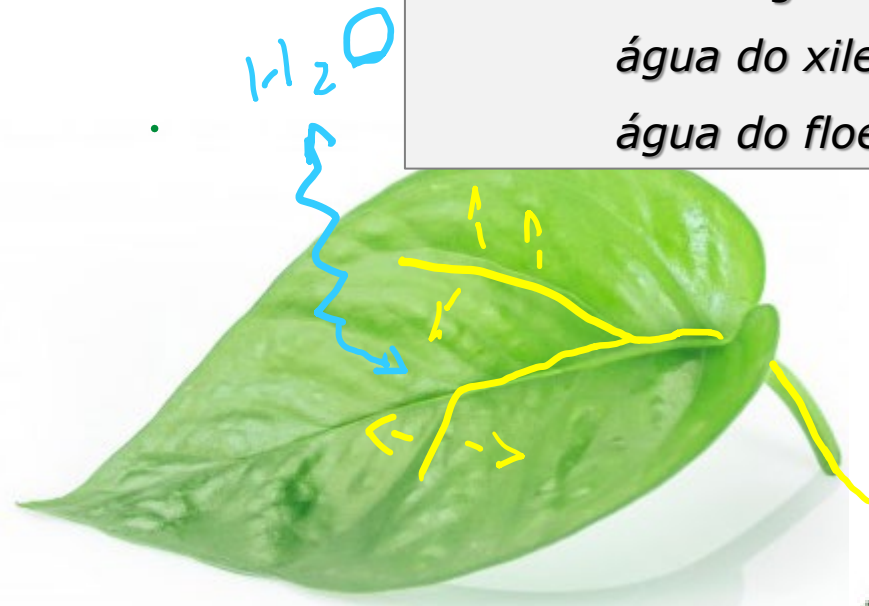


Miyashiro and Uemura (2020)



As fontes de oxigênio para a cellulose são:

água do xilema (**sem** evaporação) e  
água do floema (folhas – **evaporação**)



$$O_{\text{celulose}} = x(H_2O_{\text{xilema}}) + y(H_2O_{\text{floema}})$$

$x \sim 60\%$   
 $y \sim 40\%$

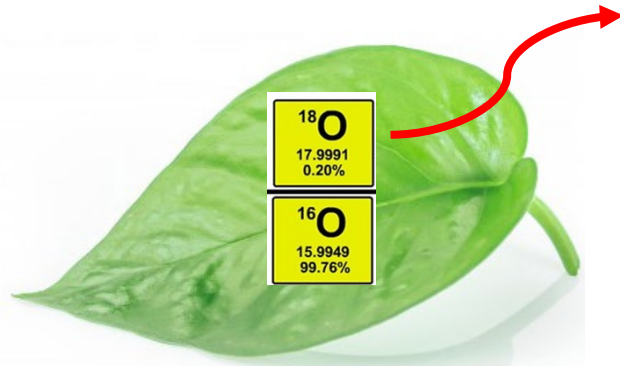
$H_2O_{\text{xilema}}$ : **não** sofreu evaporação  
 $\delta^{18}O_{\text{xilema}} = \delta^{18}O_{\text{solo}}$   
 $\delta^{18}O_{\text{solo}} = \delta^{18}O_{\text{precipitação}}$  (isoscares)

$H_2O_{\text{floema}}$ : **sofreu** evaporação  
 $\delta^{18}O_{\text{floema}}$ : modelo **Craig-Gordon**

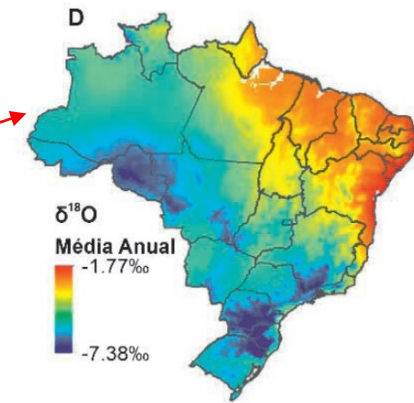
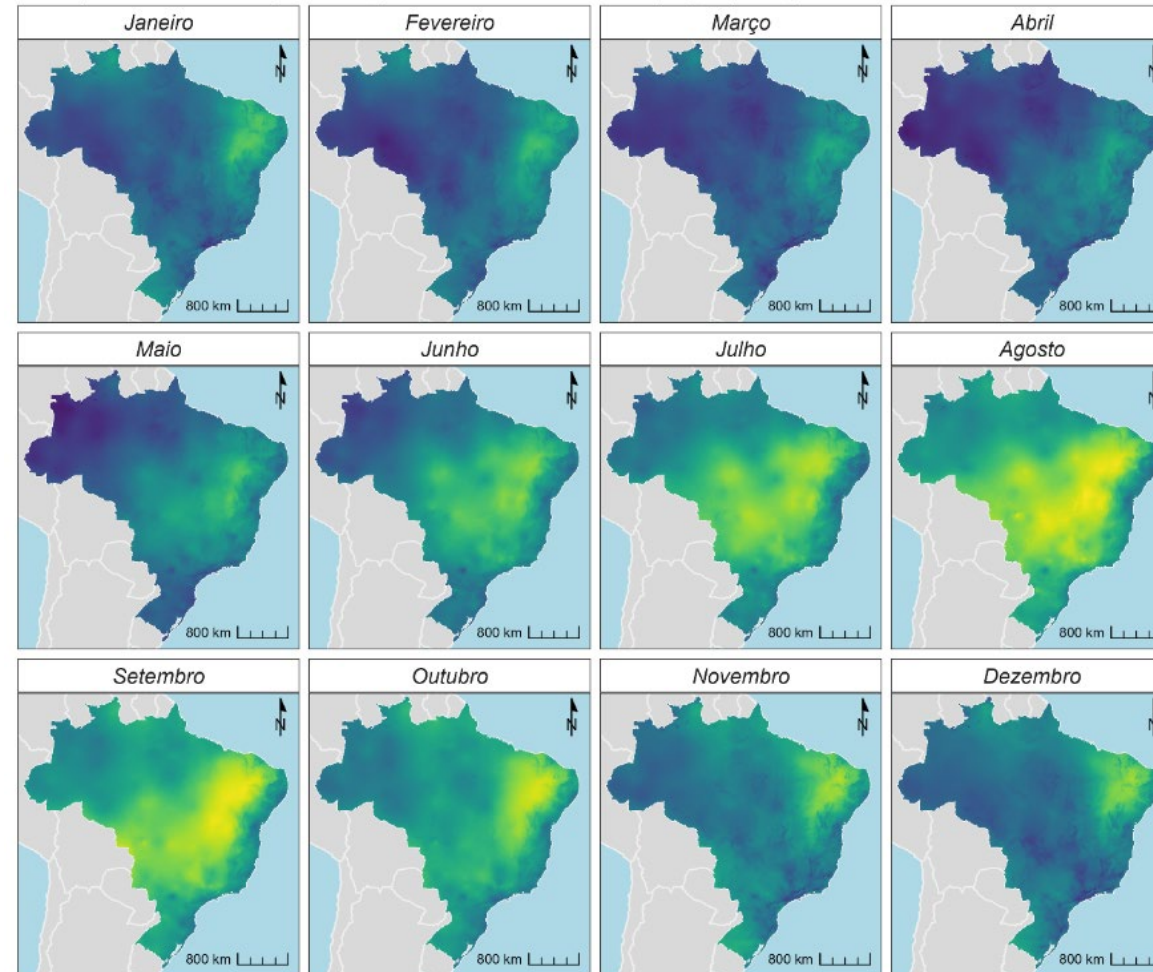


# Modelo Craig-Gordon para oxigênio

$$\delta_{Lw} = (\epsilon + \epsilon_k)(1 - UR) + \delta_p$$



Isoscapes Mensais de Oxigênio da Água Foliar com base na Precipitação (GNIP)



$\delta_{lw} = \delta^{18}\text{O}$  água da folha

$\delta_p = \delta^{18}\text{O}$  precipitação

$\epsilon$  = fator fracionamento cinético

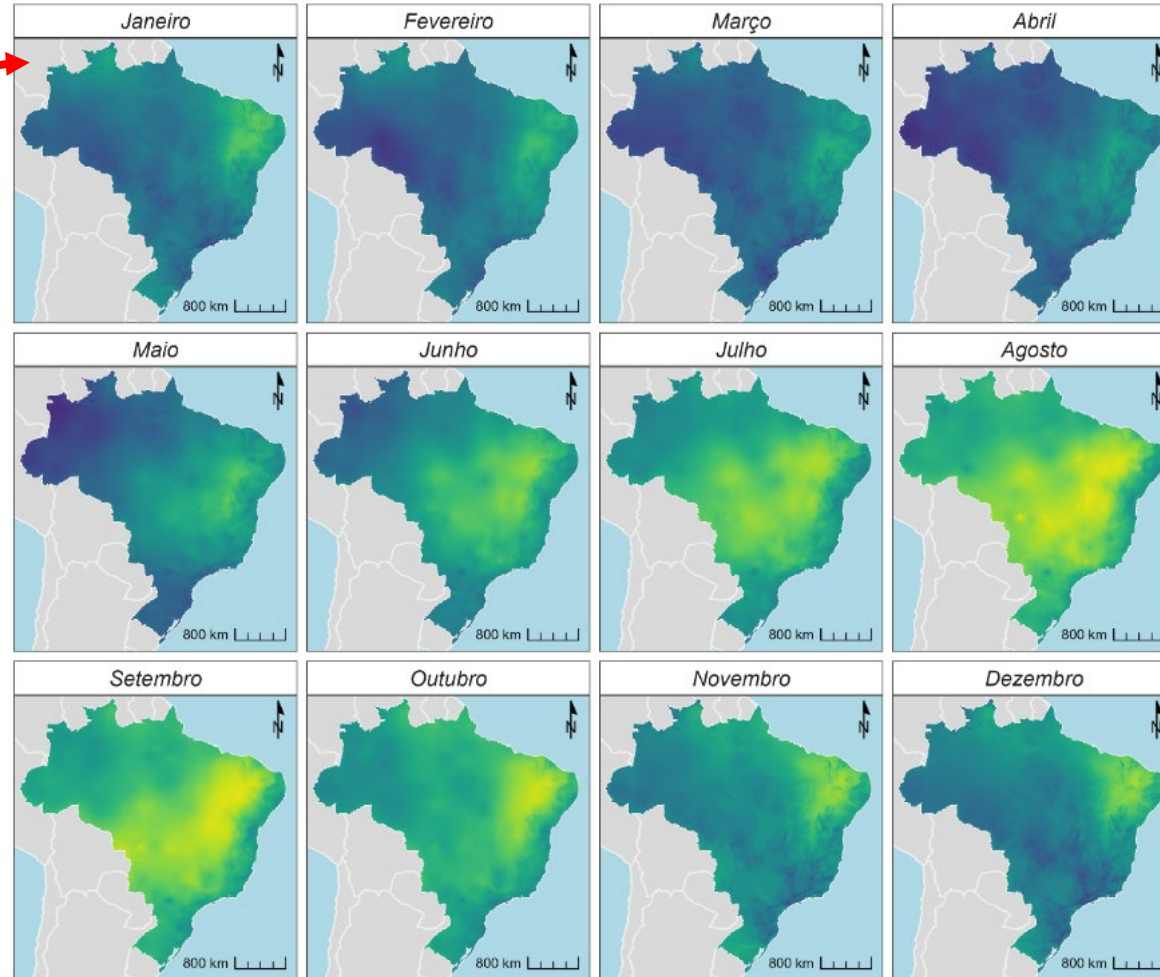
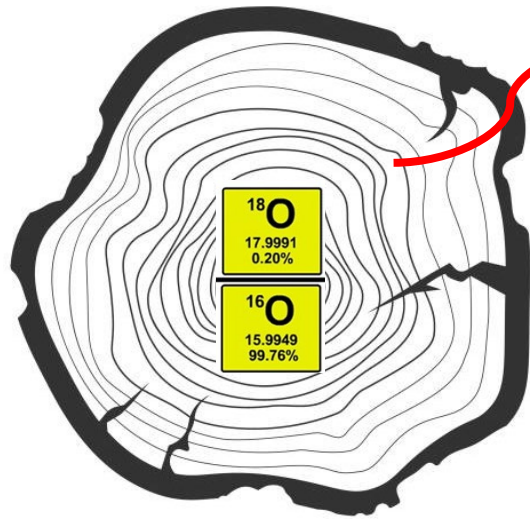
$\epsilon_k$  = fator fracionamento

UR = umidade relativa do ar



$$\delta_{CEL} = \delta_{LW}(1 - y) + f_c$$

Isoscapes Mensais de Oxigênio da Celulose com base na Precipitação (GNIP)



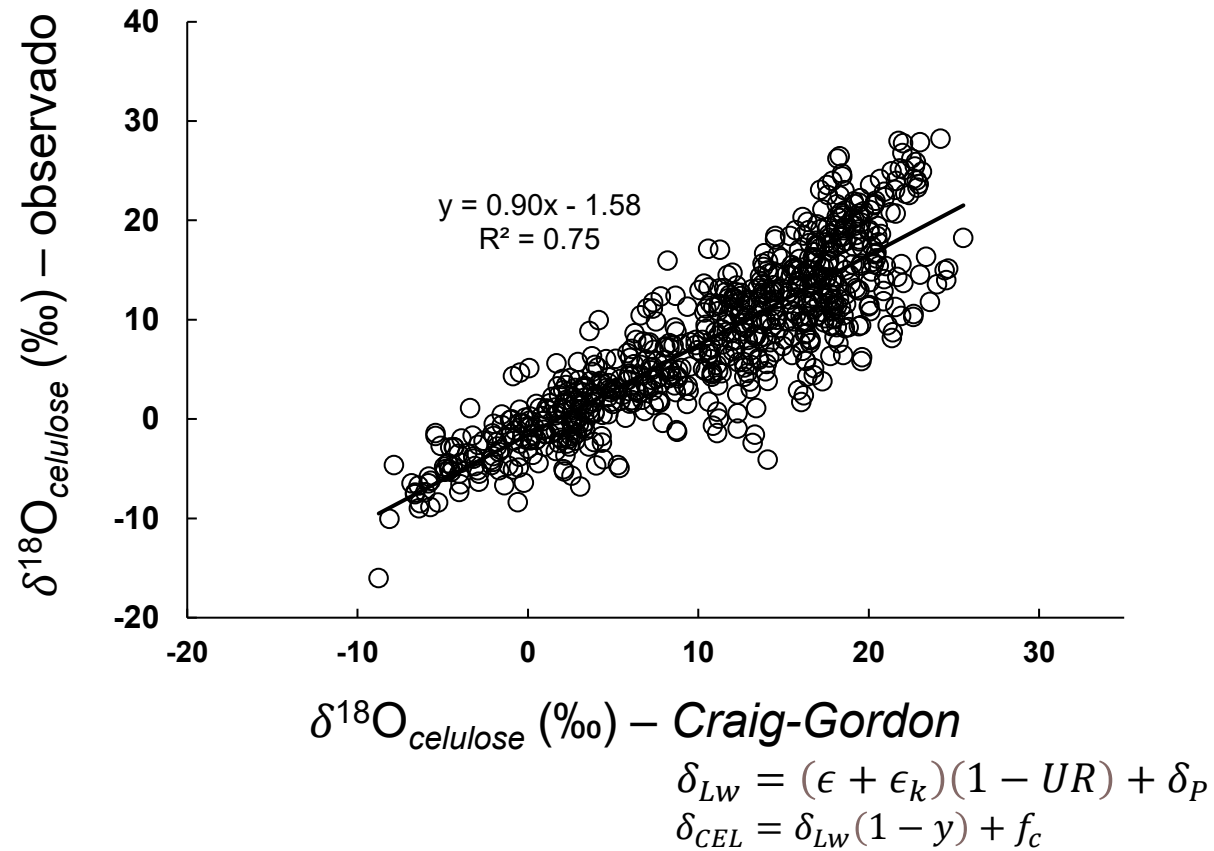
$\delta_{LW} = \delta^{18}\text{O}$  água da folha

$\delta_c = \delta^{18}\text{O}$  celulose

$y = 40\%$

$f_c = \text{fracionamento bioquímico}$

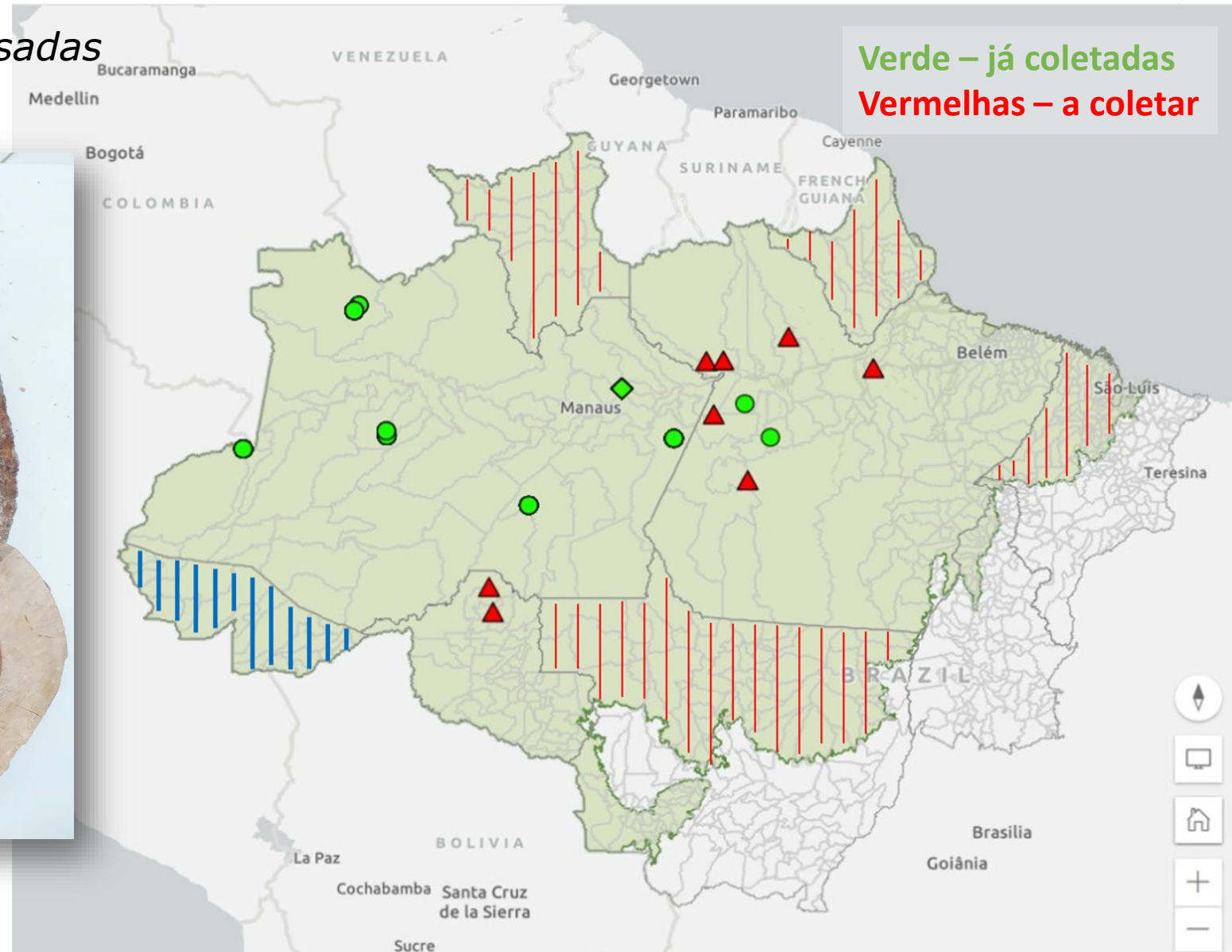
# Calibrar o modelo – coletas de amostras (a dura realidade do campo)

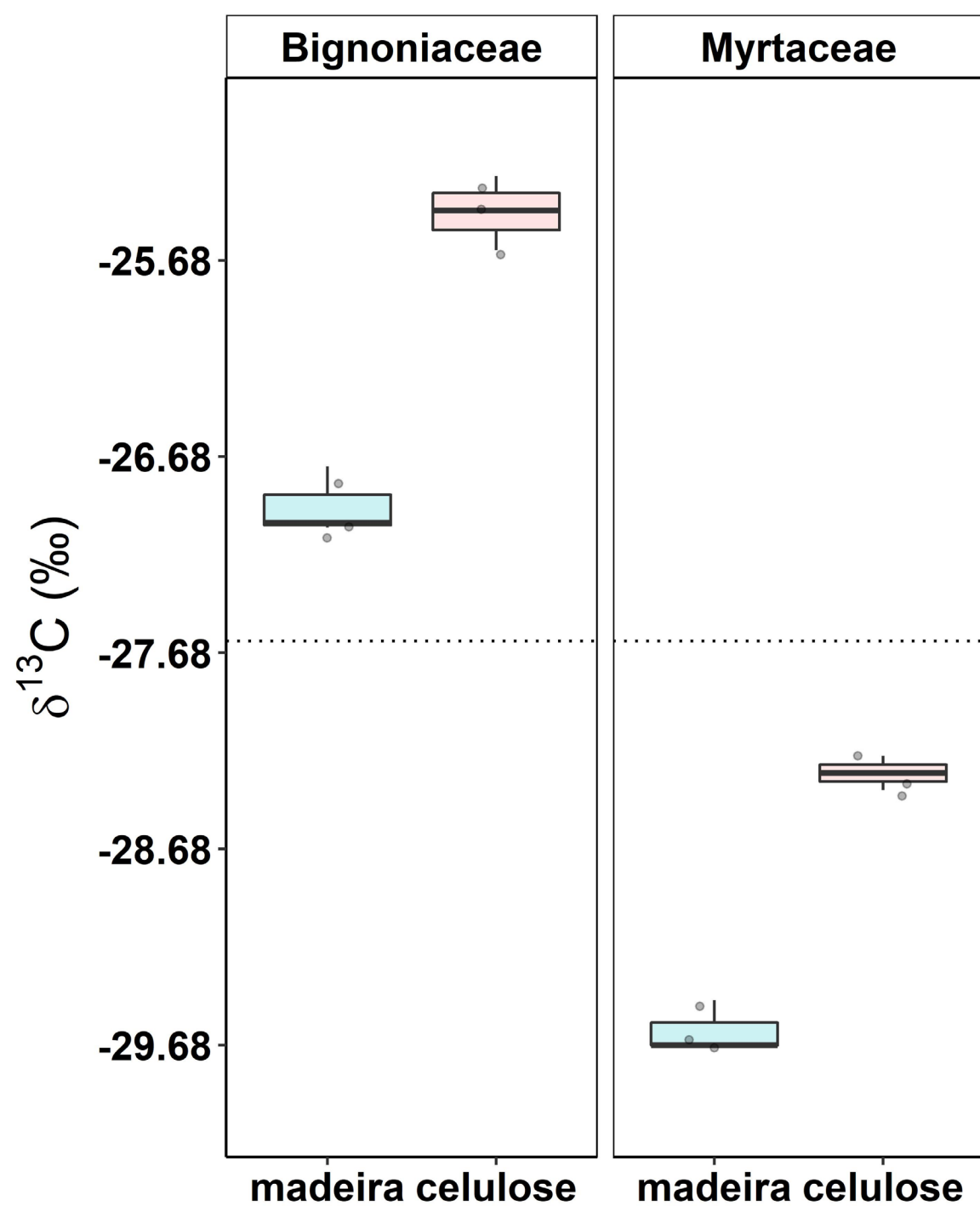




# Calibrar o modelo – coletas de amostras (a dura realidade do campo)

*Encontram-se no CENA sendo processadas  
cerca de 80 indivíduos.*





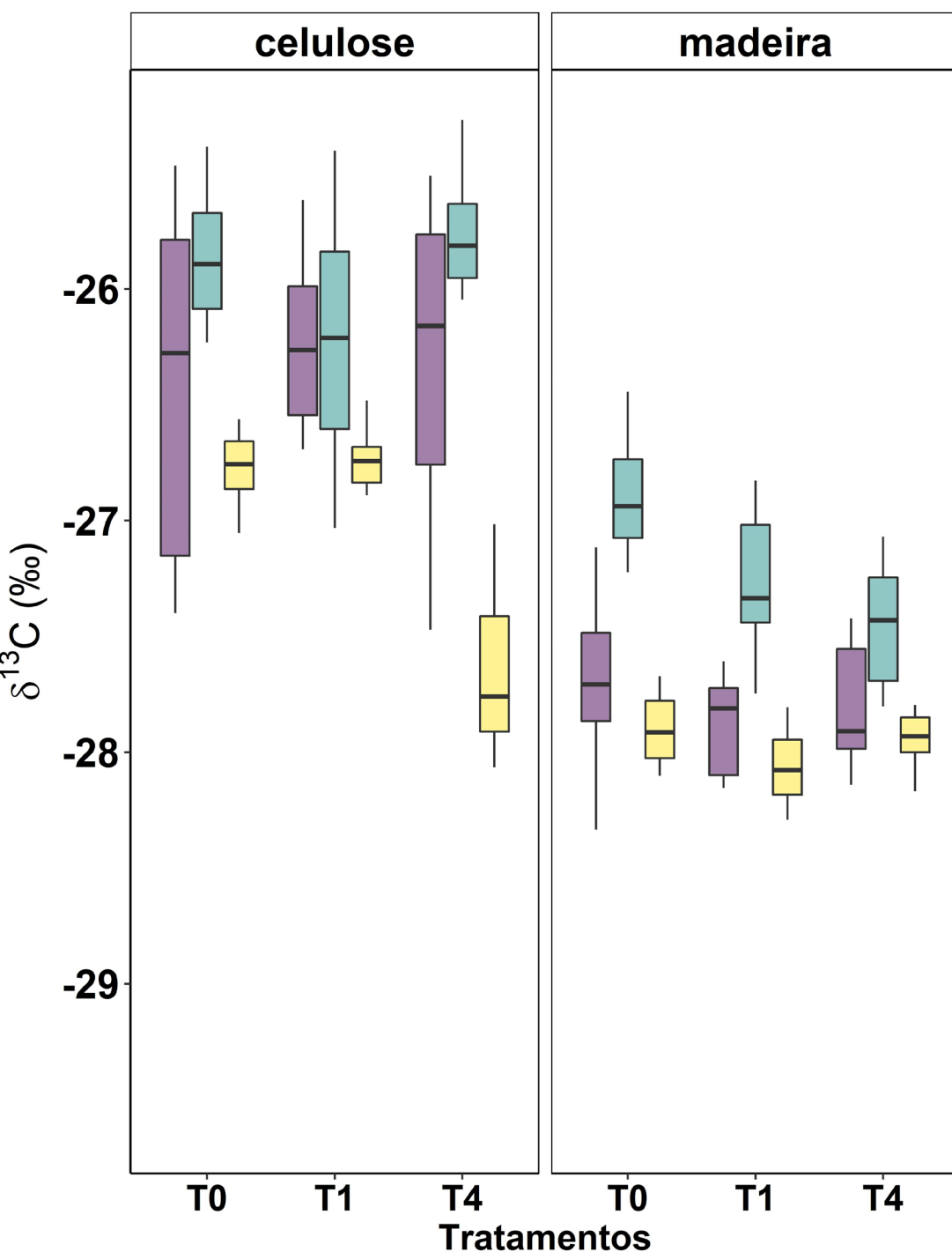
# Testes para extração de celulose

## Extração de celulose (serragem)

Primeiro teste para obtenção de  $\alpha_{celulose}$  foi realizado em serragem de madeira das espécies florestais da região de Piracicaba- SP.

A  $\alpha_{celulose}$  foi obtida segundo, TAPPI – T 203 om -93. As espécies utilizadas foram eucalipto e ipê rosa.





## Extração de celulose em laminas de cedro(*Cedrela spp.*), ipê(*Handroanthus spp.*) e jatobá(*Hymenaea courbaril*)

Terceiro teste para obtenção de  $\alpha_{\text{celulose}}$  foi realizado em lâminas de madeira das espécies florestais: cedro, ipê e jatobá. Origem Estado do Pará.

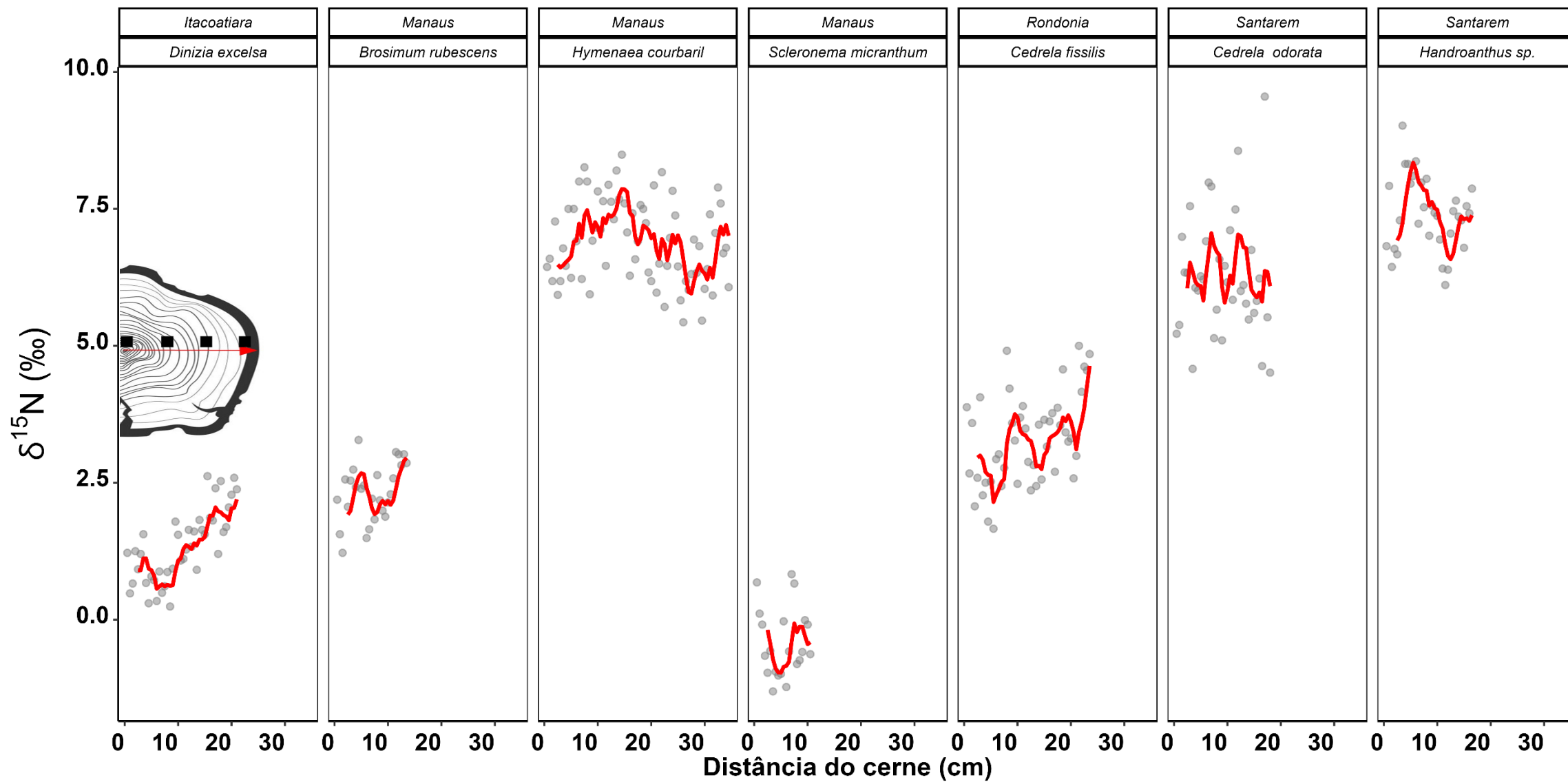
A  $\alpha_{\text{celulose}}$  foi obtida em diferentes tratamentos, com objetivo de estabelecer o melhor tratamento em menor tempo.

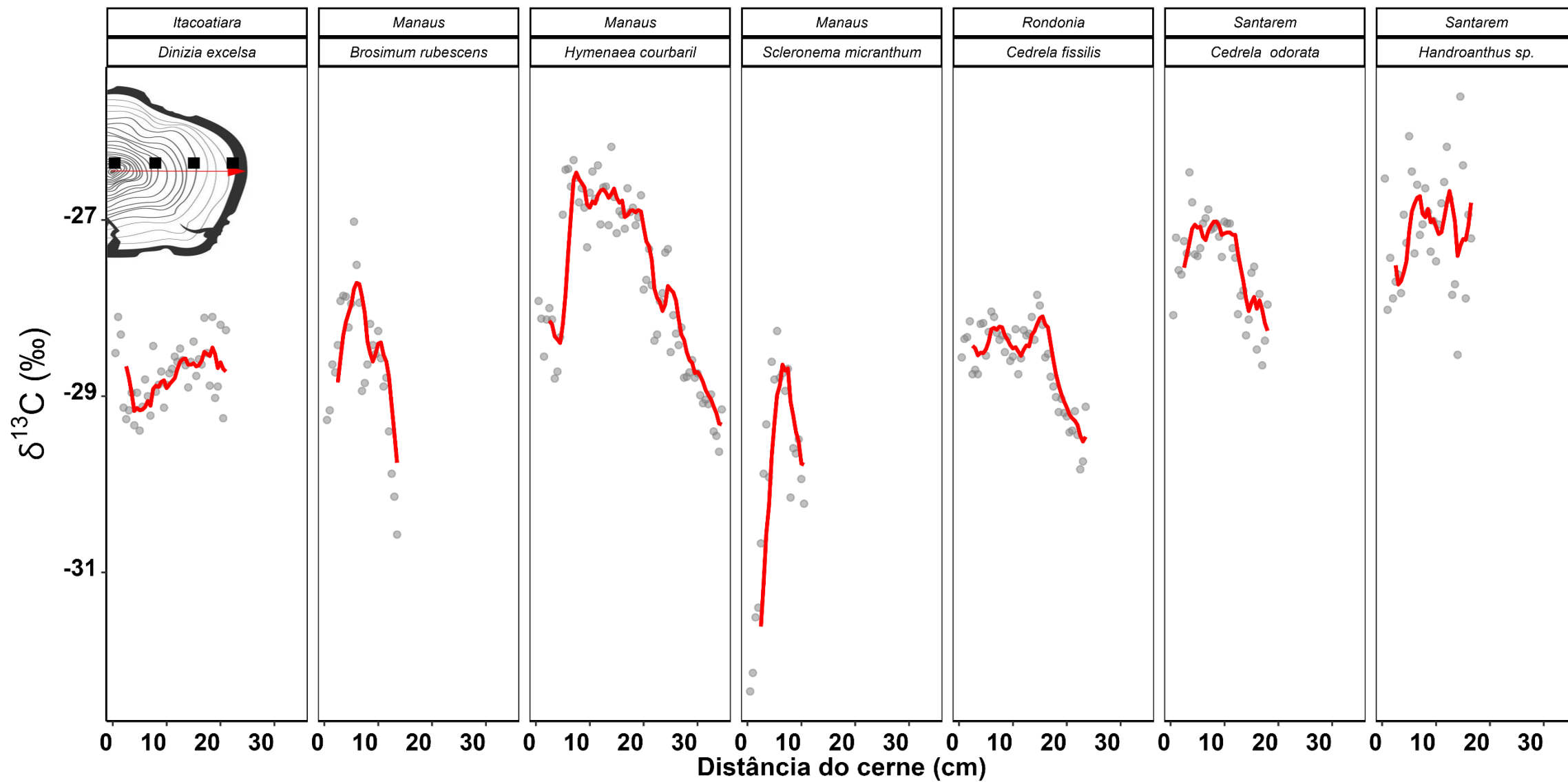
Todos os tratamentos foram baseados segundo, KAGAWA et al.(2015).

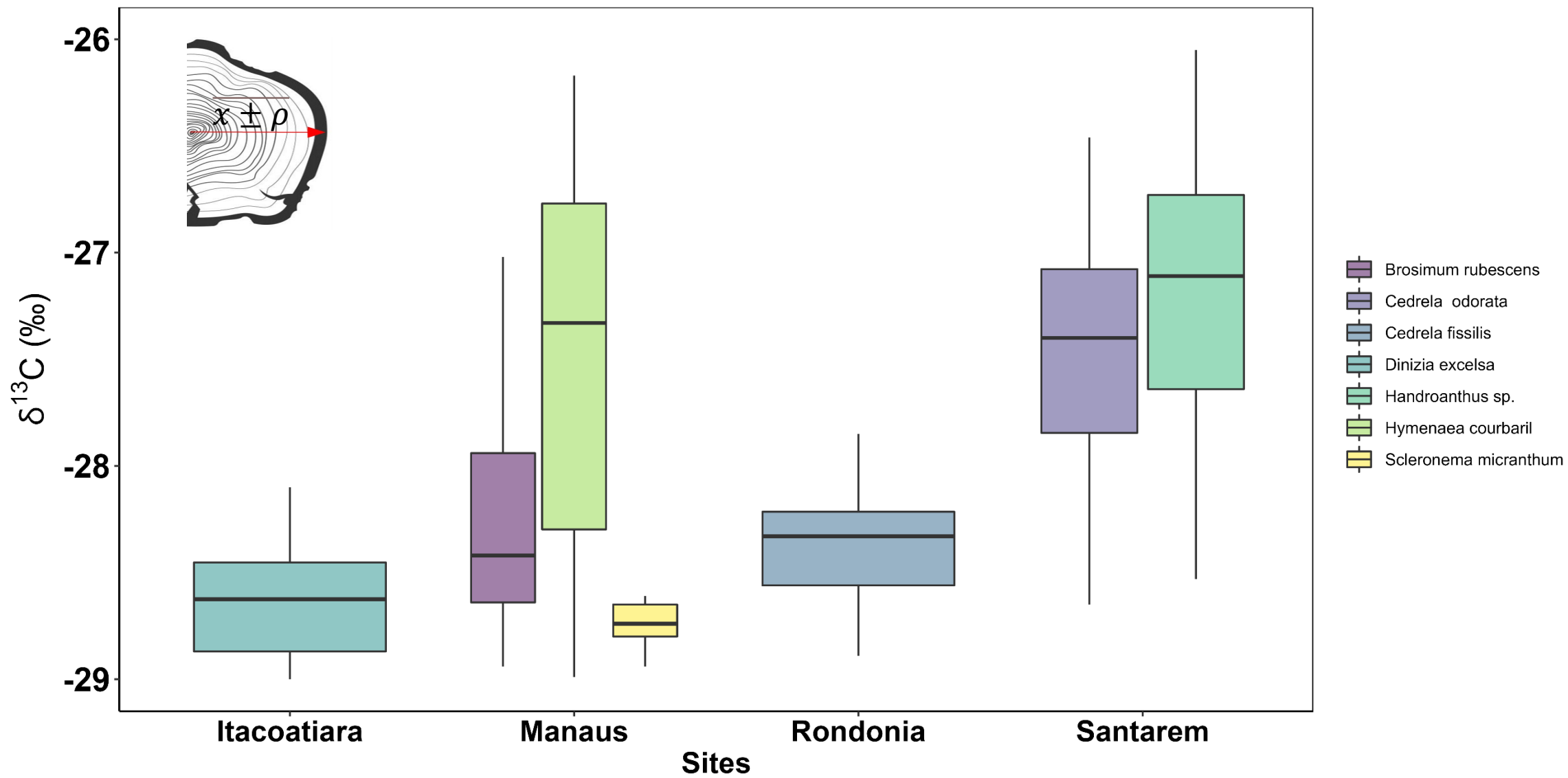
T0

T1 – 24 horas para extração;

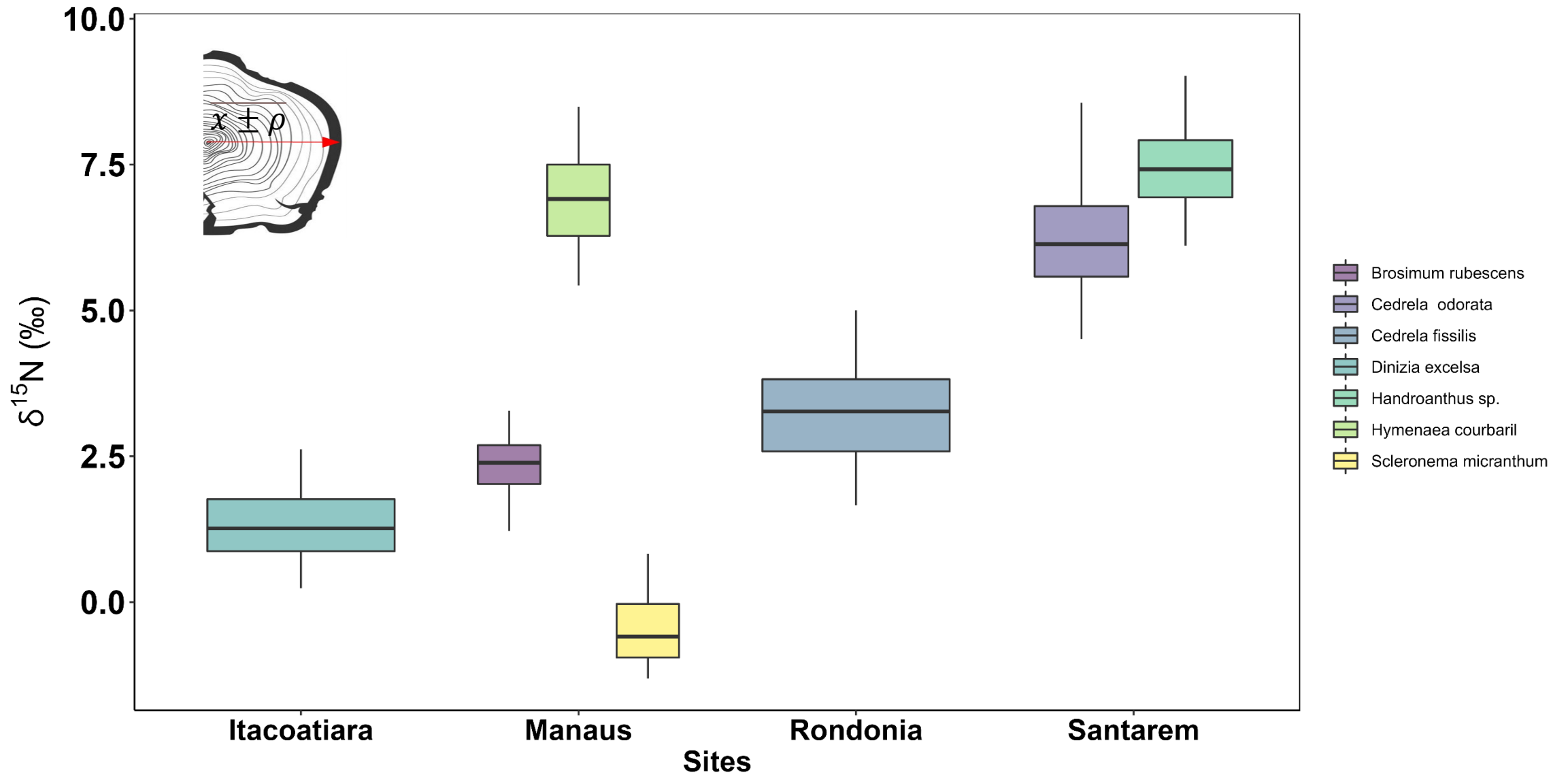
T4 – 6 horas para extração;



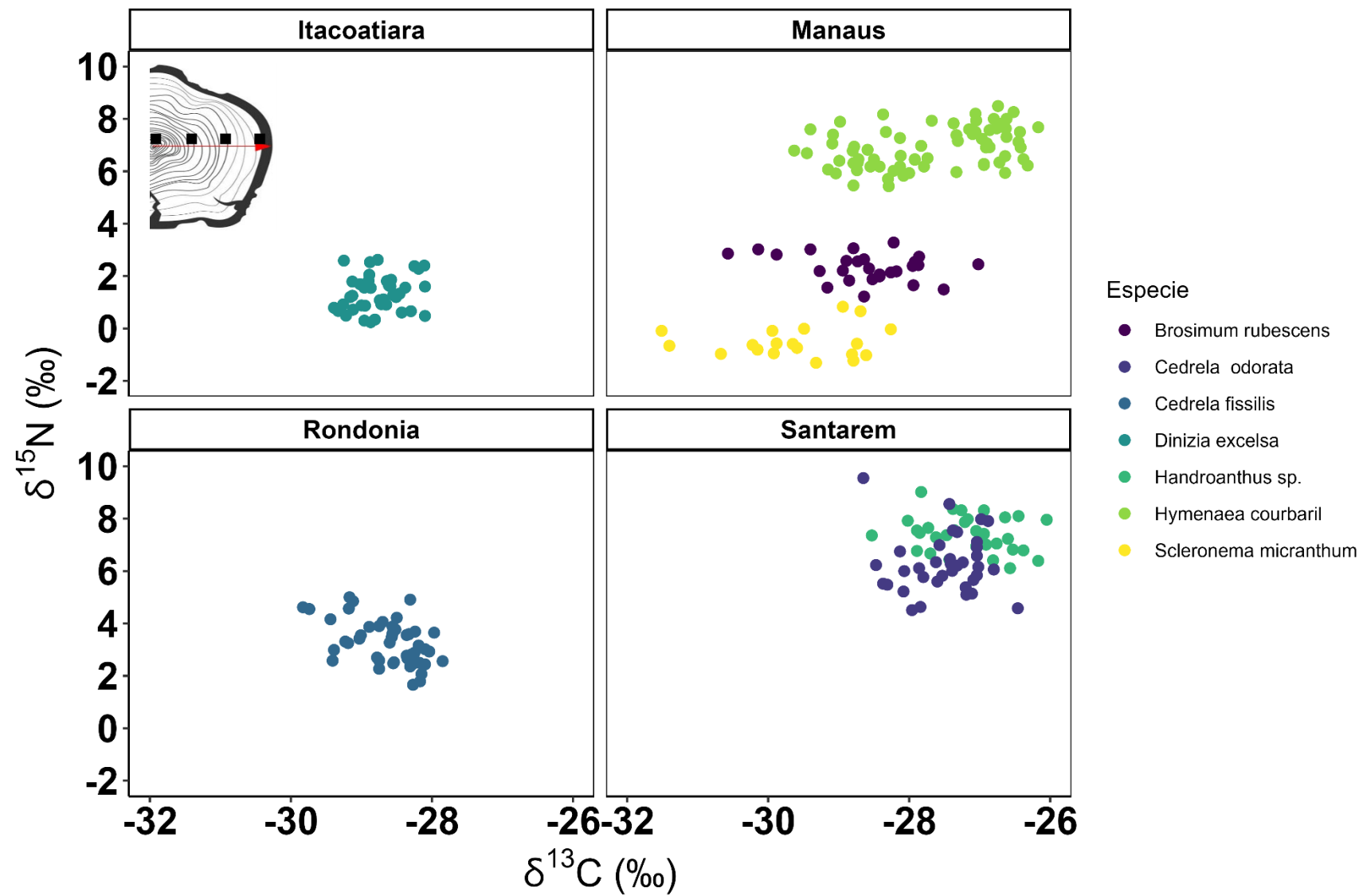










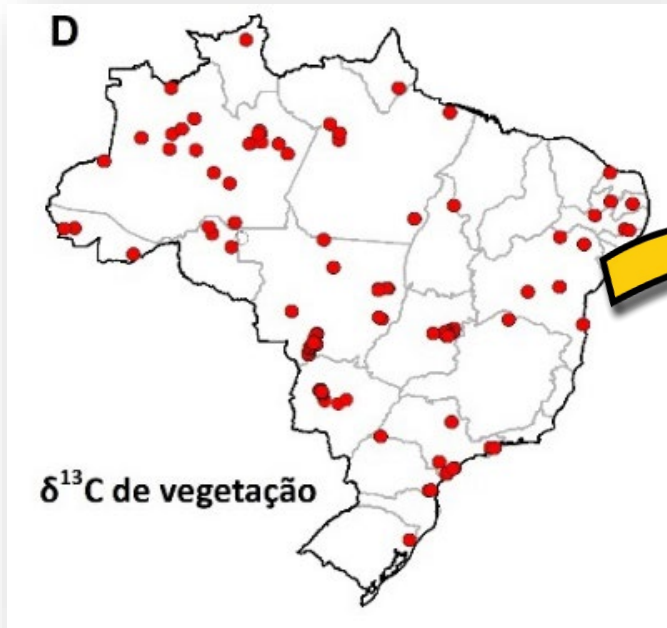


## Tarefas que não avançaram desde o último workshop

1. Isoscapes folha ( $\delta^{13}\text{C}$  e  $\delta^{15}\text{N}$ )
2. Modelos de atribuição de origem

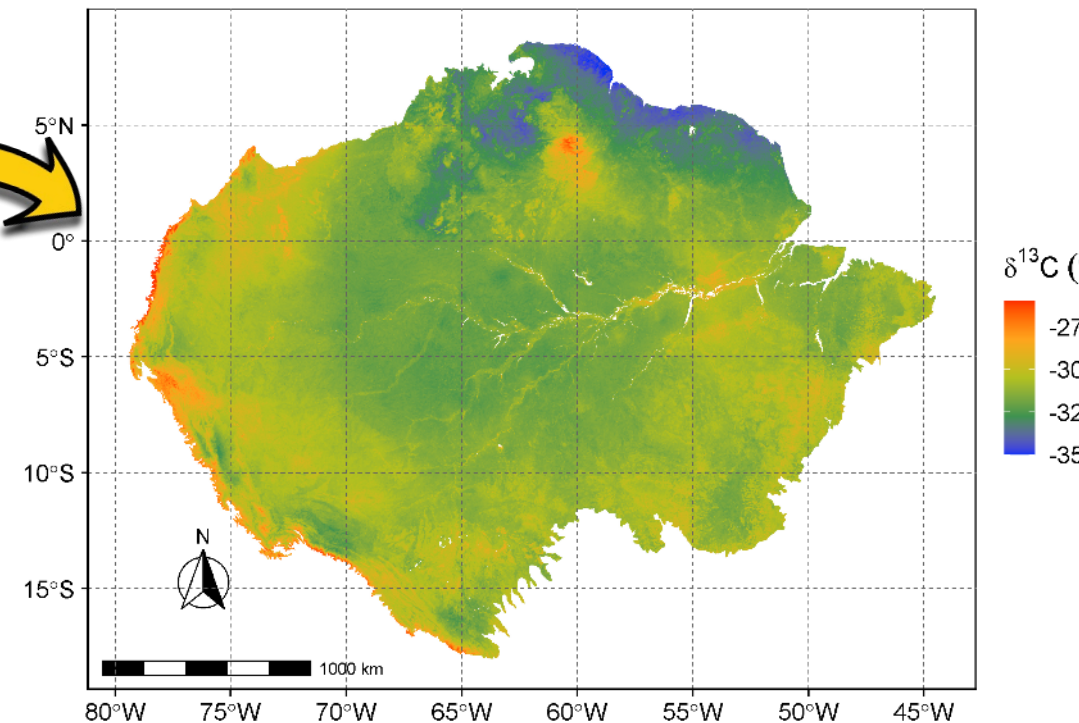
### *Variáveis Predictoras*

- Variáveis Climáticas
- Variáveis de Solo
- Valores de NDVI



### Carbon Isoscape Model - Amazon biome

Leaves of C3 plants



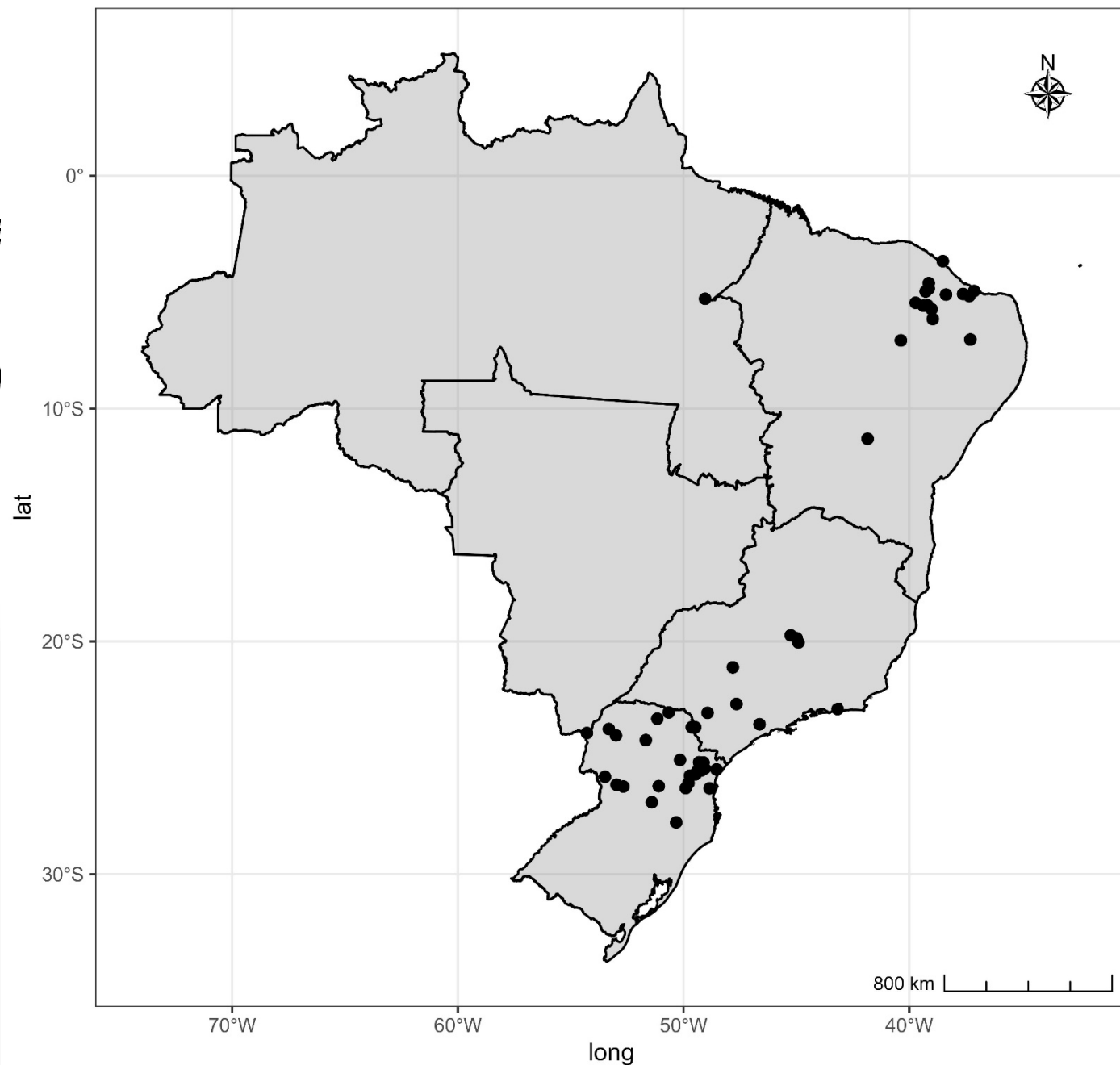
## Avanços desde ao último workshop

*Restos humanos – colágeno dentário*

→ Coleta severamente afetada pela pandemia

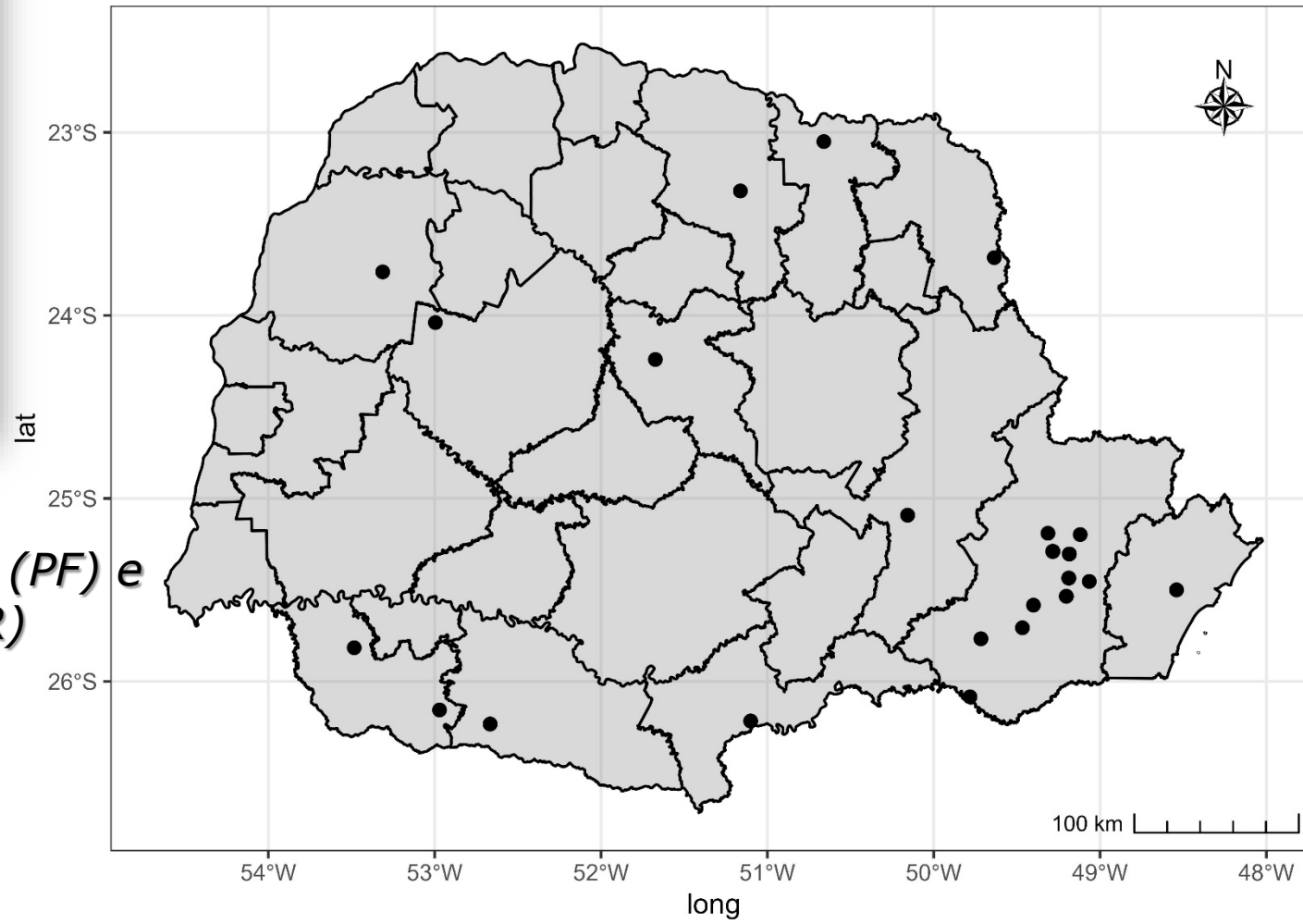
Até o momento, cerca de 180 dentes.  
Distribuição espacial muito desigual (ver map)

Coleta de dentes feita em colaboração com  
*Ricardos Mascarenhas (PF)* e  
*Anelize Bahniuk (UFPR)*





*Ricardos Mascarenhas (PF) e*  
*Anelize Bahniuk (UFPR)*

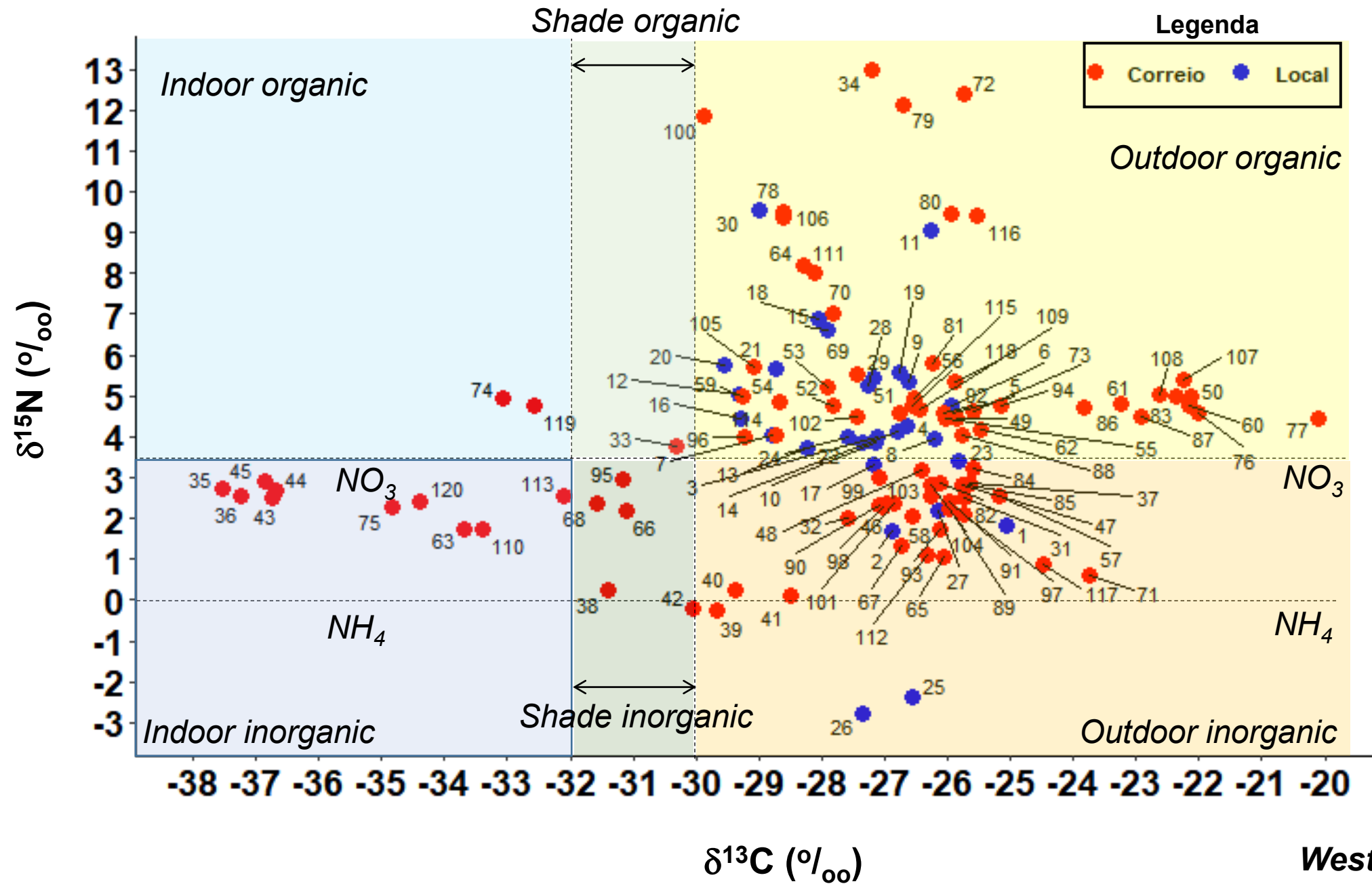








## *Drogas ilícitas – maconha e cocaína*



**Projeto 8: CIÊNCIA DE REDES E MACHINE LEARNING PARA O COMBATE À CORRUPÇÃO E CRIME ORGANIZADO -**  
*Prof. Dr. HAROLDO VALENTIN RIBEIRO (UEM)*

**Projeto 15: ESPECTROSCOPIA INFRAVERMELHO PRÓXIMO PARA LABORATÓRIO DE CRIMINALÍSTICA E**  
**SUORTE ÀS ATIVIDADES FORENSES DE CAMPO**  
*Profª. Drª. MARIA DO CARMO HESPANHOL*

**Projeto 16: PROJETO INSPEQT: INVESTIGAÇÃO DE NOVAS SUBSTÂNCIAS PSICOATIVAS EM QUÍMICA E**  
**TOXICOLOGIA FORENSE**  
*Prof. Dr. MAURICIO YONAMINE (USP)*

**Projeto 17: REDE DE COOPERAÇÃO EM CIÊNCIA FORENSE: DESENVOLVIMENTO DE MÉTODOS E TECNOLOGIAS**  
**APLICADOS À IDENTIFICAÇÃO DE DROGAS, GSR, EXPLOSIVOS E FRAUDES EM BEBIDAS** *Prof. Dr. MARCELO*  
*MARTINS DE SENA (UFMG)*

**Projeto 19: GOLD RUSH – APLICAÇÃO DE FERRAMENTAS GEOQUÍMICAS E ISOTÓPICAS NO COMBATE AO**  
**CRIME ORGANIZADO E CONTRABANDO DE OURO NA REGIÃO NORTE DO BRASIL.**  
*Prof. Dr. JEREMIE GARNIER (UNB)*

**Projeto 23: DISTRIBUIÇÃO DE ESPÉCIES ARBÓREAS NA AMAZÔNIA BRASILEIRA E ESTUDOS SOBRE**  
**PROCEDÊNCIA DE MADEIRAS PARA FISCALIZAÇÃO DO DESMATAMENTO ILEGAL**  
*Profª. Drª. MARIA TERESA GOMES LOPES (UFAM)*