

A experiência da CMPC – Chile na utilização do resistógrafo

Edgardo Velilla



$$+\Delta \frac{1kg}{m^3} \approx -0.6 \frac{USD}{ADt}$$

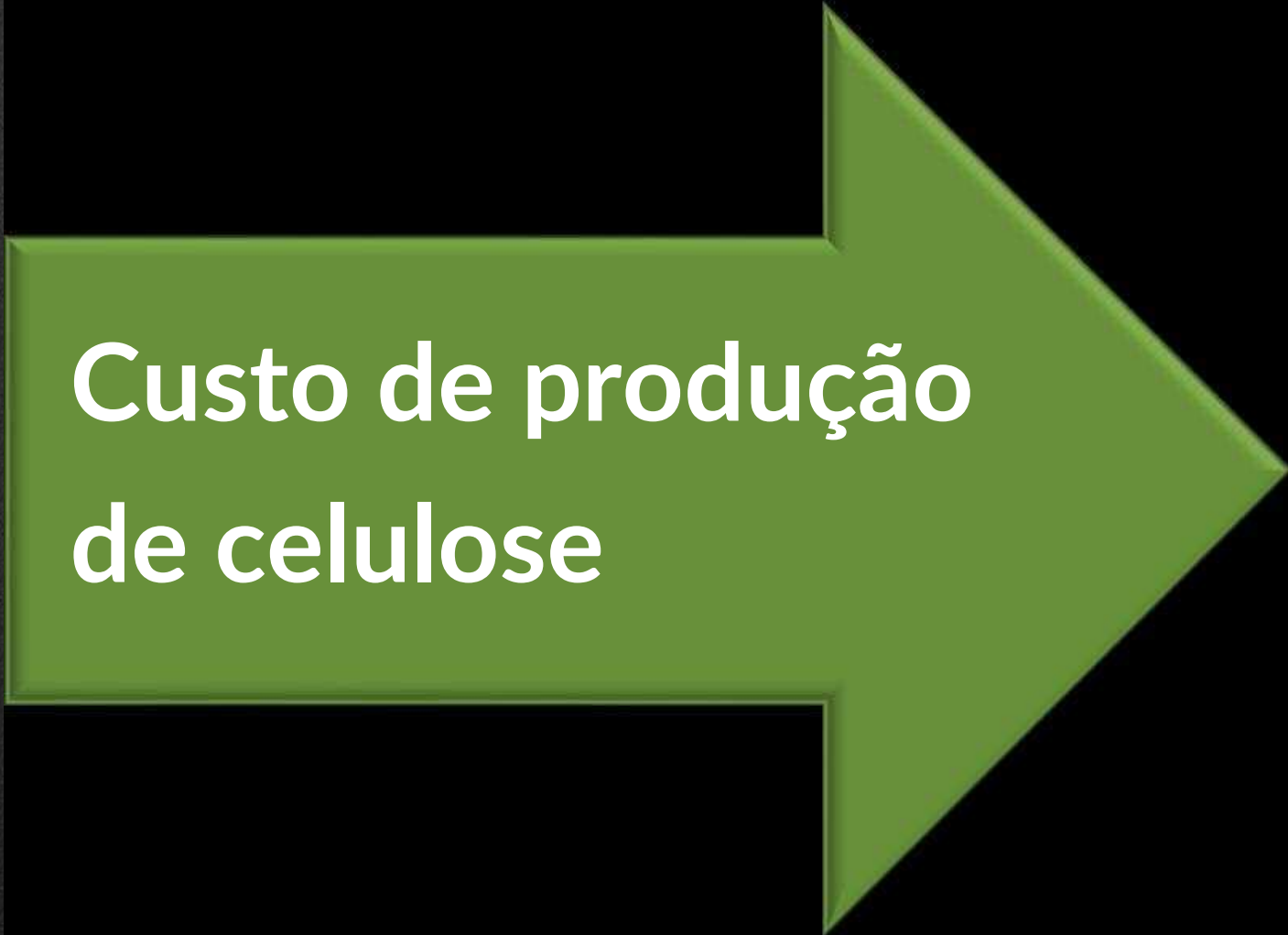
Fonte: Velilla et al. (2025)

Exemplo prático

Capacidade de produção:

2 M ADt/ano

+ 1Kg/ m^3



Custo de produção
de celulose

– 1.2 M $\frac{\text{USD}}{\text{ano}}$

SUMÁRIO

1

Histórico da Estimativa da densidade

2

O Resistógrafo: Primeiros desafios

3

Resultados Preliminares: Modelos de predição

4

Lições aprendidas e desafios futuros

Histórico da Estimativa da densidade

Amostragem não destrutiva: Pilodyn



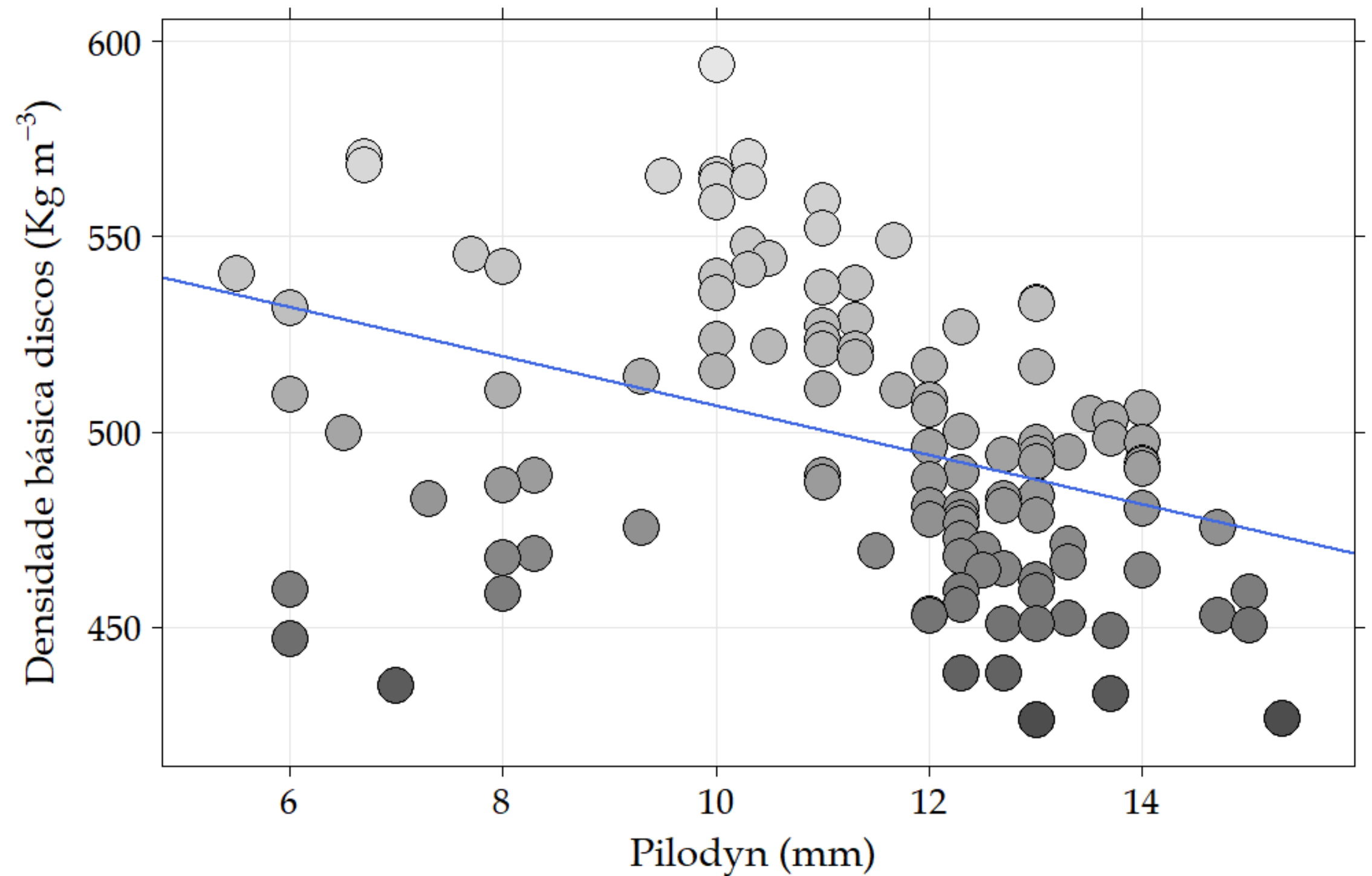
Eficiência



Precisão



Relación entre Pilodyn y densidad básica de discos en *Eucalyptus* spp.



Histórico da Estimativa da densidade

Amostragem não destrutiva: Trado adaptado (Trecor[®])



Eficiência



Precisão



10 minutos depois...



1: Trecor[®] Wood Corer with a Tanaka[®] petrol motor drill.

Histórico da Estimativa da densidade

Amostragem não destrutiva: **Bagueta (5 cm)**



Eficiência



Precisão



6 a 9 días aproximadamente

Histórico da Estimativa da densidade

Amostragem não destrutiva: Resistógrafo



Eficiência

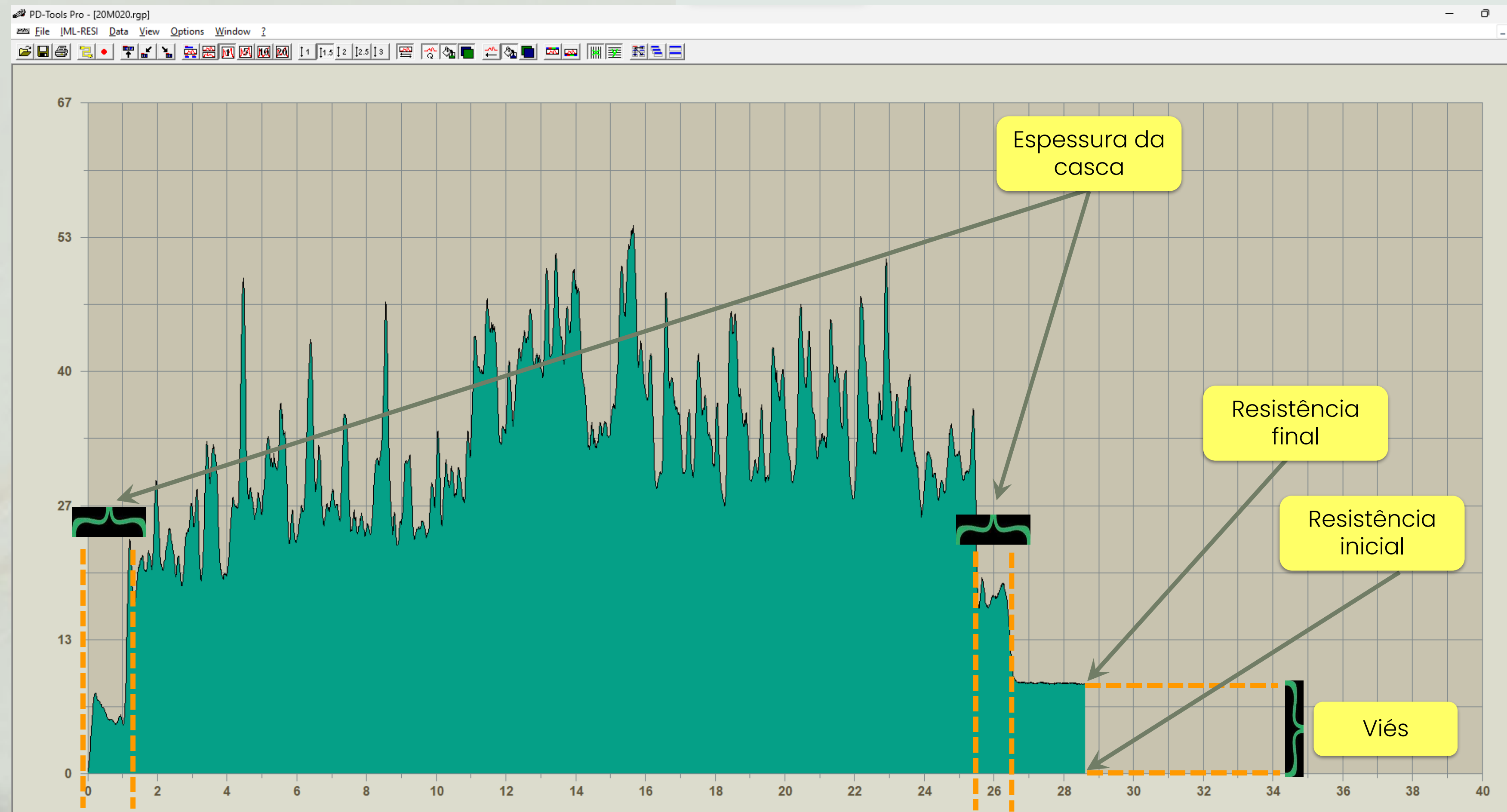


Precisão



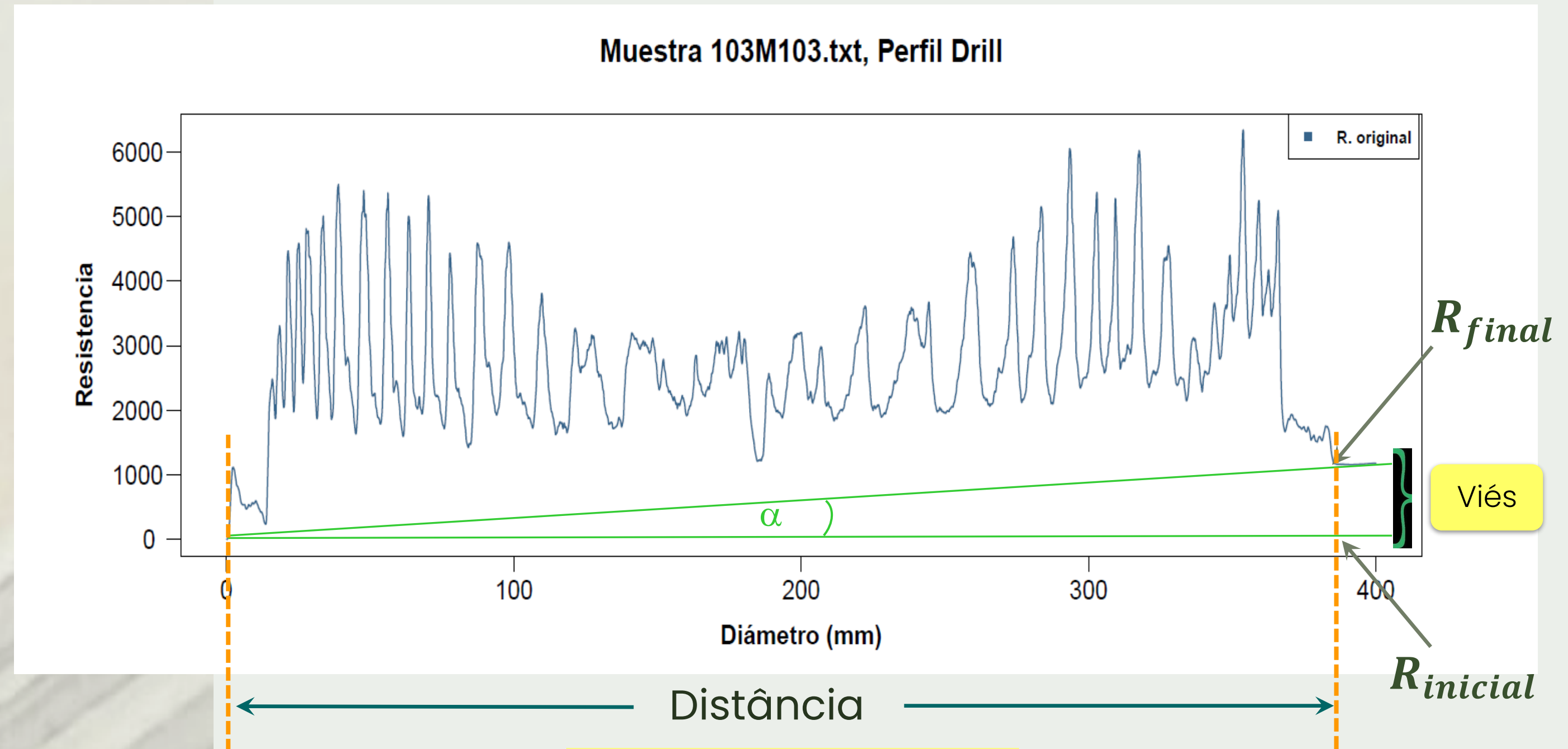
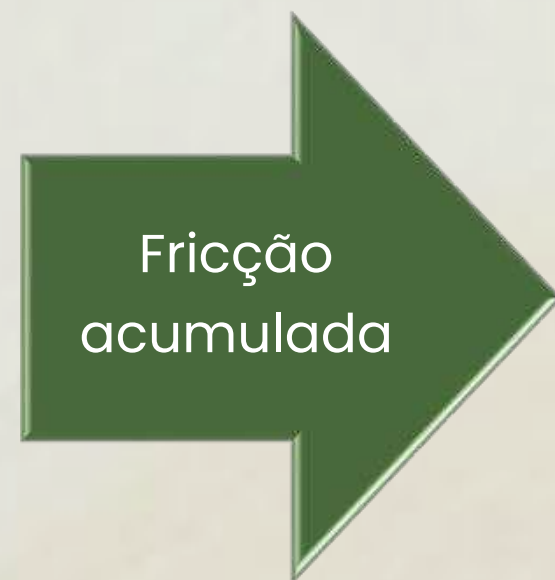
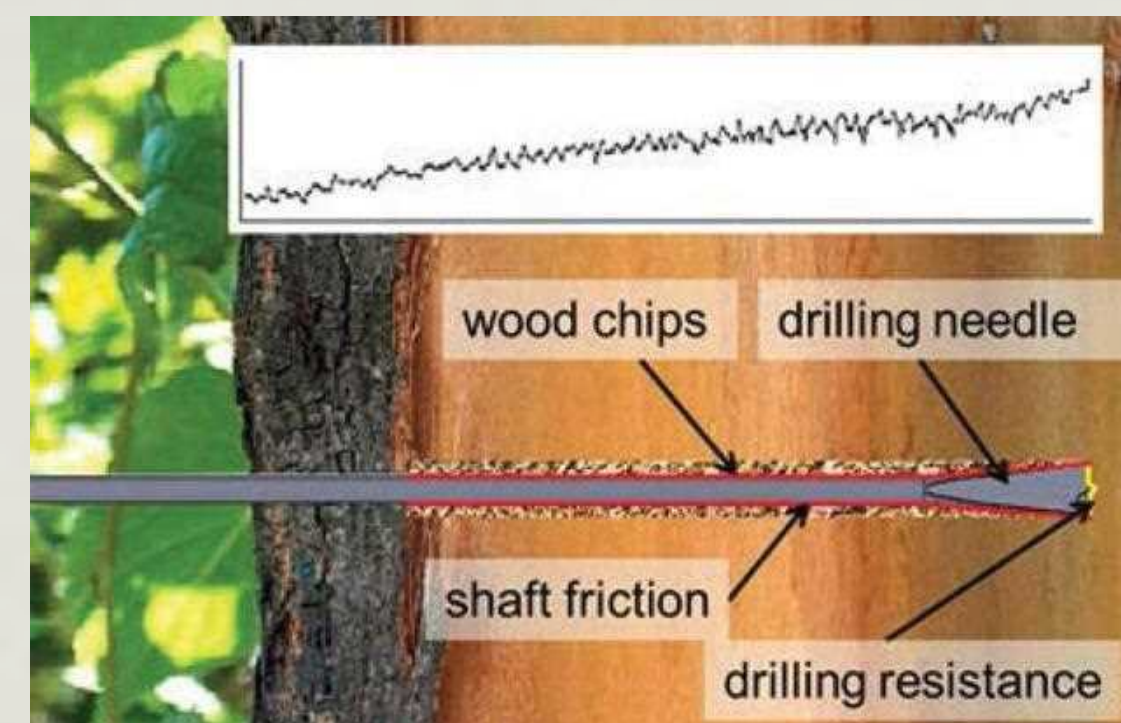
O Resistógrafo: Primeiros desafios

Como transformar este perfil em um valor útil?



O Resistógrafo: Primeiros desafios

Ajustando os dados para remover o viés da fricção



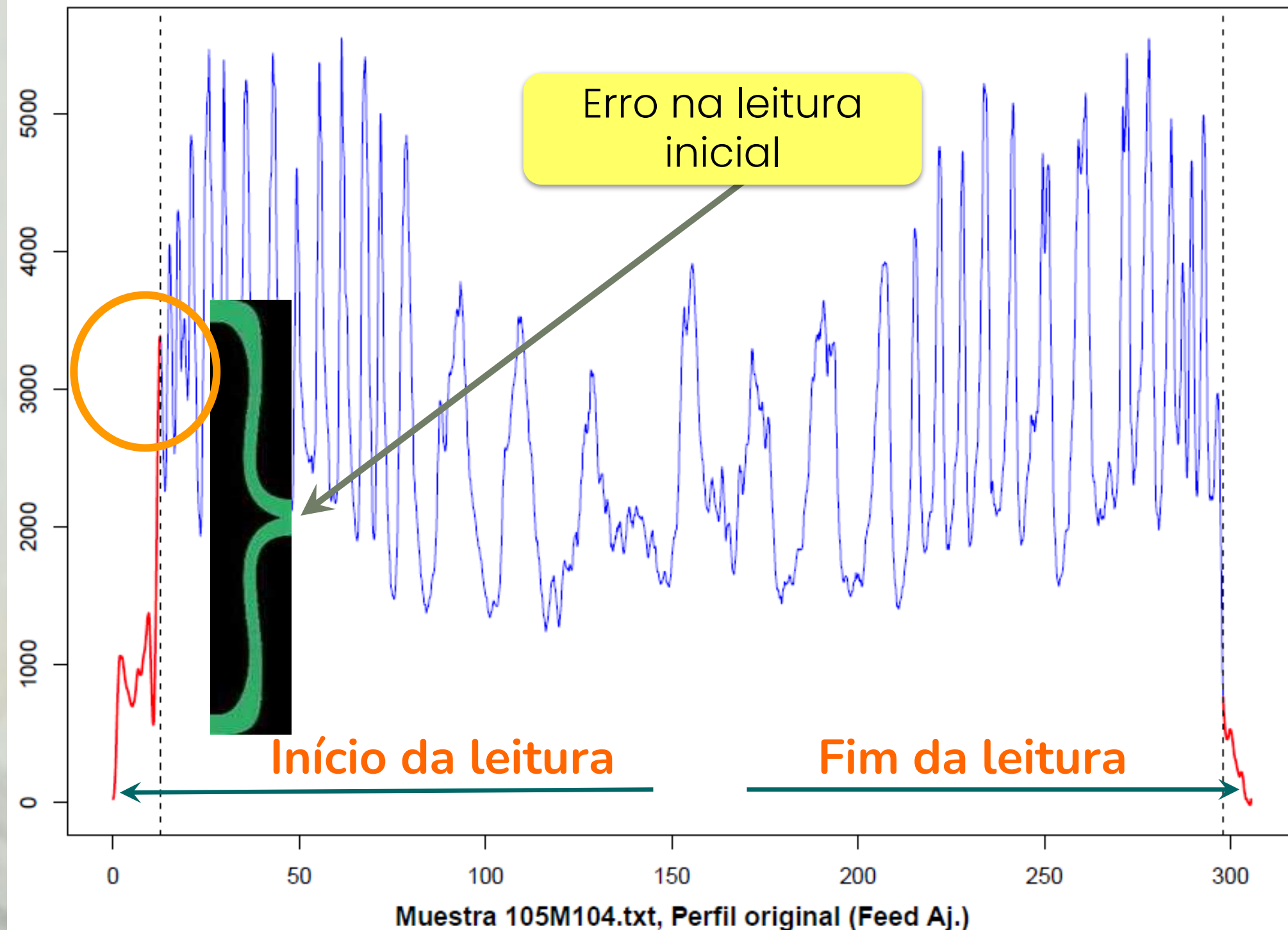
$$\tan \alpha = \frac{R_{final} - R_{inicial}}{distancia}$$

$$R_{i-ajustada} = R_{i-original} - \tan \alpha * distancia_i$$

O Resistógrafo: Primeiros desafios

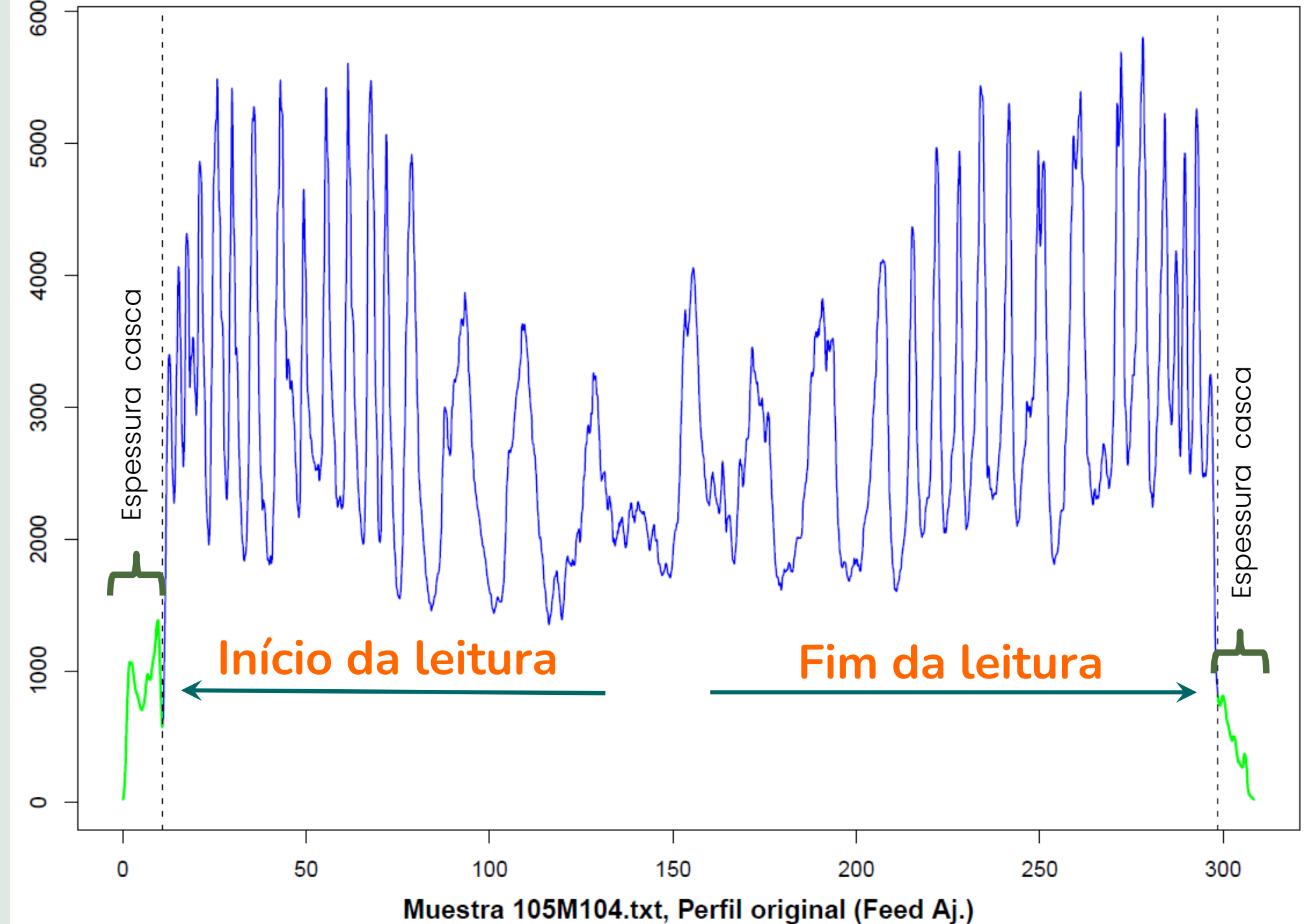
Próximo passo: Isolar o perfil da madeira

Muestra 105M104.txt, Perfil corregido (Drill Aj.)



Mesma árvore, após ajuste via Change-point Analysis

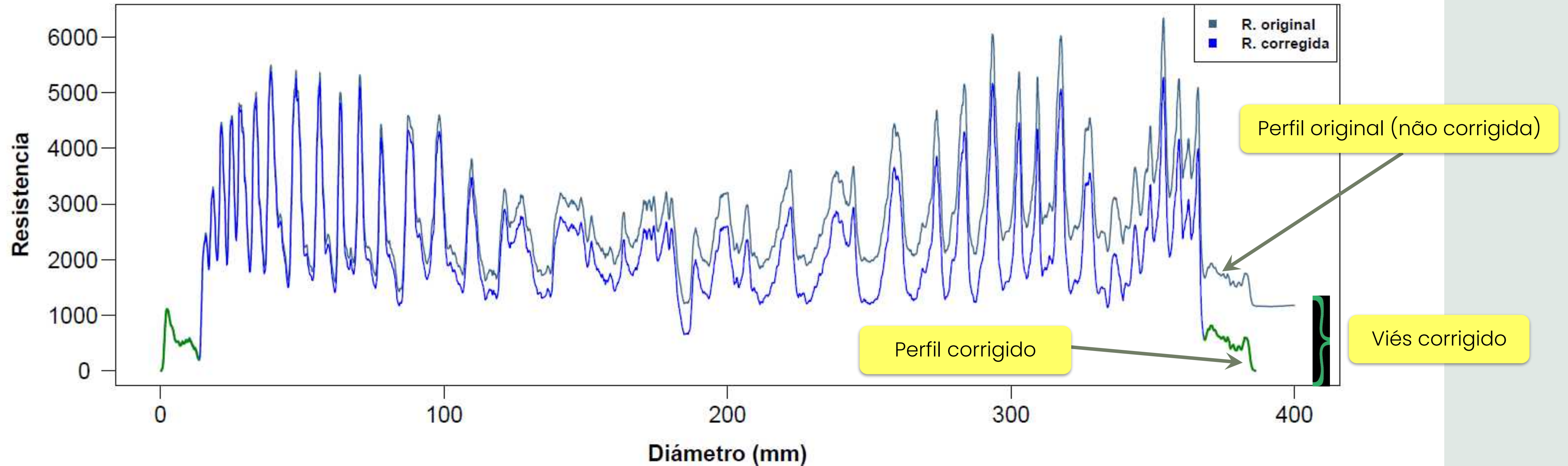
Muestra 105M104.txt, Perfil corregido (Drill Aj.)



O Resistógrafo: Primeiros desafios

O resultado: Um perfil corrigido e pronto para análise

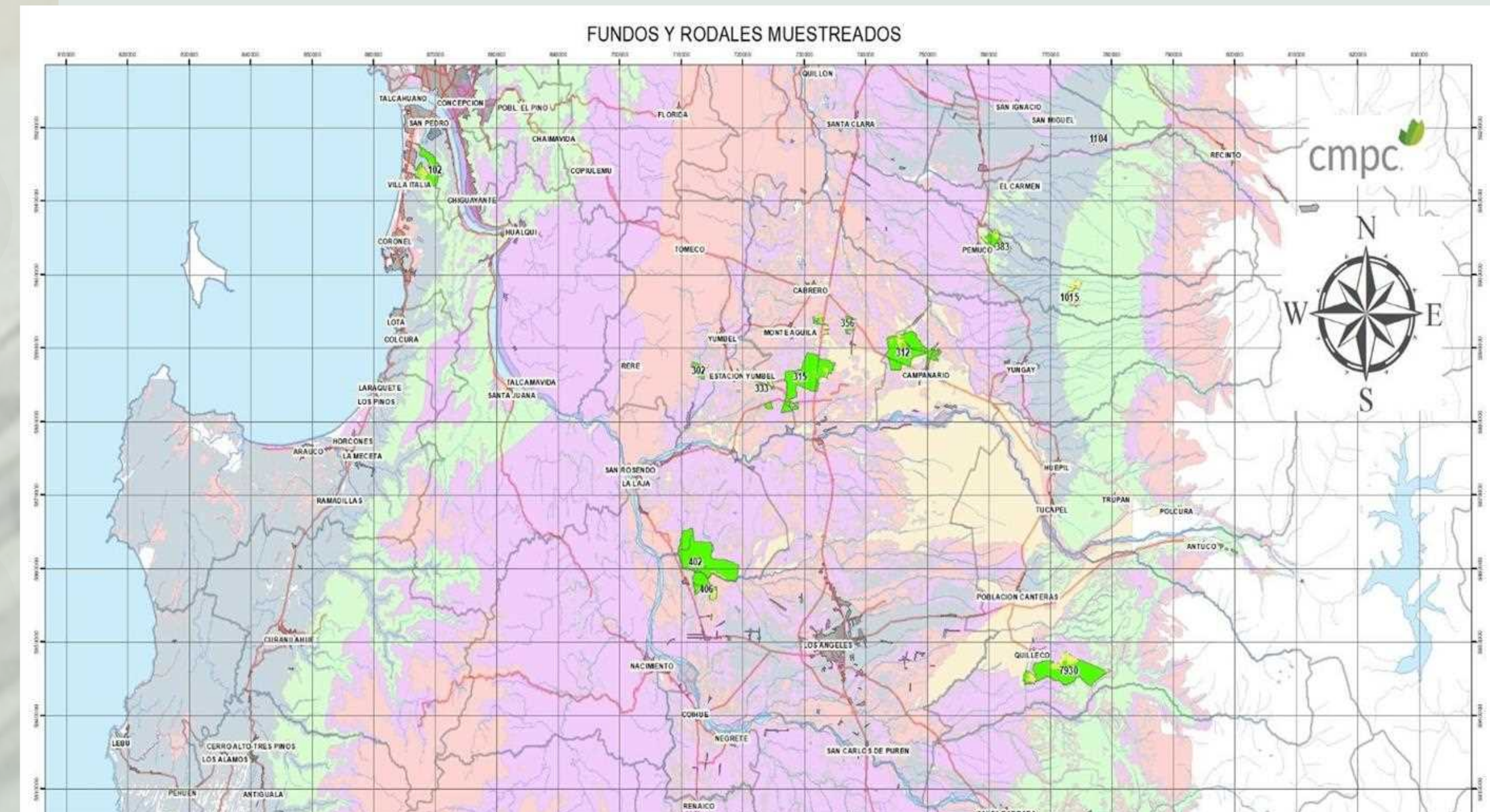
Muestra 103M103.txt, Perfil Drill



Estratégia de amostragem

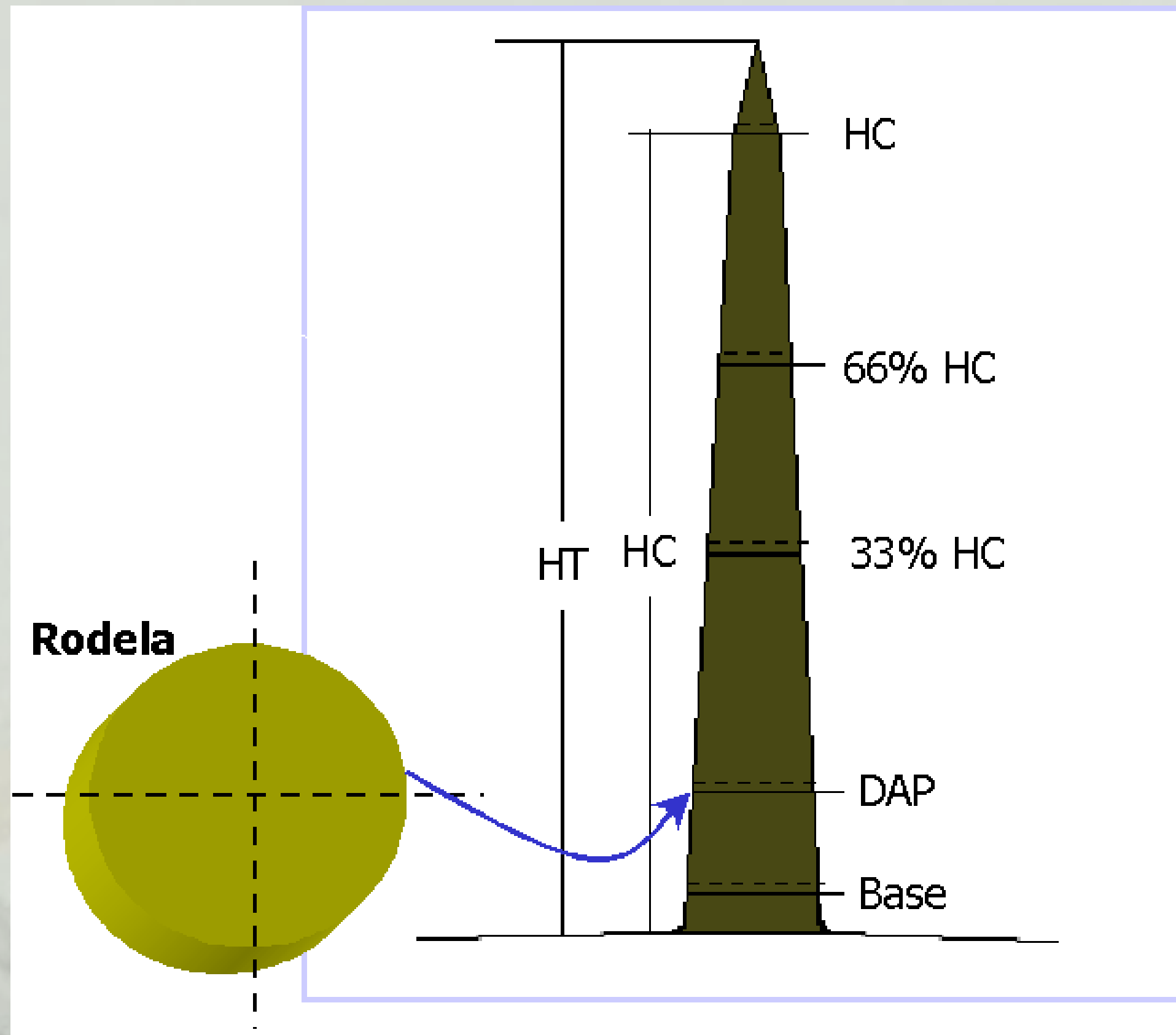
Amostragem destrutiva (discos): 532 árvores

Representatividade da amostragem: 5 classes de produtividade e 3 classes de idade



Resultados Preliminares: Modelos de predição

Protocolo de amostragem destrutiva para obter a densidade básica



Resultados Preliminares: Modelos de predição

Qual método prediz melhor a densidade da madeira?

Amostragem com Resistógrafo



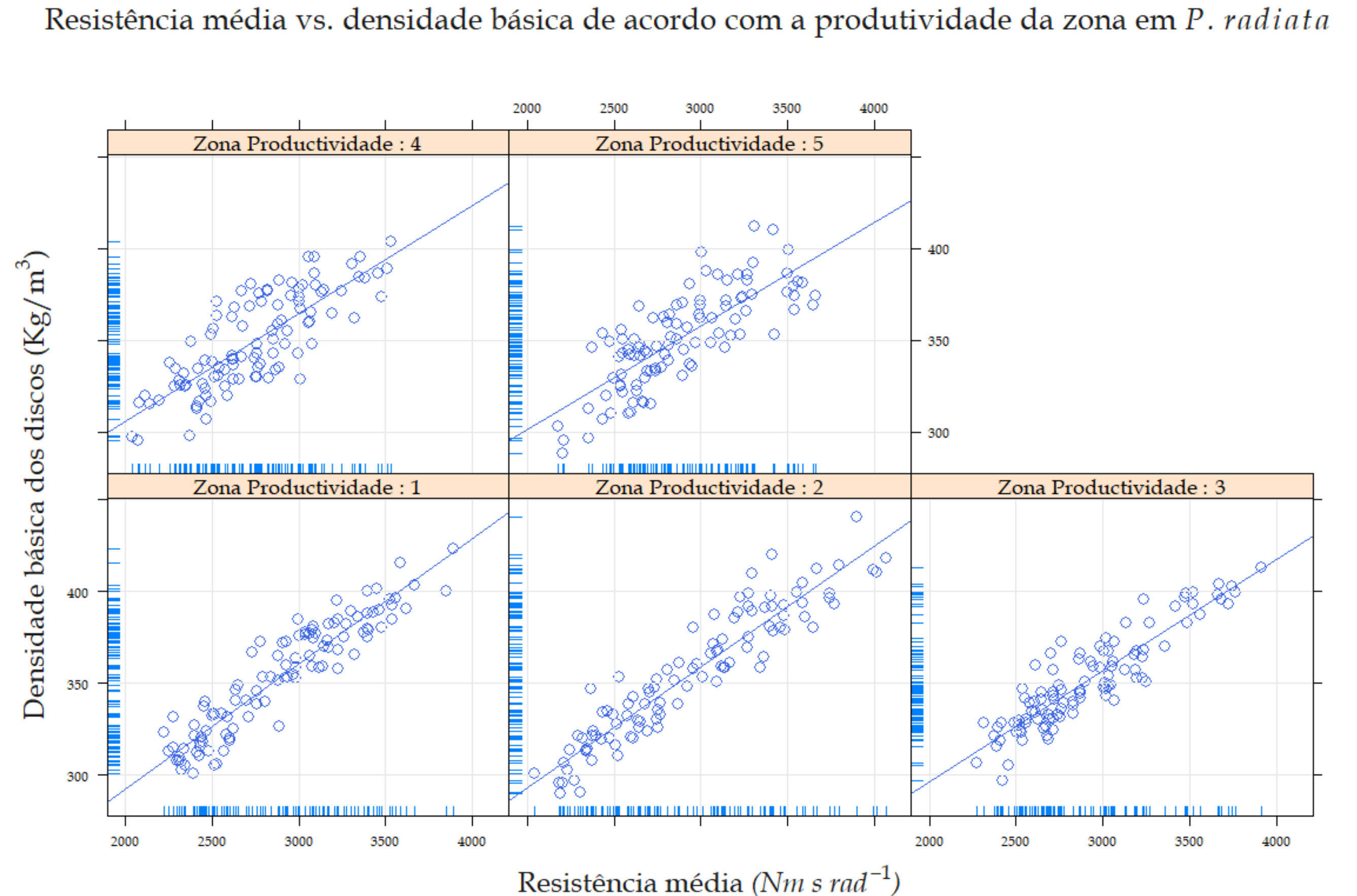
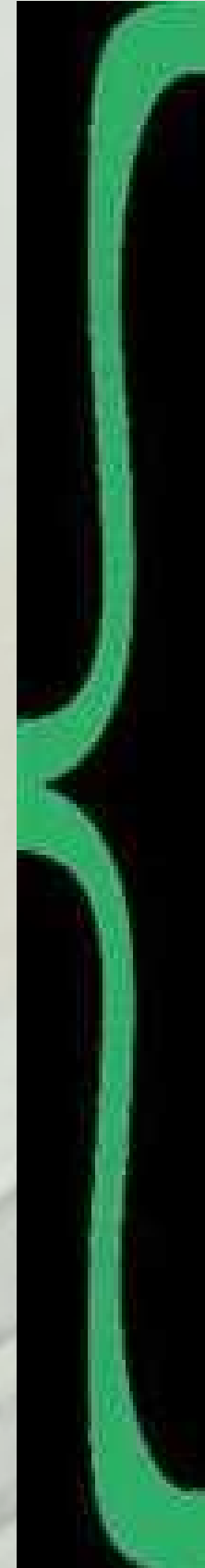
Amostragem com trado de incremento



Resultados Preliminares: Modelos de predição

O primeiro 'approach': Regressão Linear Simples

$$DB\left(\frac{Kg}{m^3}\right) = f(Resist\acute{o}grafo) + \varepsilon$$



Resultados Preliminares: Modelos de predição

Resultados da comparação direta (madeira externa 5 cm)

Resistógrafo (primeiros 5 cm) vs. trado de incremento de 5 cm

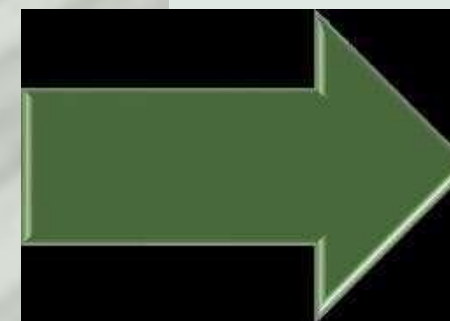
$$DB \left(\frac{Kg}{m^3} \right) = f(\text{trado de incremento}) + \varepsilon$$



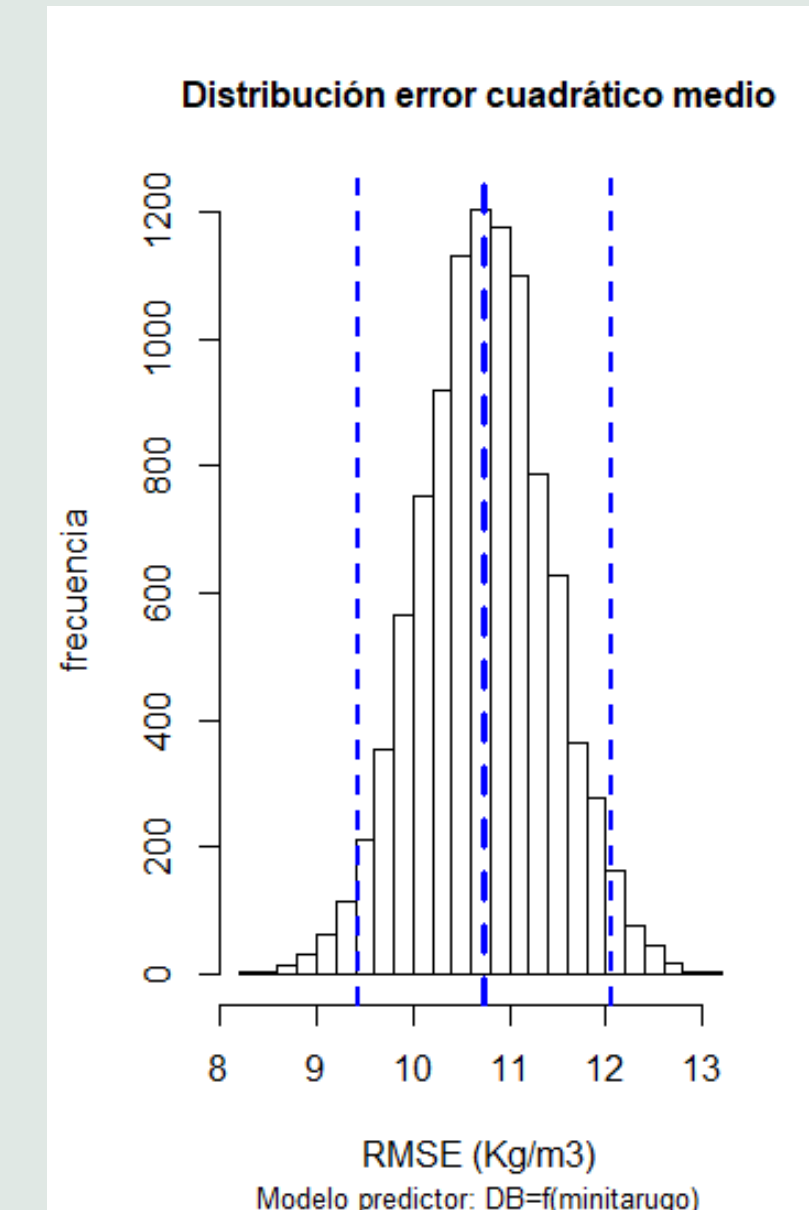
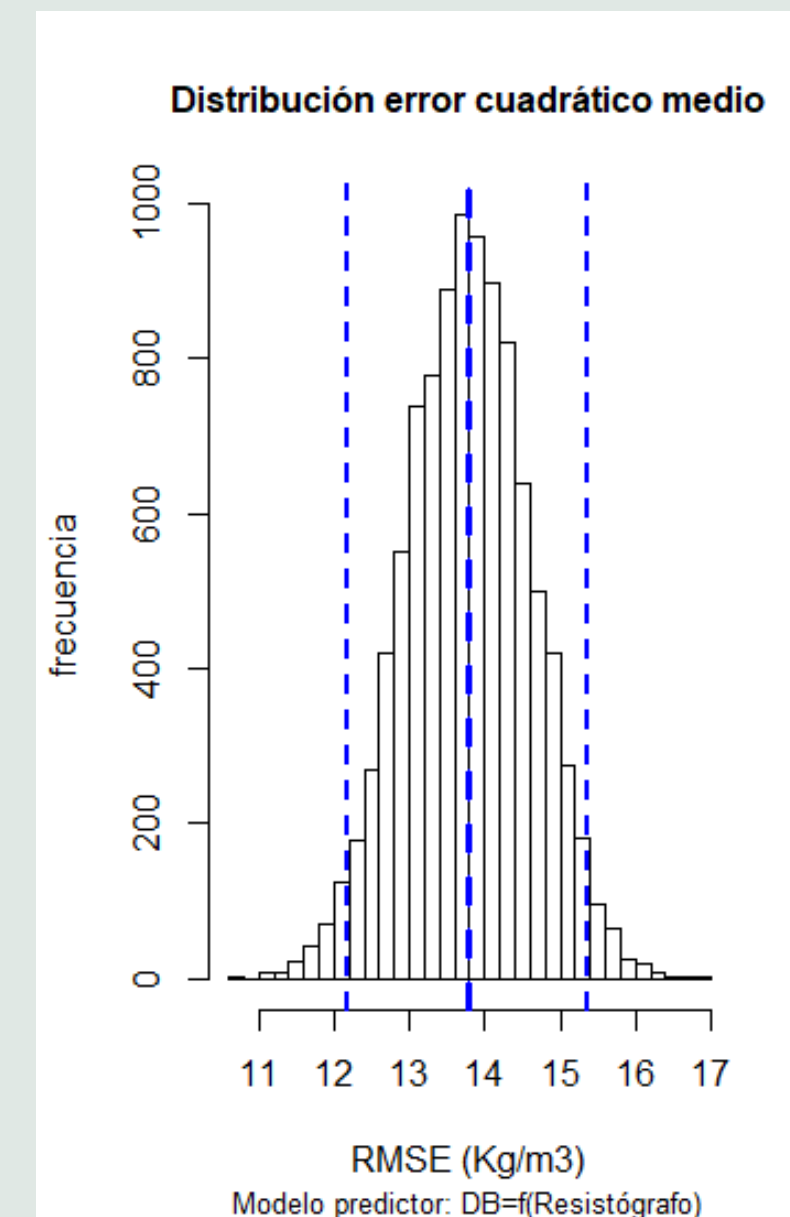
VIÉS: 0.0021 kg/m³
EQM: 11.8 kg/m³
R²=0.85



$$DB \left(\frac{Kg}{m^3} \right) = f(\text{Resistógrafo}) + \varepsilon$$

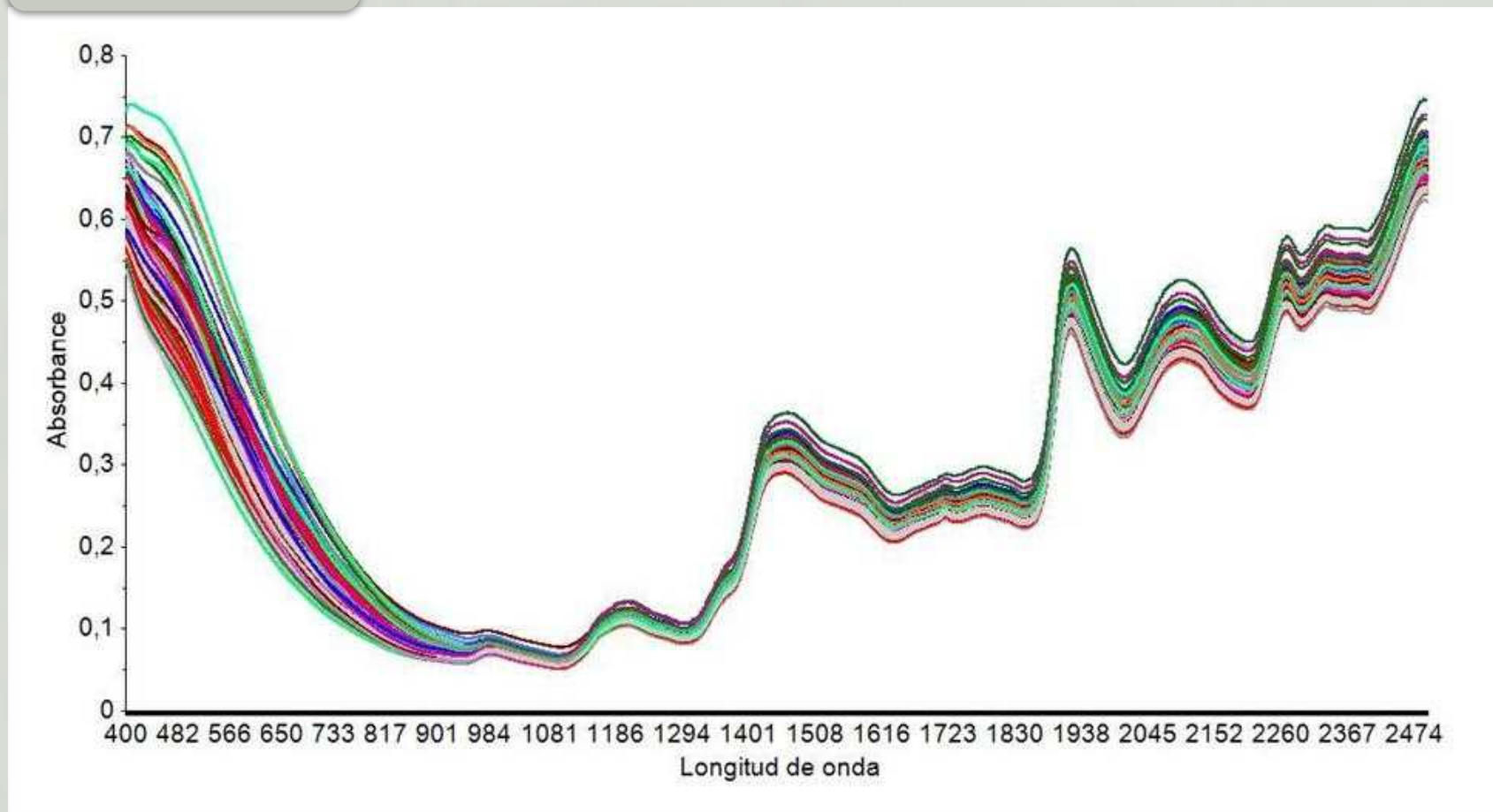


VIÉS: -0.0243 kg/m³
EQM: 13.8 kg/m³
R²=0.78

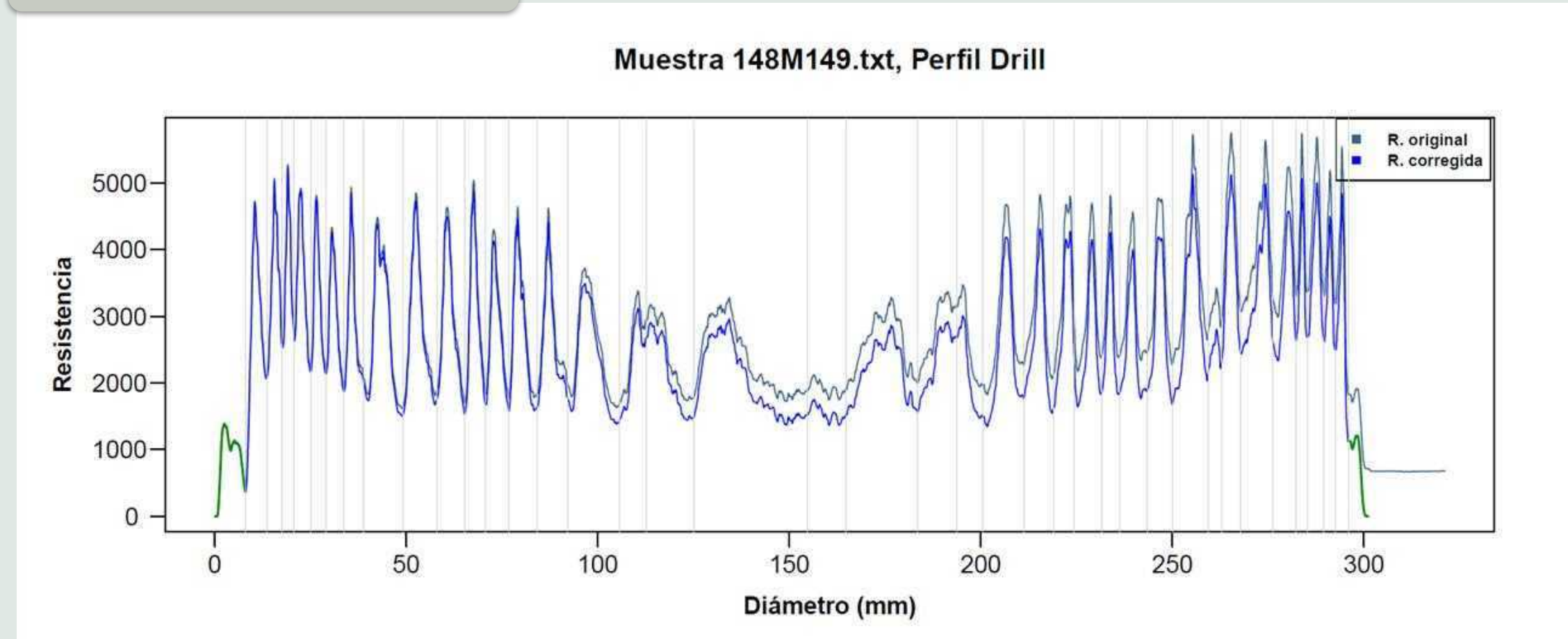


Uma nova abordagem: Tratando o perfil de resistência como um espectro

Perfil NIR



Perfil de Resistência



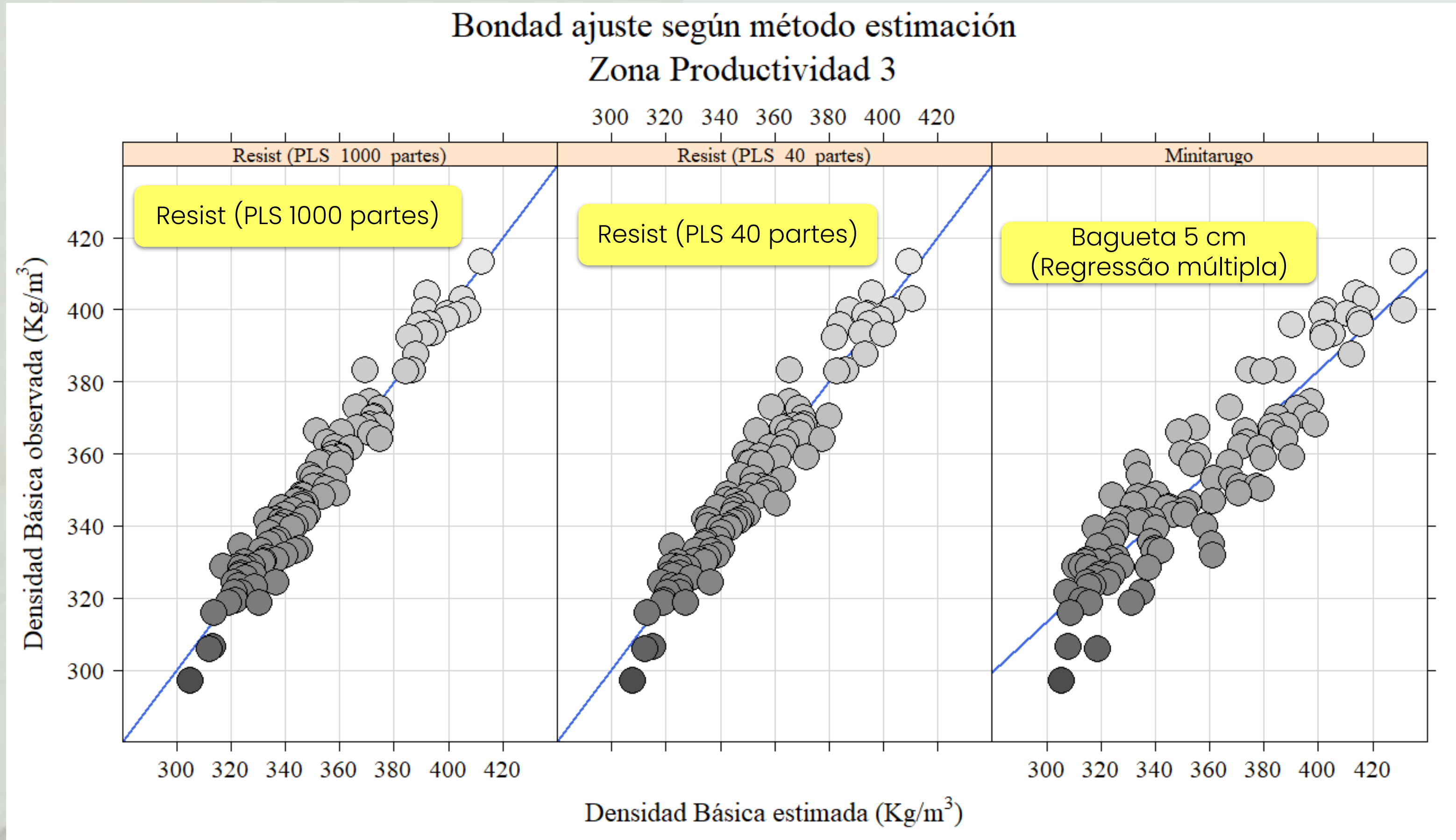
Aprox. 1,037 X_i (1 obs. cada 2 nm)

Aprox. 3,000 X_i (1 obs. cada 0.1 mm)

Partial Least Squares (PLS) + Principal Component Analysis (PCA)

Resultados Preliminares: Modelos de predição

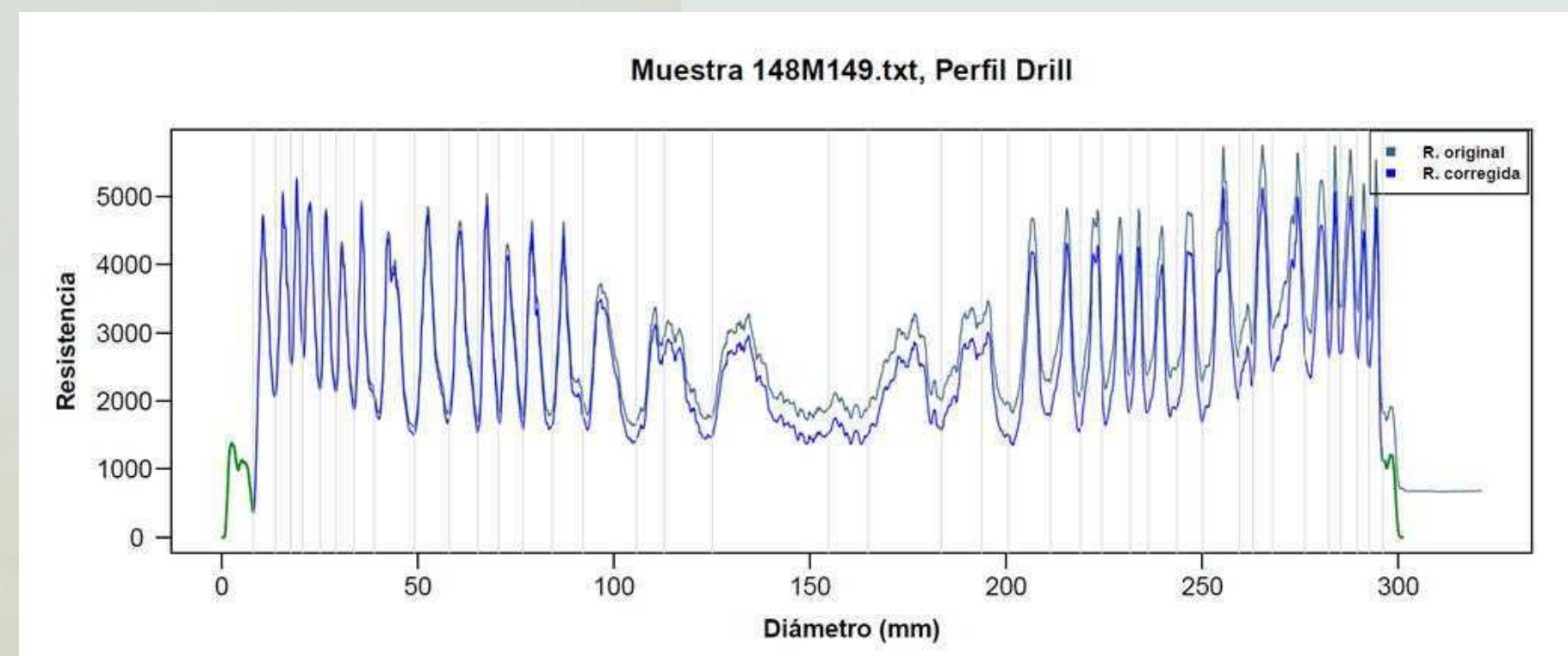
O veredito final: A superioridade dos modelos PLS



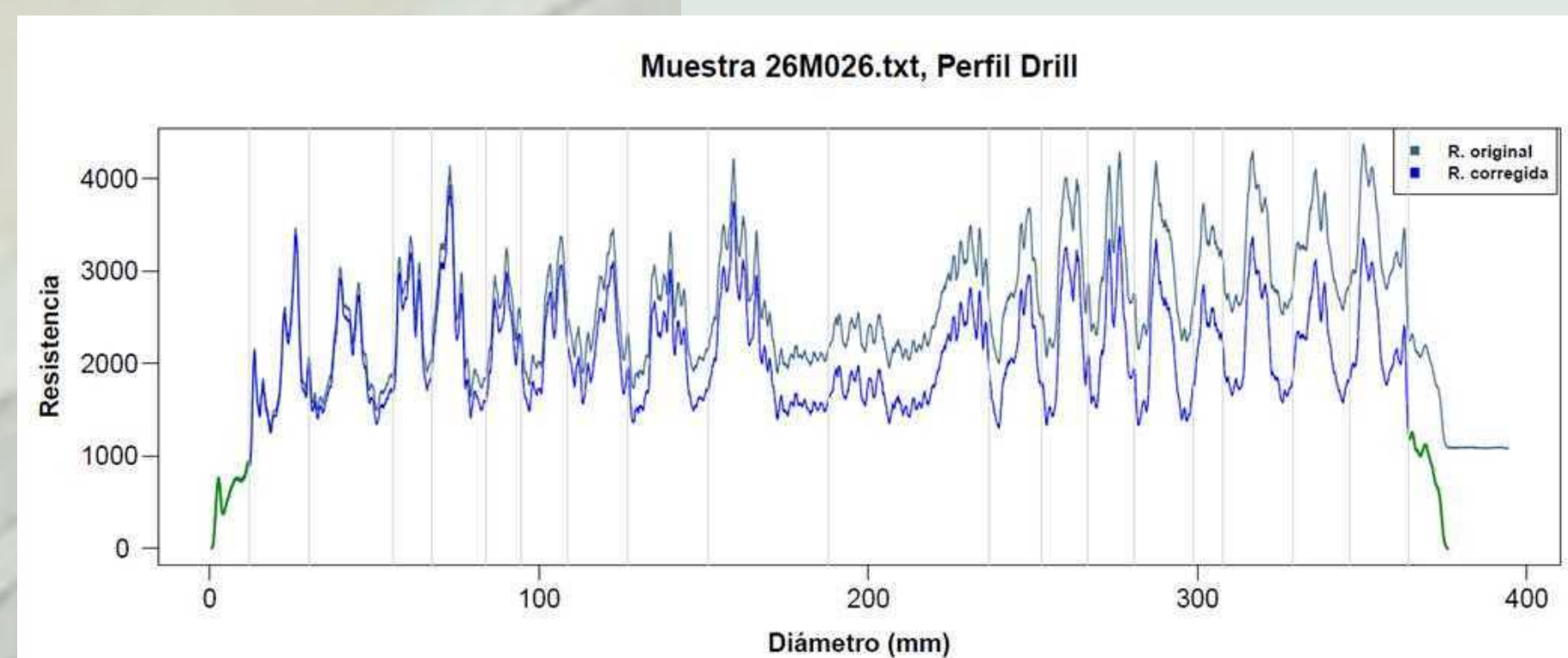
Resultados Preliminares: Modelos de predição

O desafio do 'ruído' no perfil de *Eucalyptus* para a modelagem PLS

Perfis de resistência *P. radiata*
(20 anos)



Perfis de resistência *E. nitens*
(12 anos)



exposição norte



exposição do sul

A evolução dos modelos: Da regressão linear à inteligência artificial

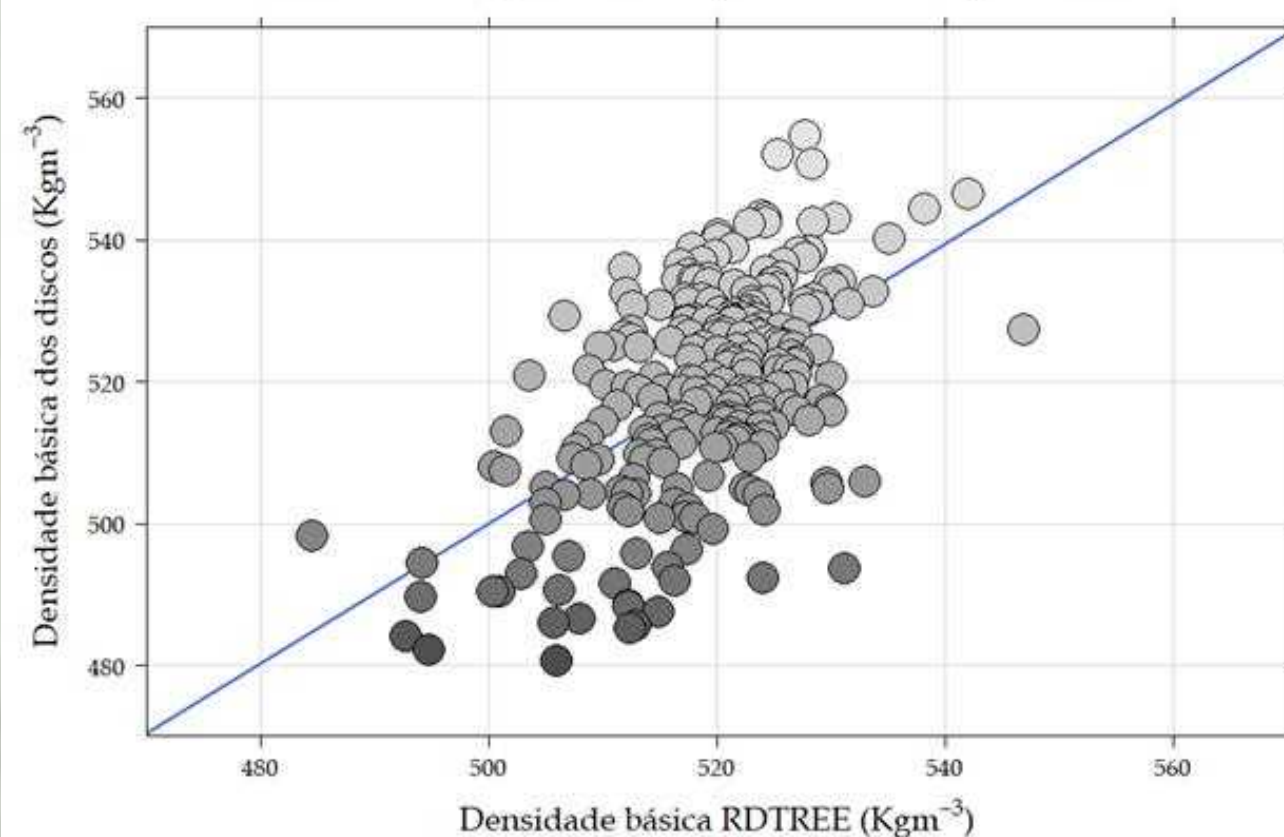
Multiple Linear
Regression



Desvio medio modelo:
22 – 30 Kg/m³

Nº param: 2

Qualidade de ajuste Multiple Linear Regression



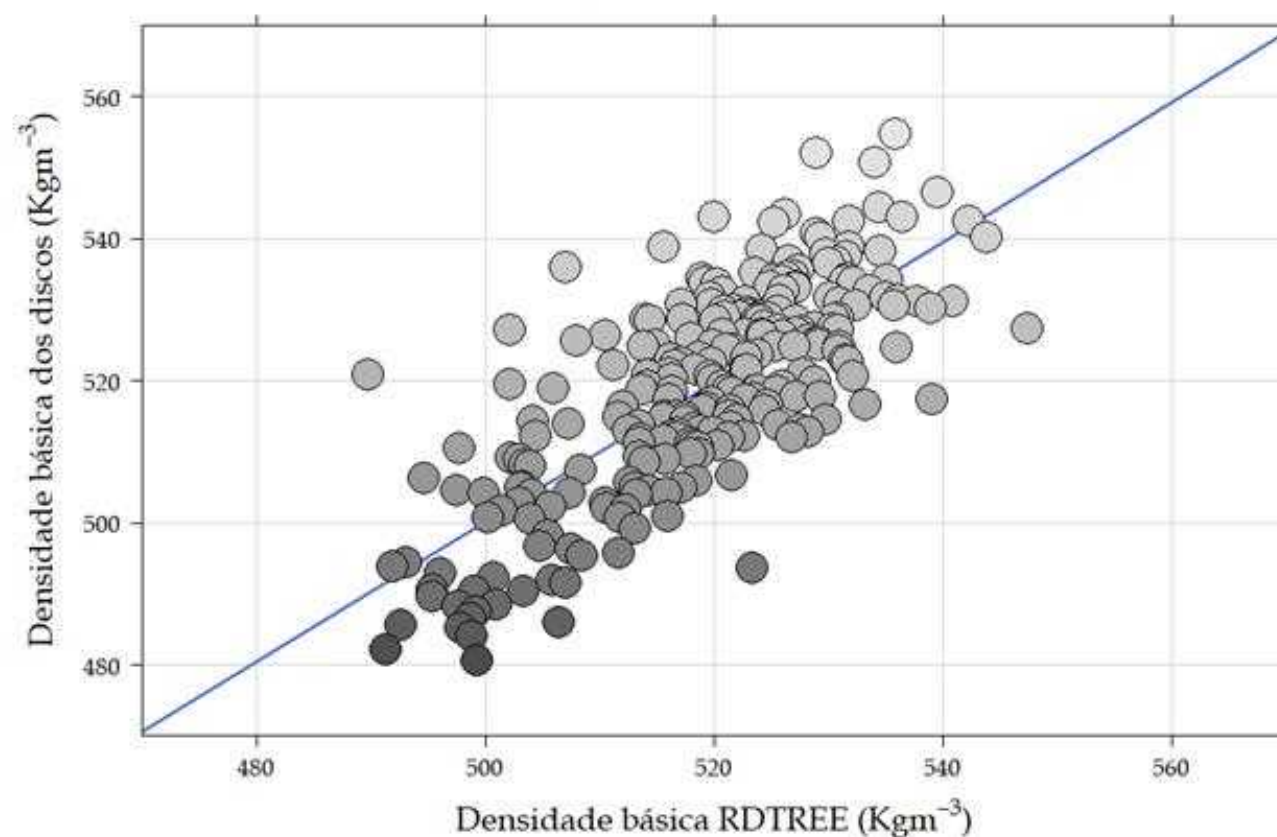
Partial Least Squares



Desvio medio modelo:
13 – 20 Kg/m³

Nº param: ??

Qualidade de ajuste Partial Least Squares



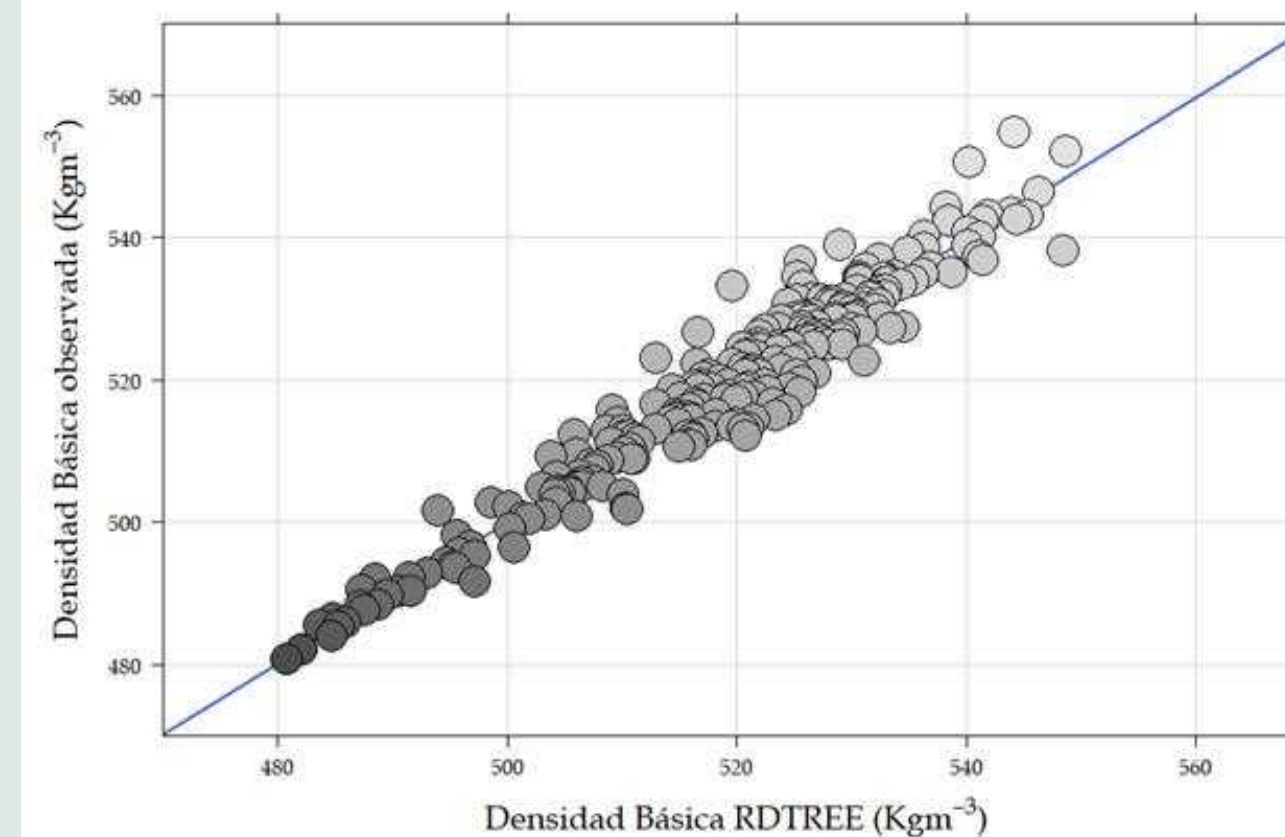
Artificial Neural
Networks



Desvio medio modelo:
5 – 7 Kg/m³

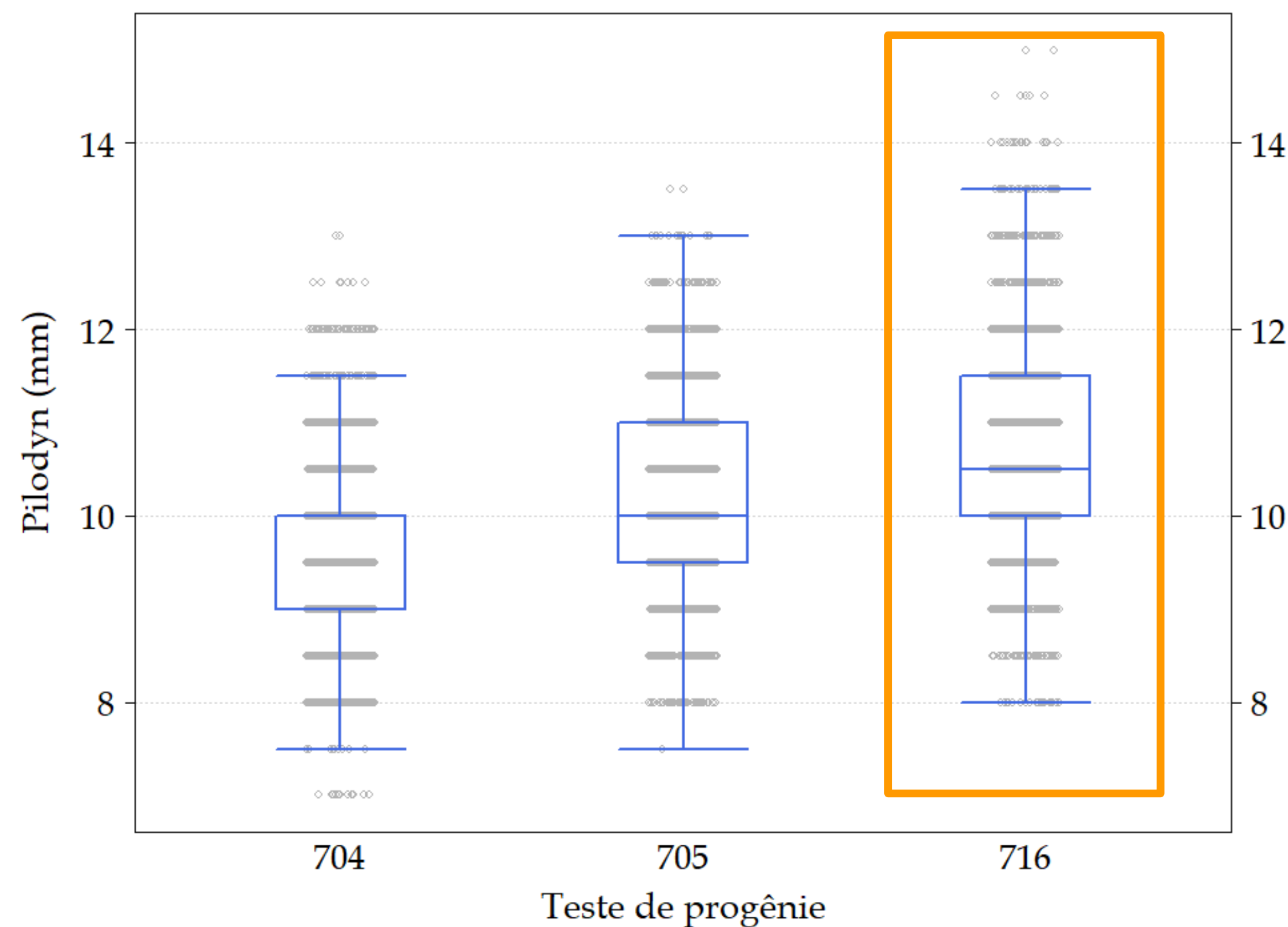
Nº param: ??

Bondad ajuste Artificial Neural Networks

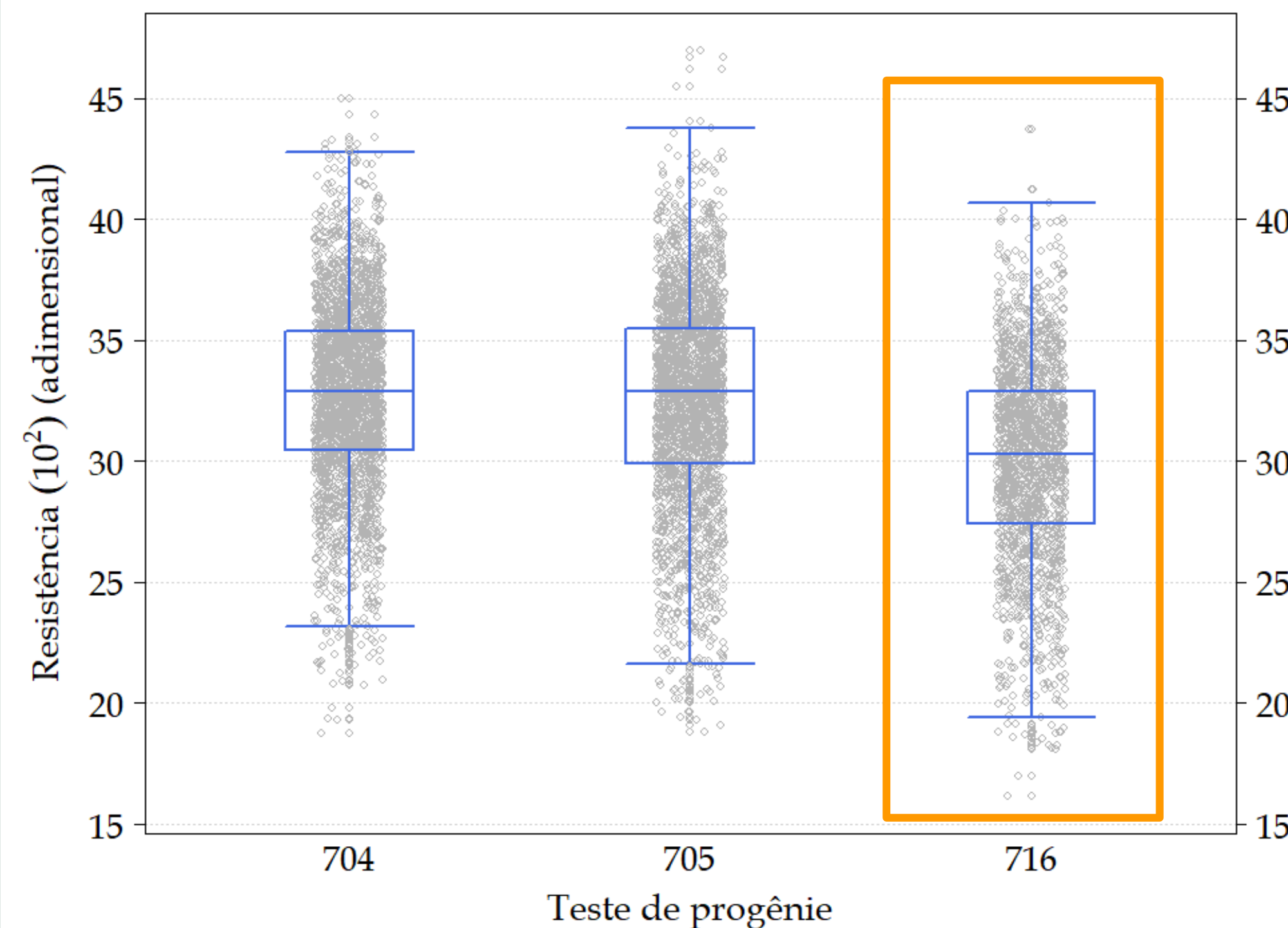


A resolução do dado define o poder da análise

Pilodyn (distribuição quasi-discreta)



Resistógrafo (distribuição contínua)



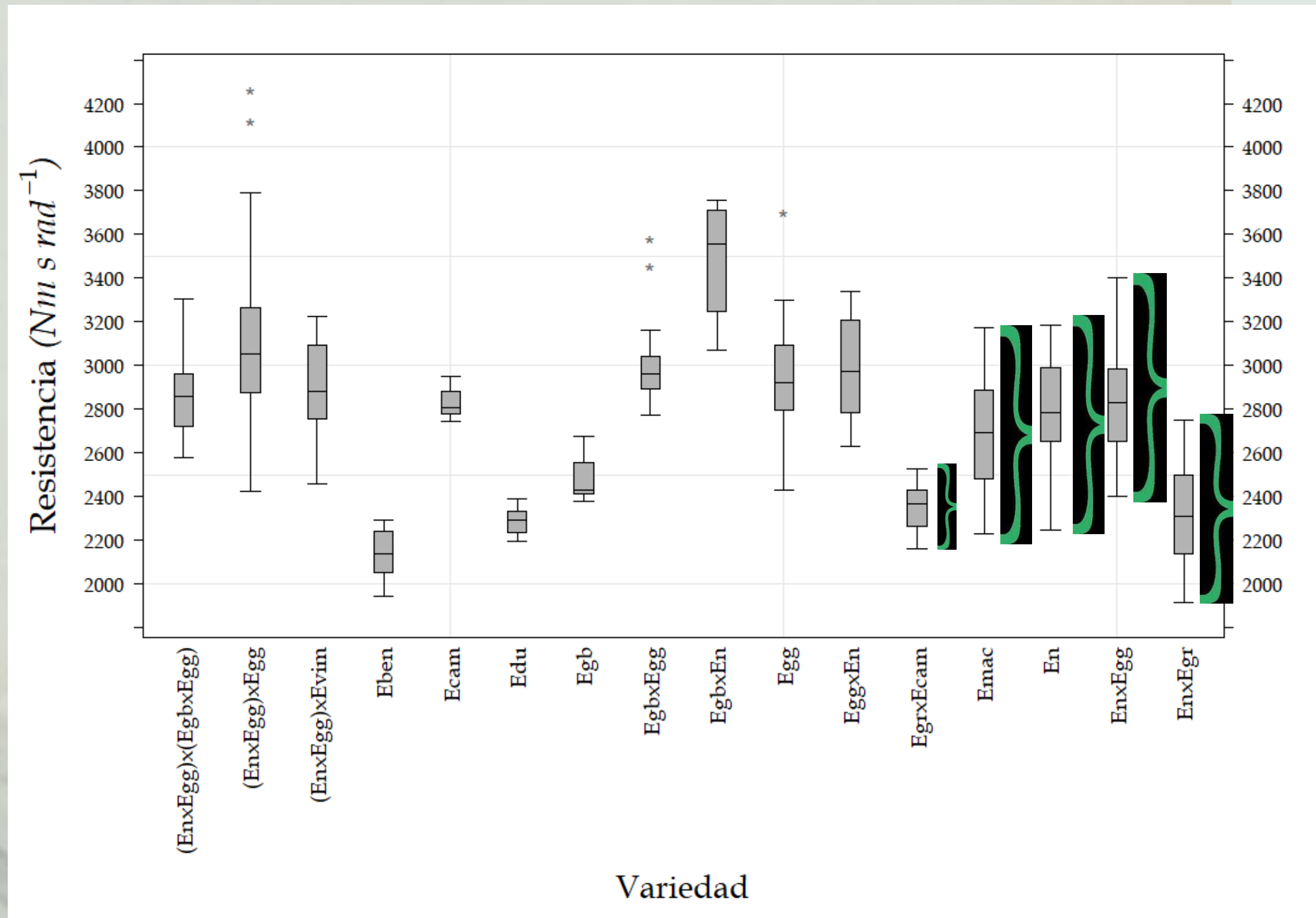
Comparativo em três testes de progênie de *E. globulus*, medidos com Pilodyn (7.2 anos) e Resistógrafo (9.2 anos).

Resistógrafo: uma ferramenta superior para discriminação genética



Resistógrafo

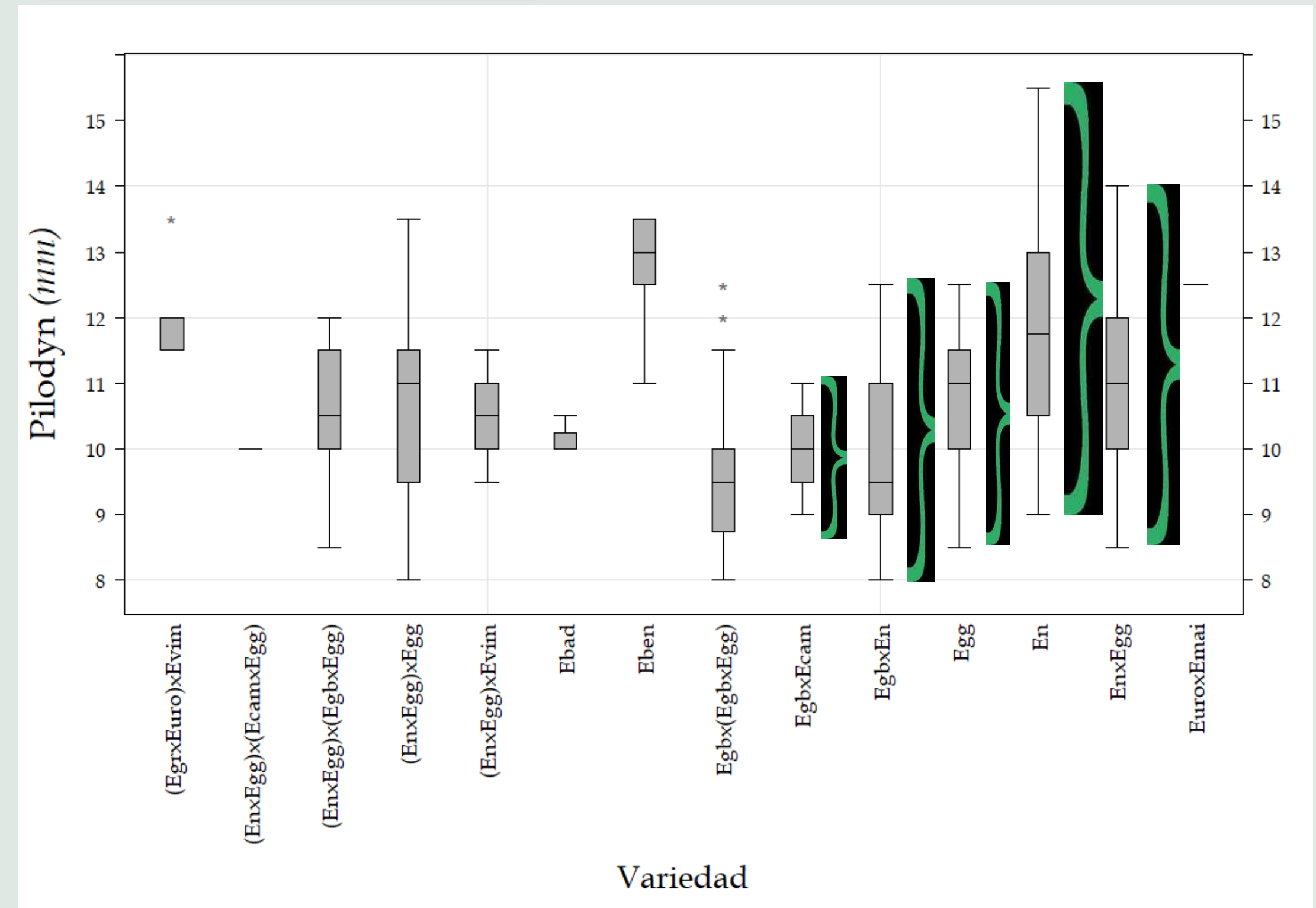
Alta Precisão



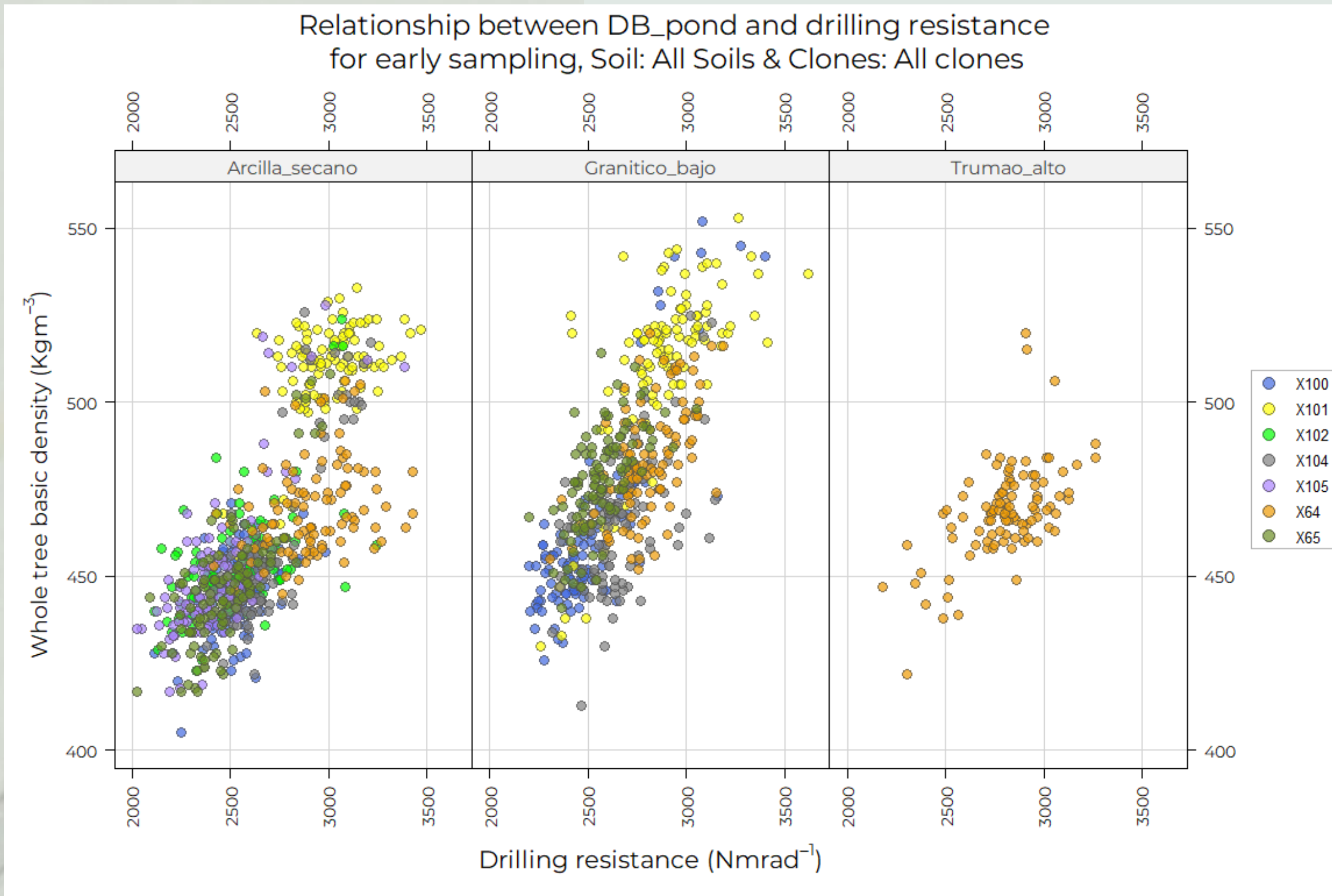


Pilodyn

Baixa Precisão



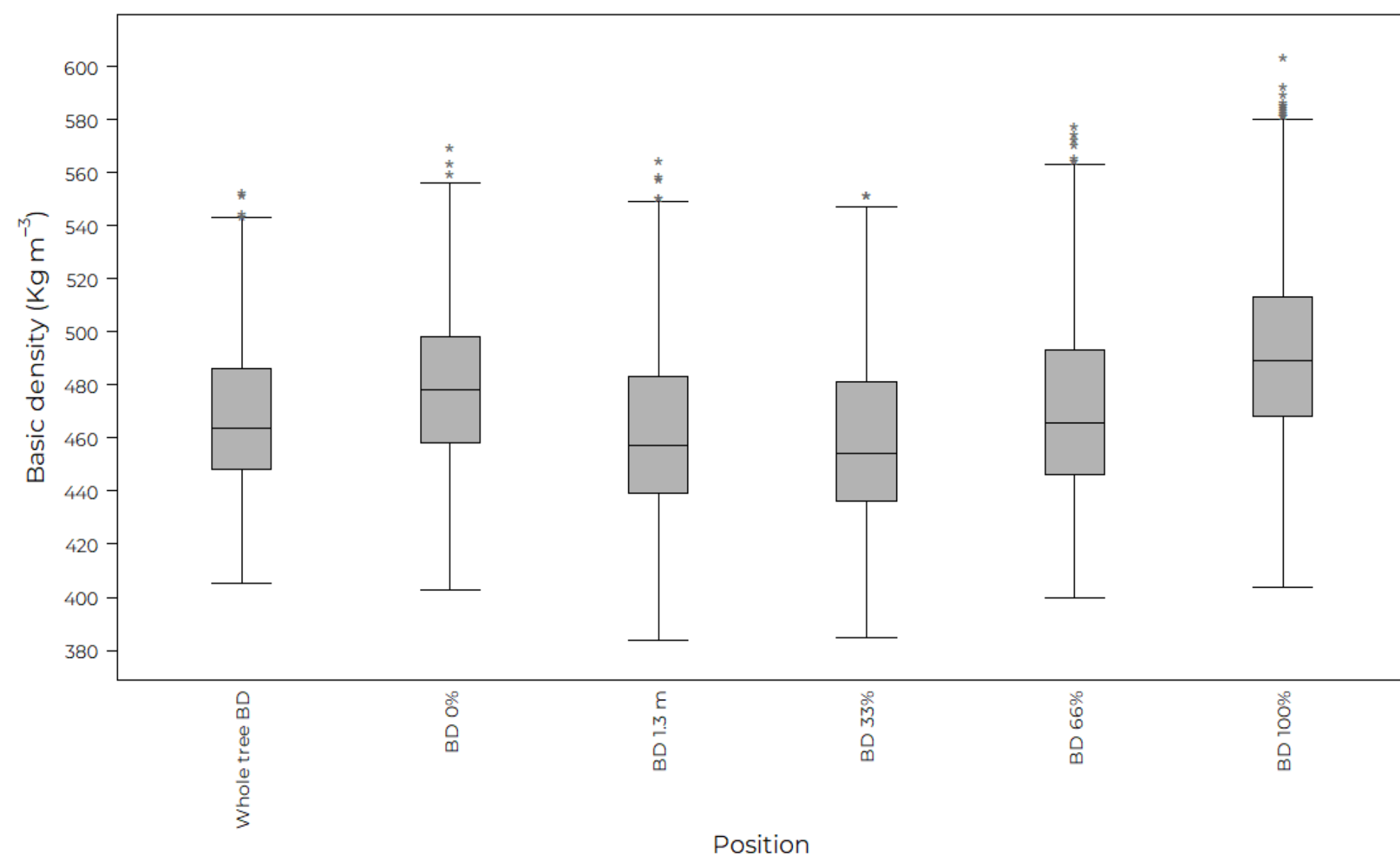
O poder do Resistógrafo: Seleção de clones de elite via alta resolução



A dinâmica da densidade: O padrão de variação muda com a idade

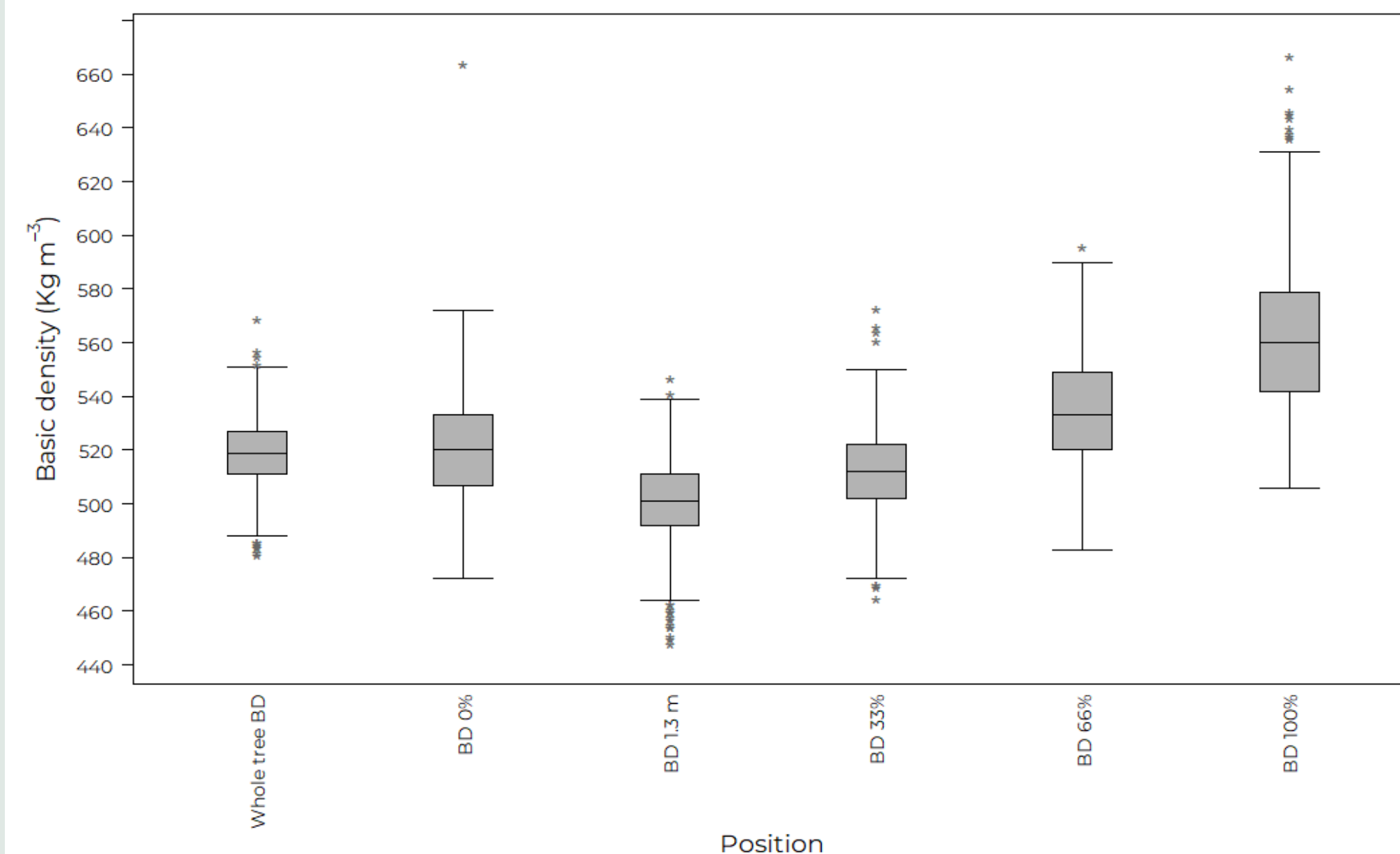
Distribuição da densidade: Idade juvenil (5 - 7 anos)

Basic density distribution by position for early sampling
Soil: All Soils & Clones: All clones



Distribuição da densidade: Idade adulta (15 - 18 anos)

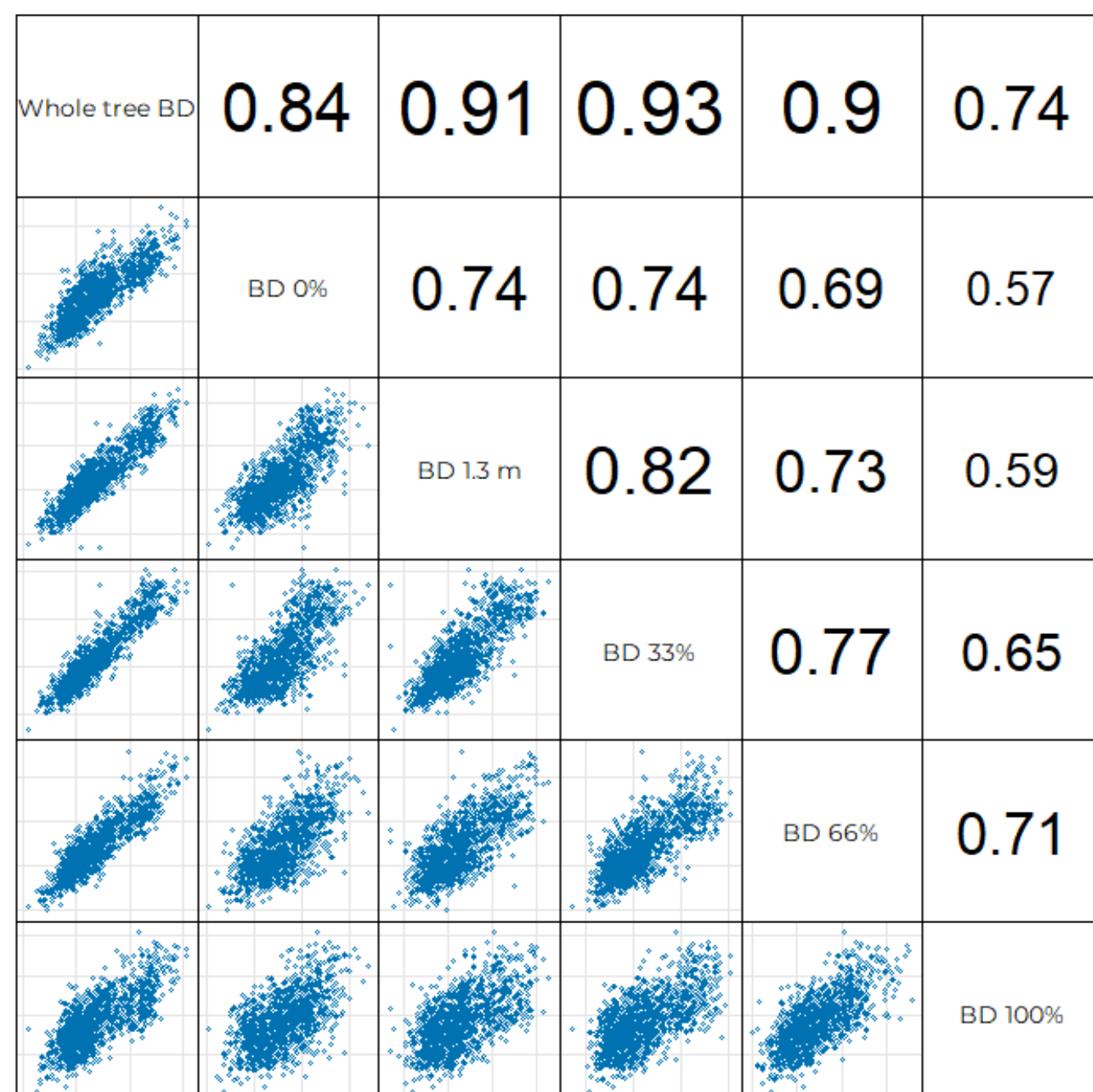
Basic density distribution by position for late sampling
Soil: All Soils & Clones: All clones



O desafio de prever a densidade em árvores adultas

Idade juvenil (5 – 7 anos)

Scatterplot matrix for early sampling, Soil: All Soils & Clones: All clones



Idade adulta (15 – 18 anos)

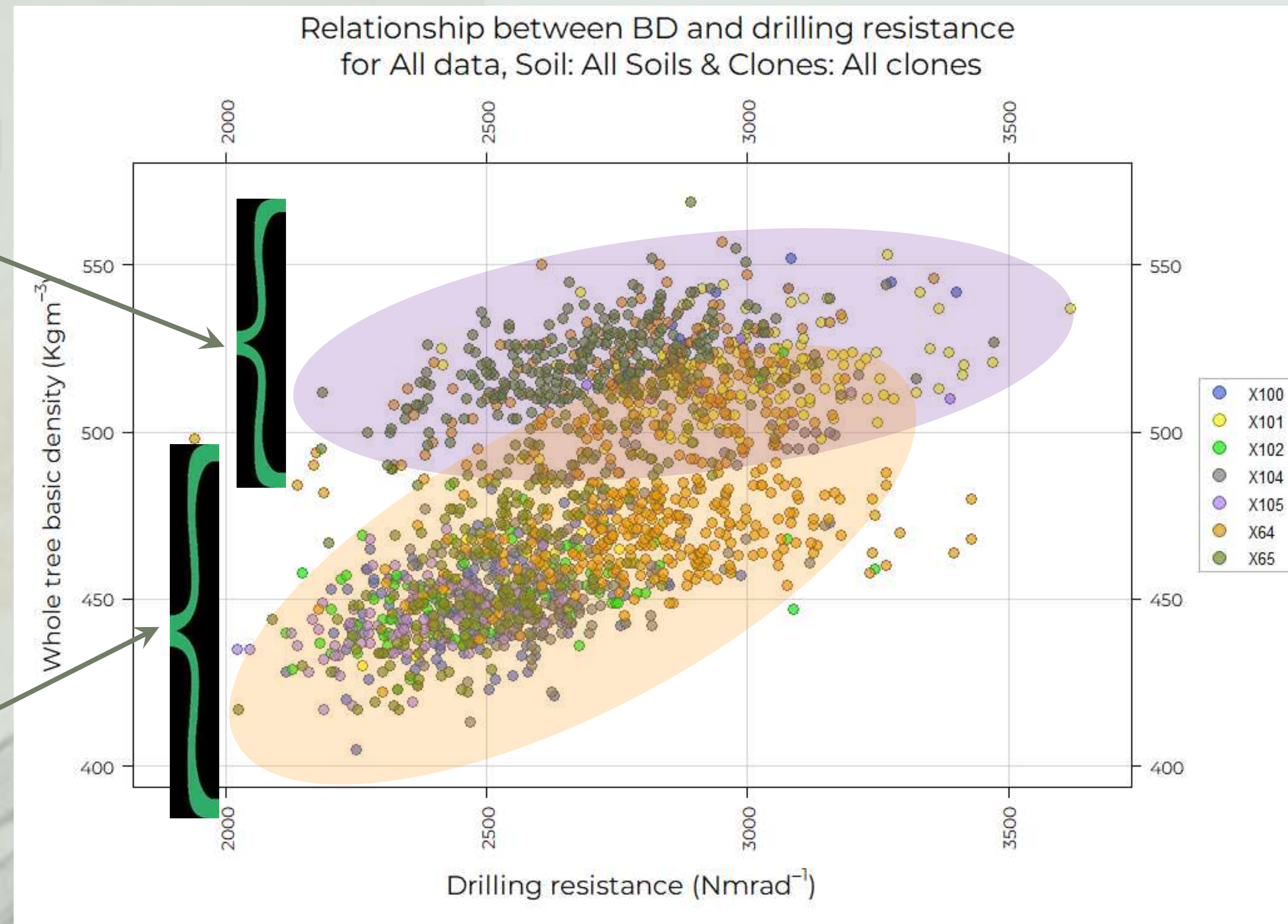
Scatterplot matrix for late sampling, Soil: All Soils & Clones: All clones



O impacto da idade na predição da densidade

Idade adulta (15 – 18 anos)

Idade juvenil (5 – 7 anos)



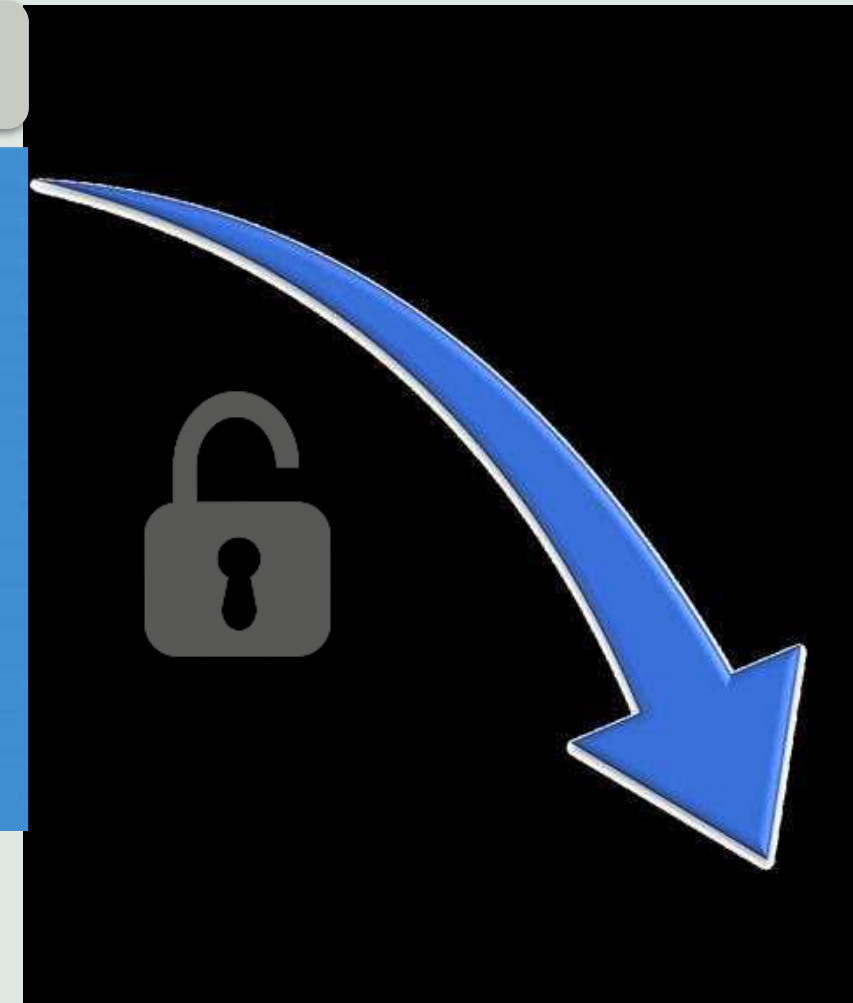
Lições aprendidas e desafios futuros

Integração de dados de campo no ecossistema SIMEGE

Captura de dados em campo



Ecossistema SIMEGE (na nuvem Azure)



P&D

Análise e Tomada de Decisão

O próximo capítulo: Da precisão técnica ao impacto econômico

Artigo em preparação:

Optimizing *Eucalyptus* pulp profit: A BLUP-based comparison of Resistograph vs. Pilodyn selection indices

Edgardo Velilla^{*1}, Eduardo Acuña², Nuno Borralho³

¹*I+D CMPC, avenida Las Industrias, Pedro Stark Troncoso 100, Los Ángeles, Chile*

²*Departamento de Manejo de Bosques y Medio Ambiente, Universidad de Concepción, Facultad de Ciencias Forestales, Victoria 631, Concepción, Chile*

³*Consultant in Forest Genetics and Breeding, Aveiro, Portugal*

**Corresponding author: edgardo.velilla@cmppc.com*

Muito obrigado pela sua atenção

Desejo a todos uma conferência produtiva e
enriquecedora



edgardo.velilla@cmppc.com