

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS**

**PROVENIÊNCIA, TAXA DE SEDIMENTAÇÃO E
PROPRIEDADES MAGNÉTICAS DOS SEDIMENTOS
HOLOCÊNICOS DA LAGOA DOS PATOS**

MICHEL DOEPPRE IVANOFF

ORIENTADOR: Prof. Dr. Elírio Ernestino Toldo Jr.

COORIENTADOR: Prof. Dr. Rubens Cesar Lopes Figueira

Porto Alegre, 2020

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS**

**PROVENIÊNCIA, TAXA DE SEDIMENTAÇÃO E
PROPRIEDADES MAGNÉTICAS DOS SEDIMENTOS
HOLOCÊNICOS DA LAGOA DOS PATOS**

MICHEL DOEPPRE IVANOFF

ORIENTADOR: Prof. Dr. Elírio Ernestino Toldo Jr.

COORIENTADOR: Prof. Dr. Rubens Cesar Lopes Figueira

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Lauro Júlio Calliari - Instituto de Oceanografia, Fundação Universidade Federal do Rio Grande.

Prof. Dr. Nicolai Mirlean - Instituto de Oceanografia, Fundação Universidade Federal do Rio Grande.

Prof. Dr. Carlos Augusto França Schettini - Instituto de Oceanografia, Fundação Universidade Federal do Rio Grande.

Tese de Doutorado apresentada como
requisito parcial para a obtenção do
Título de Doutor em Ciências,
Geologia Marinha.

Porto Alegre, 2020

CIP - Catalogação na Publicação

Ivanoff, Michel Doeppre
PROVENIÊNCIA, TAXA DE SEDIMENTAÇÃO E PROPRIEDADES
MAGNÉTICAS DOS SEDIMENTOS HOLOCÊNICOS DA LAGOA DOS
PATOS / Michel Doeppre Ivanoff. -- 2020.
147 f.
Orientador: Elírio Ernestino Toldo Júnior.

Coorientador: Rubens Cesar Lopes Figueira.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio
Grande do Sul, Instituto de Geociências, Programa de
Pós-Graduação em Geociências, Porto Alegre, BR-RS,
2020.

1. Sedimentação lagunar. 2. taxa de sedimentação
210Pb. 3. proveniência sedimentar Sm-Nd. 4.
susceptibilidade magnética. 5. metais pesados. I.
Ernestino Toldo Júnior, Elírio, orient. II. Cesar
Lopes Figueira, Rubens, coorient. III. Título.

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer a todas as pessoas e instituições que colaboraram para o meu desenvolvimento pessoal e profissional das mais diversas formas, as quais foram fundamentais na elaboração e concretização desta tese, em especial:

Ao meu orientador, no curso de Graduação, Francisco Aquino que me incentivou a ingressar no Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica (CECO/UFRGS), onde tive o prazer de conhecer e trabalhar com o Grande Mestre Gilberto Silveira dos Santos (Giba), que me deu a oportunidade e o conhecimento necessário para trilhar meu caminho na Sedimentologia.

Agradecer a estrutura dos laboratórios e equipamentos do CECO (UFRGS), LGI (UFRGS), IPH (UFRGS) e IO (USP) que permitiram a viabilidade desta tese. Quero agradecer em especial a todos os pesquisadores, técnicos e alunos que ao longo de desses anos de esforços fizeram o CECO ser uma referência de pesquisas me oportunizando acesso à ciência.

Aos amigos do CECO que ajudaram em discussões valiosas especialmente Leonardo Lima (Thunder), Carla Andrade, Anderson Biancini, Júlio F. Oliveira, Inaiê Miranda, Eduardo Bortolin, Samanta Cristiano, Eduardo Martins, Luana Portz, Rogério Manzolli, Rafael Mastracusa, Ricardo Franchini, Fernando Scottá, Cristiane Bahi, Guilherme Martinez, Gabriela Rochett, José Nunes, Ricardo Baitelli, Ana Rita, Volney Bittencourt e Jairo F. Savian.

A meu coorientador, Prof. Rubens Cesar Lopes Figueira, por me receber na Universidade de São Paulo e proporcionar conhecimentos, conselhos e uso dos laboratórios. Também agradeço ao amigo Paulo Alves pelas ajudas no IO-USP. Gostaria também de dedicar um agradecimento aos meus revisores de Felipe Pereira, Rafael Escobar, Priscila Orozco e Derek Noble, que desde o mestrado se dedicaram a me ensinar um pouco sobre as linguagens.

Adicionalmente, dedico um agradecimento especial às revisoras da última etapa da tese, Adriane Brevia e a minha querida companheira e namorada Ravel Andrade, que cedeu seu espaço de estudos, melhorando minha concentração e escrita, além de ajudar nas edições das imagens me incentivando para prosseguir mesmo que o processo representasse um distanciamento por longas horas.

Por fim, quero agradecer a todos os mestres que tive dentro da UFRGS, mas em especial ao meu orientador, Elírio Ernestino Toldo Júnior, que sempre soube entender as dificuldades inerentes ao meu desafio de conciliar trabalho e estudos dando motivação nos momentos mais difíceis. Este trabalho não teria sido realizado sem a presença de um mestre e conselheiro tão competente.

RESUMO

A Lagoa dos Patos, localizada na Planície Costeira do Rio Grande do Sul, apresenta padrão climático com significativas oscilações interanuais na precipitação associado ao evento atmosférico-oceânico El Niño. Esse fator, combinado ao uso intensivo do solo e as diversas atividades econômicas regionais, afetam a qualidade e a quantidade dos sedimentos que depositam em seu interior. As taxas de sedimentação da Lagoa dos Patos, estimadas através dos métodos geocronológicos ^{210}Pb e ^{137}Cs em quatro testemunhos geológicos, ocorrem na ordem de 7 mm.a^{-1} , $5,5 \text{ mm.a}^{-1}$, $4,4 \text{ mm.a}^{-1}$ e $4,8 \text{ mm.a}^{-1}$ no sentido Norte-Sul. O Rio Guaíba é o principal condicionante na diferença de sedimentação interna, aumentando as taxas ao Norte da laguna. Além disso, o método Constant Rate of Supply (CRS) detectou variações interanuais significativas nas taxas de sedimentação em períodos de eventos climáticos El Niño, principalmente nos locais amostrados próximos às desembocaduras fluviais. Medições magnéticas demonstraram que os fragmentos líticos provenientes das rochas vulcânicas, com maior concentração de Fe e Ti, promovem aumento de susceptibilidade magnética nos sedimentos depositados no sistema Guaíba-Patos, sendo marcante o aumento de partículas magnéticas nas camadas superiores dos perfis amostrados a montante. Análises químicas no sedimento demonstraram enriquecimento de metais pesados, utilizados comumente em atividades industriais e agrícolas, os quais apresentaram forte correlação com a susceptibilidade magnética, possibilitando estabelecer um método *proxy* não destrutivo na estimativa de contaminação. Análises isotópicas de Sm-Nd possibilitaram aferir rastreabilidade dos sedimentos em intervalos de longo período, sendo constatado novamente um predomínio na sedimentação das drenagens da Bacia do Paraná ao norte da Lagoa dos Patos. Por outro lado, nos setores Centro e Sul ocorrem mudanças de rochas fontes ao longo da coluna sedimentar. Datações por ^{14}C revelaram correlações entre o período semiárido do Holoceno e a sedimentação nos setores Centro e Sul da Lagoa dos Patos, que por sua vez, apresentam influência significativa nas assinaturas isotópicas dos rios Camaquã e Jaguarão. Adicionalmente, a Plataforma Continental, adjacente a desembocadura lagunar, ocorre predomínio de assinaturas isotópicas das drenagens que escoam sobre as litologias do setor sul do Brasil, contrariando a tendência da Margem Continental Sul brasileira que prevalece sedimentação do Rio de la Plata.

Palavras-chave: Sedimentação lagunar, taxa de sedimentação, geocronologia ^{210}Pb , proveniência sedimentar, susceptibilidade magnética, metais pesados.

ABSTRACT

Patos Lagoon, located on the Coastal Plain from the State of Rio Grande do Sul, is characterized by a climate pattern with significant interannual rainfall fluctuations associated with the atmospheric-oceanic phenomenon El Niño. This factor, combined with the intensive soil use and several regional economic activities, affects the quality and quantity of sediments that deposit inside this system. The Patos Lagoon sedimentation rates, estimated by applying the ^{210}Pb and ^{137}Cs geochronological methods in four geological cores, were in the order of 7 mm y^{-1} , 5.5 mm y^{-1} , 4.4 mm y^{-1} , and 4.8 mm y^{-1} in the north-south direction. The Guaíba River is the main factor influencing the internal sedimentation and increasing sedimentation rates in the northern region of the lagoon. Furthermore, the Constant Rate of Supply (CRS) method detected significant interannual variations in the sedimentation rates during El Niño periods, mainly in the sampled locations close to river mouths. Magnetic measurements have shown that lithic fragments from volcanic rocks, which have a higher Fe and Ti concentration, induce an increase in the magnetic susceptibility of sediments deposited in the Guaíba-Patos system, demonstrated by an increase in the number of magnetic particles in the upper layers of the profiles sampled upstream. Chemical analyzes applied on the sediments showed an enrichment of heavy metals that are commonly used in industrial and agricultural activities, having a strong correlation with magnetic susceptibility. Thus, it makes it possible to establish a non-destructive proxy method for the estimation of contamination. Sm-Nd isotopic analyzes allowed the assessment of sediment traceability in long-term intervals, resulting once again in the predominance of sedimentation from the Paraná Basin rivers in the north of Patos Lagoon. On the other hand, in the central and southern regions of the lagoon, there were changes in the source rocks along the sedimentary column. ^{14}C dating revealed correlations between the semi-arid period of the Holocene and sedimentation in the central and southern areas of Patos Lagoon, showing a considerable influence on the isotopic signatures of the Camaquã and Jaguarão rivers. In addition, on the Continental Shelf adjacent to the lagoon mouth, isotopic signatures of river discharges that flow over lithologies from the Brazilian southern sector predominated, contradicting to a trend of the Brazilian South Continental Margin that predominates in the sedimentation of the Rio de la Plata.

Keywords: Lagoon sedimentation, sedimentation rate, ^{210}Pb geochronology, sedimentary source, magnetic susceptibility, heavy metals.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PCRS - Planície Costeira do Rio Grande do Sul

Sm-Nd - Elementos químicos Samário e Neodímio

T_{DM} - Idade de cristalização baseada no modelo do Manto Depletado

ϵ_{Nd} - Parâmetro Epsilon Neodímio

$t_{1/2}$ - Meia Vida

KeV - Quilo elétron-volt

CIC - Constant Initial Concentration

CRS - Constant Rate of Supply

ETR - Elementos Terras Raras

CHUR - Reservatório uniforme condrítico

M_s - Magnetização de saturação

SD - Monodomínio ou *single domain*

MD - Multidomínio ou *multidomain*

PSD - Pseudo-monodomínios ou *pseudo single domain*

χ_f - Susceptibilidade magnética em baixa frequência

χ_{fd} - Susceptibilidade magnética dependente da frequência

PLI - Índice de Carga de Poluição

TOC - Carbono Orgânico Total

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Figura 1. Mapa da área de estudos.....	17
Figura 2. Mapa Geológico do Rio Grande do Sul com destaque à Geomorfologia da Planície Costeira do RS.....	19
Figura 3. Isótopos do elemento C apresentando o mesmo número atômico ($Z=6$), mas números de massa diferentes ($A=12, 13$ ou 14), de acordo com o número de nêutrons.....	25
Figura 4. Decaimento radioativo e o conceito de meia-vida.....	25
Figura 5. Série de decaimento radioativo do $^{238}\text{U}_9$ para $^{206}\text{Pb}_{82}$	28
Figura 6. Gráfico ajustado da concentração de $^{210}\text{Pb}_{(\text{não suportado})}$ em função da profundidade do testemunho 6651 obtido na margem continental sudeste brasileira.....	29
Figura 7. Ciclo do ^{210}Pb na natureza.....	30
Figura 8. Variação temporal das taxas de sedimentação de dez testemunhos coletados em Ise Bay, Japão.....	35
Figura 9. Padrão de decaimento do ^{137}Cs	36
Figura 10. Concentrações de $^{210}\text{Pb}_{(\text{Não Suportado})}$ e ^{137}Cs à direita em um testemunho de sedimentos tomadas do Lago Kinneret, Israel.....	39
Figura 11. Variação da atividade do $^{210}\text{Pb}_{(\text{não-suportado})}$ com a profundidade no: (a) Largo de Santa Rita; (b) Rio Casqueiro e (c) Largo do Canéu.....	40
Figura 12. Variação da atividade do ^{137}Cs com a profundidade no: (a) Largo de Santa Rita; (b) Rio Casqueiro e (c) Largo do Canéu.....	41
Figura 13. Evolução da razão $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ para parâmetro CHUR e o Planeta Terra desde 4,6 Ga.....	44
Figura 14. Curva de evolução condrítica e de materiais derivados em T_1 por fusão parcial em função do ϵ_{Nd}	46
Figura 15. Curva de evolução planetária (CHUR) e manto empobrecido.....	47
Figura 16. Valores de ϵ_{Nd} obtidos por Grousset <i>et al.</i> (1988) em amostras de sedimentos recentes do Oceano Atlântico Norte.....	49
Figura 17. Modelos teóricos de magnetização para um determinado material em relação a um campo magnético aplicado.....	53
Figura 18. Tipos de estruturas, em função do tipo de acoplamento dos momentos magnéticos dos eletros.....	54

Figura 19. Estados micromagnéticos teóricos associados para um cubo de magnetita uniaxial com tamanhos diferentes.....	55
Figura 20. Amostragem e abertura dos testemunhos na Litoteca do CECO.....	58
Figura 21. Susceptômetro MFK1-A Kappabridge (AGICO), utilizado para as medidas de susceptibilidade magnética.....	60

CAPÍTULO 2

Figure 1. Map of the study area with the location of the drilling sites.....	66
Figure 2. ^{137}Cs activity in cores PT02 and PT04.....	71
Figure 3. ^{137}Cs activity in cores PT07 and PT08.....	72
Figure 4. Variation of the sedimentation rates from the last decades obtained from the application of the ^{210}Pb method (CRS model) on cores PT02 (near the Guaíba River mouth) and PT08 (near the mouths of the Camaquã River and São Gonçalo Channel)	74
Figure 5. Comparison between the sedimentation rates from the last decades obtained from the application of the ^{210}Pb method on cores PT02 and PT08, which were located near river mouths	75
Figure 6. a) Time series of the monthly precipitation in the city of Porto Alegre (South of Brazil) for the period between 1961 and 2011. b) Southern Oscillation Index (SOI) for the same period.....	76
Figure 7. Variation of the sedimentation rates from the last decades obtained from the application of the ^{210}Pb method on cores PT04 and PT07.....	78

CAPÍTULO 3

Figure 1. Map of the study area with the location of the drilling sites.....	87
Figure 2. Granulometric data of the Guaíba River core (G04) represented by the percentages of mud, total organic carbon (%TOC) and carbonates (%CaCO ₃).....	90
Figure 3. Granulometric data of the Patos Lagoon central region core (PT4) represented by the percentages of mud, total organic carbon (%TOC) and carbonates (%CaCO ₃).....	91
Figure 4. Granulometric data of the Patos Lagoon southern region core (PT7) represented by the percentages of mud, total organic carbon (%TOC) and carbonates (%CaCO ₃).....	92
Figure 5. Low-frequency magnetic susceptibility (χ_{lf}) related to cores G04 (Guaíba River), PT4 (Patos Lagoon central region), and PT7 (Patos Lagoon southern region).....	93

Figure 6. Frequency-dependent magnetic susceptibility (χ_{fd}) measured in cores G04 (Guaíba River), PT4 (Patos Lagoon central region), and PT7 (Patos Lagoon southern region)	94
Figure 7. Comparison among the vertical profiles of low-frequency magnetic susceptibility (χ_{lf}), Pollution Load Index (PLI), and concentrations of Fe and Ti from the Guaíba River core (G04).....	100
Figure 8. Comparison among the vertical profiles of low-frequency magnetic susceptibility (χ_{lf}), Pollution Load Index (PLI), and concentrations of Fe and Ti from the Patos Lagoon central region core (PT4).....	101
Figure 9. Comparison among the vertical profiles of low-frequency magnetic susceptibility (χ_{lf}), Pollution Load Index (PLI), and concentrations of Fe and Ti from the Patos Lagoon southern region core (PT7).....	103

CAPÍTULO 4

Figura 1. Mapa da área de estudos.....	116
Figura 2. Idades modelo TDM versus parâmetro $\epsilon_{Nd}(0)$ das amostras sedimentares extraídas na Lagoa dos Patos, na Praia do Cassino e nos rios que desembocam na Lagoa dos Patos com as prováveis áreas fontes.....	122
Figura 3. Simulação de correntes geradas após 5 dias pelo vento com direção Nordeste (A) e Sudoeste (B).....	125

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1

Tabela 1. Comparação entre as taxas de sedimentação de curto prazo em diversos ambientes deposicionais.....	34
Tabela 2. Exemplos de taxas de sedimentação obtidas pelo método 210Pb em ambientes lagunares.....	34

CAPÍTULO 2

Table 1. Sampling and gamma spectrometry data from cores PT2, PT4, PT7, and PT8 in Patos Lagoon.....	70
--	----

CAPÍTULO 3

Table 1. Location and depth of the drill cores extracted from the Guaíba River and Patos Lagoon.....	88
Table 2. Concentration of metals with respective maximum, minimum, and mean values for each analyzed core: G04 (Guaíba River), PT4 (Patos Lagoon central region), and PT7 (Patos Lagoon southern region)	94
Table 3. Pearson's correlation matrix among the low-frequency magnetic susceptibility (χ_{lf}); Pollution Load Index (PLI); percentages of mud, carbonates (%CaCO ₃) and total organic carbon (%TOC); and concentration of metals in the Guaíba River core (G04).....	97
Table 4. Pearson's correlation matrix among the low-frequency magnetic susceptibility (χ_{lf}); Pollution Load Index (PLI); percentages of mud, carbonates (%CaCO ₃) and total organic carbon (%TOC); and concentration of metals in the Patos Lagoon central region core (PT4).....	98
Table 5. Pearson's correlation matrix among the low-frequency magnetic susceptibility (χ_{lf}); Pollution Load Index (PLI); percentages of mud, carbonates (%CaCO ₃) and total organic carbon (%TOC); and concentration of metals in the Patos Lagoon southern region core (PT7).....	98

CAPÍTULO 4

Tabela 1. Dados isotópicos de Sm-Nd das amostras sedimentares extraídas dos rios Jacuí, Camaquã, Jaguarão e dos sedimentos extraídos da Lagoa dos Patos e Praia do Cassino. As idades TDM foram calculadas a partir do modelo de DePaolo (1981).....	120
Tabela 2. Síntese das assinaturas isotópicas referente as principais litologias, drenadas pelos rios que desembocam na Lagoa dos Patos (compilado da literatura).....	123

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO	15
2. ÁREA DE ESTUDO	17
3. HIPÓTESES	20
4. OBJETIVOS	22
4.1 Objetivos específicos	23
5. O ESTADO DA ARTE	23
5.1 Sistema de decaimento do ^{210}Pb	27
5.1.1 Idade modelo CIC	32
5.1.2 Idade modelo CRS	32
5.1.3 Aplicabilidade do método ^{210}Pb	33
5.2 Sistema de decaimento do ^{137}Cs	36
5.2.1 Aplicabilidade do método ^{137}Cs	38
5.3 Sistema isotópico Samário - Neodímio (Sm-Nd)	41
5.3.1 Idades modelo	46
5.3.2 Aplicabilidade do método Sm-Nd	48
5.4 Magnetismo Ambiental	51
5.4.1 Parâmetros magnéticos	52
5.4.2 Aplicabilidade do magnetismo ambiental	55
6. MATERIAIS E MÉTODOS.....	57

CAPÍTULO 2

7. ARTIGO CIENTÍFICO - Use of ^{210}Pb and ^{137}Cs in the assessment of recent sedimentation in Patos Lagoon, southern Brazil	61
--	----

CAPÍTULO 3

8. ARTIGO CIENTÍFICO - Magnetic parameters of holocenic sediments from Patos Lagoon and Guaíba River as indicators of heavy metal pollution	82
---	----

CAPÍTULO 4

9. ARTIGO CIENTÍFICO - Padrões isotópicos e proveniência sedimentar do sistema hidrográfico da Lagoa dos Patos através do método Sm-Nd.....	111
---	-----

CAPÍTULO 5

10. SÍNTESE INTEGRADORA.....	132
11. BIBLIOGRAFIA.....	136

ESTRUTURA DA TESE

Esta tese de doutorado está estruturada em cinco capítulos contendo introdução ao tema de estudo seguido de três artigos científicos e considerações finais.

O capítulo 1 aborda o *Estado da Arte* com uma introdução que contextualiza o leitor sobre os objetivos da pesquisa, as técnicas utilizadas e suas aplicabilidades, bem como a descrição da área de estudo.

O capítulo 2 contém o artigo científico denominado *Use of ^{210}Pb and ^{137}Cs in the assessment of recent sedimentation in Patos Lagoon, southern Brazil*, publicado no periódico *Geo-Marine Letters* (Qualis-CAPES A2).

O capítulo 3 é composto pelo artigo *Magnetic parameters of holocenic sediments from Patos Lagoon and Guaíba River as indicators of heavy metal pollution* submetido ao periódico *Marine Pollution Bulletin* (Qualis-CAPES A1).

O capítulo 4 é composto pelo artigo *Padrões isotópicos e proveniência sedimentar do sistema hidrográfico da Lagoa dos Patos através do método Sm-Nd*, submetido ao periódico *Pesquisas em Geociências* (Qualis-CAPES B2).

O quinto e último capítulo apresenta as considerações finais com o texto denominado *Síntese Integradora*, que integra a tese através dos resultados, interpretações e conclusões produzidos no âmbito dessa pesquisa.

Nas referências bibliográficas constam listados os trabalhos citados no capítulo 1 da tese. As referências utilizadas nos artigos (Capítulos 2, 3 e 4) encontram-se no final dos respectivos artigos.

Capítulo 1

(Introdução, Área de Estudo, Hipóteses, Estado da Arte, Objetivos e Métodos)

1. INTRODUÇÃO

A Planície Costeira do Rio Grande do Sul (PCRS) é composta por um conjunto de ambientes deposicionais recentes incluindo lagoas costeiras, as quais não apresentam conexão direta com o oceano, bem como lagunas, conectadas a ele permanentemente através de canais de ligação (*inlets*).

Em um contexto evolutivo, estes ambientes costeiros são extremamente dinâmicos, sendo eficientes armadilhas na acumulação de sedimentos e, eventualmente, evoluem para outros tipos de ambientes por meio do preenchimento sedimentar, da atividade tectônica ou mudanças eustáticas no nível do mar. A escala de tempo desta transição ambiental é geologicamente rápida, e pode-se esperar que, mantendo-se inalteradas as condições atuais, tais mudanças ocorram dentro de décadas ou séculos (Fairbridge, 1980).

Desta forma, o conhecimento efetivo sobre a dinâmica dos processos sedimentares como erosão, transporte e deposição, permite compreender a gênese de feições morfológicas e estruturas peculiares típicas destes corpos lagunares. A análise destes mecanismos, observados os distintos processos presentes, fornece subsídios para obtermos ferramentas essenciais ao estudo multidisciplinar, visando ao gerenciamento destes sistemas costeiros.

Uma preocupação fundamental aos estudos sedimentológicos recentes, realizados em lagoas costeiras, direciona-se no sentido de estimar a origem e a taxa de sedimentos erodidos e transportados para as bacias de deposição, ou mais objetivamente, a proveniência sedimentar, bem como o volume que efetivamente é depositado em seu interior, ou seja, a taxa de sedimentação.

Devido às características batimétricas, marcadas pela baixa profundidade, lagoas costeiras são locais altamente sensíveis às variações nas taxas de fornecimento sedimentar. Essas variações estão relacionadas, além das atividades antrópicas, à intensidade dos processos que controlam a disponibilidade de sedimentos, tais como os efeitos do clima, do relevo, da vegetação e a composição rochosa (Blatt *et al.*, 1972).

Os efeitos do clima integram informações relevantes em estudos referentes à produção de sedimentos em áreas costeiras e, em especial, nas regiões Temperadas nas quais se enquadram os ambientes lagunares da PCRS. Ainda que estas áreas possuam extensas coberturas vegetais, que possam inibir a produção sedimentar, em escala mundial apresentam taxas de erosão substanciais, na ordem

de 10 a 50 toneladas km² (Lisitzin, 1972). Porém, a produção de sedimentos é moderada, de 10 a 100 toneladas km⁻².a⁻¹ (Milliman & Meade, 1983). Isto, em parte, depende do grau de exposição do solo e do desgaste químico das rochas.

A orografia é um fator decisivo que intensifica o processo da produção sedimentar em uma relação linear com o aumento da altitude. Segundo Ruxton & McDougall (1967), as taxas de erosão variam entre 7 cm/1000 anos, para uma altitude de 60 metros; e 76 cm/1000 anos, para uma altitude de 762 metros. Logo, o contexto geológico no qual está inserida a PCRS favorece uma intensa produção sedimentar, devido ao efeito orográfico do planalto da Serra Geral com altitudes próximas aos 1000m e do Escudo Sul Rio-grandense com elevações médias de 500m, sendo estas as principais áreas fontes de sedimentos para os ambientes costeiros do Estado.

O intenso desenvolvimento das atividades humanas em áreas costeiras nas últimas décadas, com a ocupação dos espaços físicos pela urbanização, industrialização, agricultura bem como o aumento da atividade portuária, vêm gradativamente intensificando os impactos no ambiente, afetando a qualidade da água, a produtividade biogênica e as taxas de acumulações de sedimentos em ambientes lagunares (Ward & Ashley, 1989).

Elementos de alta toxicidade são empregados em diversos ramos econômicos, em especial nos insumos e defensivos agrícolas, em indústrias de metais, químicas e elétricas, e na própria medicina. Em nome das necessidades da sociedade e do consumo de bens presentes no cotidiano das cidades, não se pode simplesmente prescindir deles. A descarga descontrolada de efluentes e de diversos materiais, constituem sérios problemas nos grandes aglomerados humanos.

A descarga fluvial é a principal transportadora de contaminantes de origem antropogênica para as áreas costeiras, estabelecendo uma relação íntima nas variações geoquímicas no ambiente. Em ecossistemas aquáticos, o sedimento de fundo representa o principal compartimento de acumulação, reprocessamento e transferência dos elementos-traço. Esses elementos, potencialmente disponíveis para a biota, podem ser liberados pela atividade microbiana e mudanças nos vários fatores físico-químicos que afetam o meio, incluindo pH, salinidade e condições de óxido-redução (Förstner & Wittman, 1981).

De acordo com Lacerda *et al.* (1994), os metais podem atingir os ecossistemas aquáticos por fontes diversas como, por exemplo, do resultado do intemperismo de rochas constituintes da bacia hidrográfica, do escoamento

superficial de áreas agrícolas e urbanas, de águas subterrâneas contaminadas, da remobilização sedimentar, da disposição de material dragado e deposição atmosférica e de fontes pontuais como descargas de efluentes industriais e urbanos.

2. ÁREA DE ESTUDO

A Lagoa dos Patos, do ponto de vista geológico, é classificada como uma laguna, visto que este corpo costeiro apresenta um canal de comunicação com o Oceano Atlântico, na extremidade sul, sendo, portanto, caracterizada, conforme Kjerfve (1986), como um sistema de Lagoa Costeira do tipo “Estrangulada” (Fig. 1).

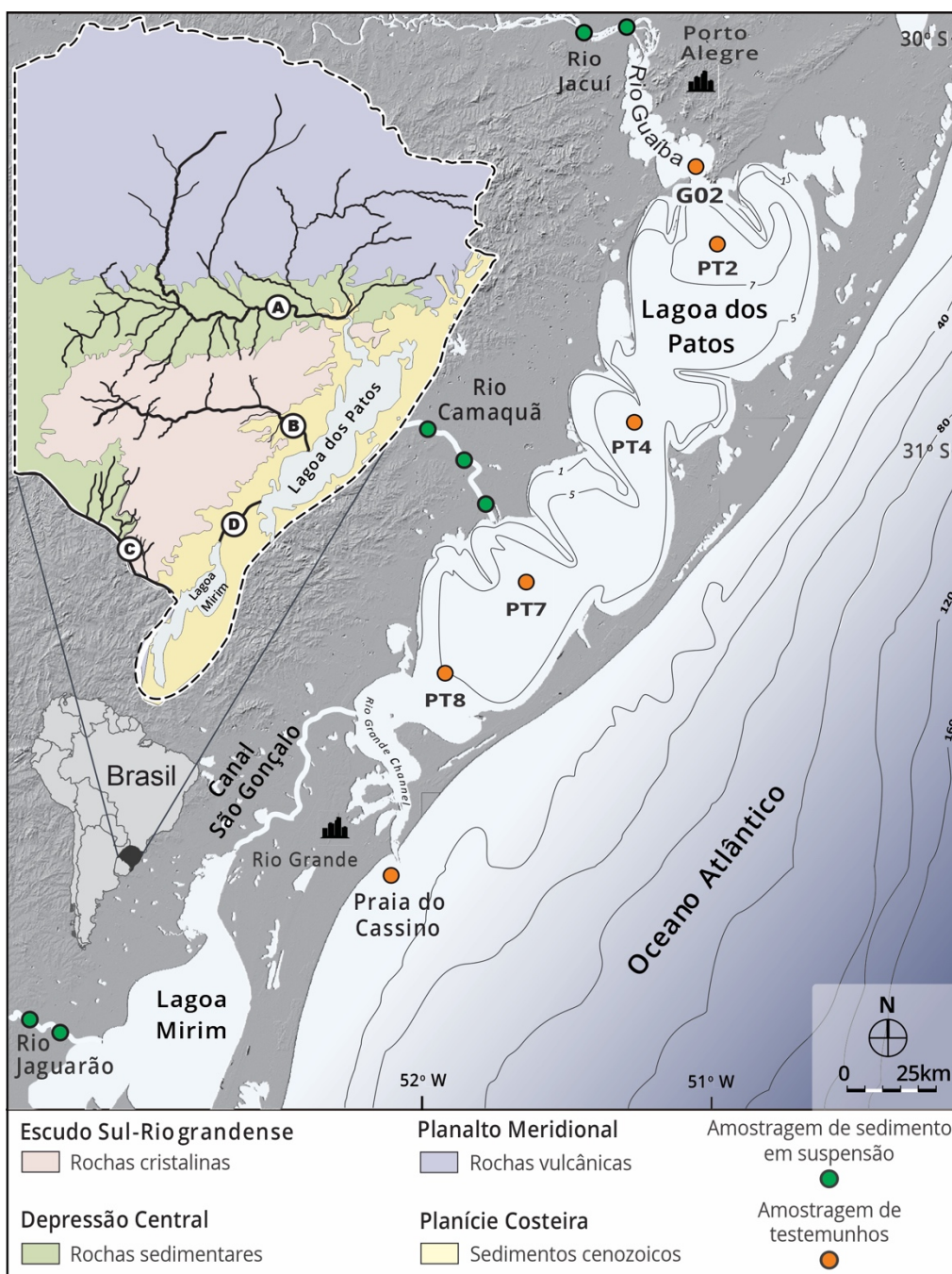


Figura 1 - Mapa da área de estudos com destaque para as amostragens de sedimentos de fundo da Lagoa dos Patos, Rio Guaíba, Praia do cassino e sedimentos em suspensão dos rios avaliados.

A laguna desenvolveu-se paralelamente à linha de costa, no sentido NE-SW, ocupando aproximadamente um terço de toda a planície costeira do Estado do Rio Grande do Sul. A Lagoa dos Patos possui uma largura média de 40 km, comprimento de 240 km, uma profundidade média de 6 m e uma área superficial de aproximadamente 10.000 km², sendo considerada o maior sistema lagunar da América do Sul e a maior laguna estrangulada do mundo (Kjerfve, 1986).

O clima da área de estudo, segundo a classificação de Koppen-Geiger apresentada por Strahler & Strahler (1987), é a do tipo Cfa, o qual caracteriza um clima temperado chuvoso, com chuvas distribuídas regularmente ao longo do ano e temperatura média do mês mais quente superior a 22° C e a do mês mais frio superior a -3° C. Segundo Hasenack & Ferraro (1989), o clima do litoral apresenta uma temperatura média anual de 20° C, taxa de precipitação e evaporação anual de 1322 e 1134 mm respectivamente e uma umidade média de 83%.

A costa do Rio Grande do Sul está submetida a um regime de micro-marés com amplitude de aproximadamente 0,25 m, controladas por fatores astronômicos; durante o inverno, no entanto, há significativa ocorrência de marés meteorológicas, associadas a tempestades, resultando em sobre-elevações do nível do mar de até 1,23 m (Toldo *et al.*, 2000). Os ventos predominantes vêm do quadrante NE (Schwarzbold & Schafer, 1984; Medeiros, 1992) e são constantes ao longo do ano, porém mais intensos na primavera-verão; no outono-inverno, são mais constantes os ventos de W e SW.

As características hidrográficas da Lagoa dos Patos são fortemente ligadas e dominadas pelos ciclos hidrológicos da bacia de drenagem, sendo 85% da contribuição hídrica derivada dos rios Guaíba, Camaquã e do Canal de São Gonçalo, que deságuam nas regiões norte, central e sul da Lagoa, respectivamente (Martins *et al.*, 1989).

A descarga de água doce varia consideravelmente entre verão/outono e inverno/primavera sendo de 6 a 5.300 m³. s⁻¹ da bacia de Camaquã e de 41 a 25.000 m³. s⁻¹ da bacia do Guaíba (Herz, 1977). Especialmente durante os anos sob influência do fenômeno El Niño, a descarga continental excede bastante os valores médios. Por outro lado, o fluxo de água através do Canal de São Gonçalo é controlado por barragens artificiais, para impedir a penetração de água salgada do estuário para a Lagoa Mirim e somente durante períodos de grande acumulação de água na Lagoa Mirim, estas barragens são abertas. Como consequência, a descarga de água doce na porção norte do sistema lagunar é variável (700 - 3.000

$m^3.s^{-1}$), sendo normalmente mais intensa durante o inverno e primavera (Herz, 1977).

A área de estudo está inserida na província costeira do Rio Grande do Sul, formada por dois grandes elementos geológicos a Bacia de Pelotas e o embasamento (Villwock, 1984). O embasamento é caracterizado pelo Escudo Rio-grandense, composto por formações rochosas cristalinas Pré-Cambrianas e por sequências sedimentares e vulcânicas Paleozoicas e Mesozoicas da Bacia do Paraná, sendo estas as principais áreas fontes de sedimentos para a Bacia de Pelotas, na qual está inserida a Lagoa dos Patos (Fig. 2).

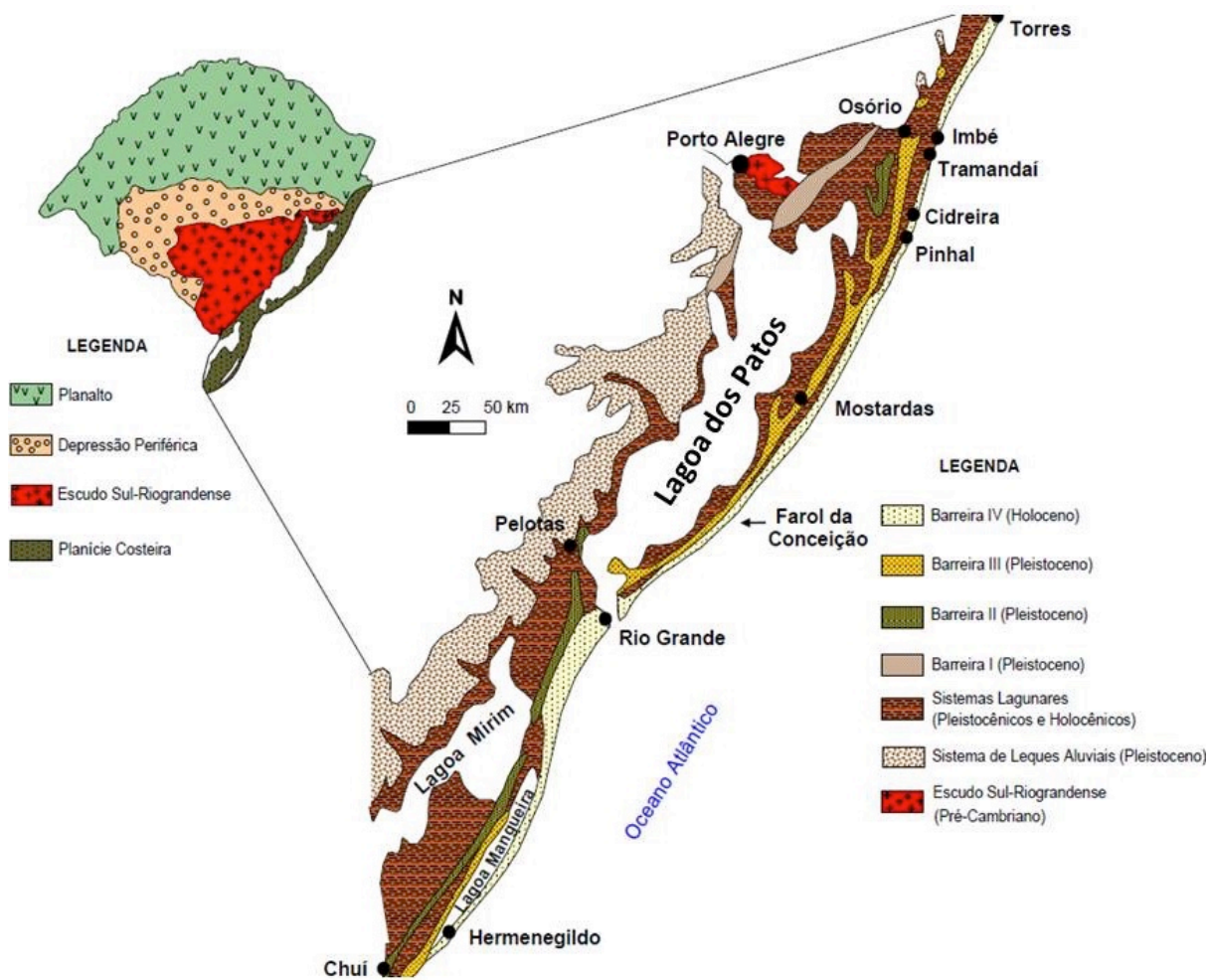


Figura 2 - Mapa Geológico do Rio Grande do Sul com destaque para o Mapa Geomorfológico da Planície Costeira do RS. Modificado de Tomazelli & Villwock (2000).

A evolução geomorfológica - influenciada pelas ondas costeiras de alta energia, em combinação com a deriva de sedimentos litorâneos e eventos de oscilação eustática do nível do mar - desenvolveu quatro sistemas deposicionais do tipo laguna-barreira, sendo os sistemas I, II e III mais antigos formados durante o Pleistoceno, enquanto o sistema IV teve sua formação durante o Holoceno (Villwock

et al., 1986). A Lagoa dos Patos é quase totalmente confinada dentro destas quatro sequências deposicionais, onde a extensa barreira que separa a laguna do oceano é constituída pelos sistemas laguna-barreira III e IV (Fig. 2).

A Lagoa dos Patos possui duas regiões morfológicas e sedimentológicas distintas: a primeira correspondente às margens arenosas e a segunda, a maior região, o fundo lamoso e plano da laguna. As isóbatas de 5 a 6 m separam estes dois setores. No lado oeste a margem arenosa tem geralmente inclinações de aproximadamente 1/1500. No setor leste a margem arenosa apresenta gradientes mais elevados, da ordem de 1/200. As margens arenosas constituem aproximadamente 40% de área da laguna (Toldo, 1994; 2006). Ainda segundo esses autores, tanto o piso lagunar como as margens são vulneráveis à ação das ondas, cujas alturas significativas podem atingir 1,6 m.

Estes sedimentos ao longo do lado oeste da laguna são pobremente selecionados com tamanhos entre areia fina e cascalho, enquanto na margem leste as areias apresentam tamanho predominantemente fino e são muito bem selecionadas (Martins *et al.*, 1989). Os sedimentos do piso lagunar possuem menos de 4% de areia e consistem, principalmente, de silte e silte argiloso na metade norte do piso da lagunar, enquanto a metade sul é caracterizada por uma argila siltosa, de cor predominantemente verde acinzentada. As lamias depositadas no piso lagunar são derivadas principalmente do Rio Guaíba, e a deposição destes sedimentos ocorre em profundidades abaixo do nível base de erosão por ação das ondas, o qual raramente excede a 4 m (Toldo, 1994).

3. HIPÓTESES

Diversos estudos têm se preocupado com a obtenção das taxas de sedimentação, utilizando-se de radionuclídeos em estimativas tanto de longo quanto de curto prazo (Evans *et al.*, 1981; Wilken, 1986; Cochran *et al.*, 1998; Lu & Matsumoto, 2005; Bellucci *et al.*, 2007; Ahn *et al.*, 2010; Lima *et al.*, 2011; Ruiz-Fernandez *et al.*, 2012), entre outros. Tais estudos sugerem que a ocupação do solo nas bacias hidrográficas contribuiu para o aumento da produção de sedimentos, sendo, portanto, o estudo desses depósitos um importante geoindicador ambiental que ajuda a mensurar a evolução destes ambientes.

Segundo os resultados da Pesquisa de Informações Ambientais de 2008, realizada pelo IBGE, o assoreamento de corpos de água é o terceiro impacto ambiental citado por mais de 50% dos municípios do país (IBGE, 2008). Além disso,

o conhecimento das taxas de sedimentação e erosão de bacias é de grande importância para a avaliação do efeito antropogênico em relação aos processos diagenéticos naturais (Robbins & Edgington, 1975) e também para fins de planejamento e gestão ambiental.

Ainda que esses estudos sejam de vital importância para o equilíbrio lagunar, não existem dados conclusivos que setorizem a deposição sedimentar na Lagoa dos Patos, em especial, monitorando em que áreas os processos deposicionais são mais intensos e quais motivos levam às alterações nas taxas de fornecimento, sejam elas naturais ou antrópicas.

Adicionalmente, estudos recentes vêm se preocupando com as anomalias de circulação atmosféricas globais associadas com os fenômenos El Niño e La Niña e o seu impacto no sul da América do Sul (região que compreende o Uruguai, nordeste da Argentina e sul do Brasil), conforme trabalhos publicados por (Diaz, Studzinsky e Mechoso, 1998; Grimm, Barros, e Doyle, 2000; Grimm, Ferraz, e Gomes, 1998; Grimm e Silva Dias, 1995; Pisciotano, Diaz, e Mechoso, 1994; Rao e Hada, 1990).

O monitoramento destes fenômenos climáticos também se torna importante para a compreensão da variação interanual de ciclo hidrológico, uma vez que as anomalias relacionadas com os eventos El Niño são consideradas a principal fonte de variabilidade de precipitação, particularmente na região sul do Brasil.

A consequência destas anomalias de precipitação é que, em uma escala de tempo mais longo, uma maior frequência de ocorrências El Niño pode estar relacionada com chuvas acima da média, e a consequente elevação dos níveis dos rios e da lagoa, com a entrada em maior quantidade de sedimentos; interferindo decisivamente nas taxas de sedimentação. Este monitoramento se torna importante para o conhecimento das variantes naturais das taxas de sedimentação, que associadas às variantes antrópicas, poderão intensificar processos de erosão e deposição.

Desta forma, o reconhecimento exato das áreas fontes dos sedimentos, através de técnicas de proveniência sedimentar, bem como a quantidade e a variação de sedimentos que depositam em ambientes lagunares, auxiliam a melhorar o conhecimento e planejamento da ocupação dos espaços costeiros. A proveniência sedimentar e as variações recentes de fornecimento tornam-se ferramentas úteis no controle da erosão, permitindo monitorar quais áreas sofrem maior impacto devido à ocupação das bacias de drenagem, bem como possibilitam

planejar de forma mais racional o uso do solo, evitando o assoreamento destes ambientes.

Os resultados destas alterações se refletem na redução dos índices de qualidade da água e no aumento das atividades de dragagens comprometendo o equilíbrio natural dos ambientes costeiros. Baseado nestas inter-relações, considerando o ambiente deposicional da Lagoa dos Patos, em termos futuros, seriam o progressivo aumento das atividades humanas e as variações climáticas de curto período suficientes para alterar a sedimentação do piso lacustre? Quais unidades litológicas contribuem para sua sedimentação? Estes sedimentos carregados estão sujeitos a contaminação antropogênica?

Neste sentido, as respostas para estas hipóteses levantadas tornam-se conclusivas ao se estabelecer pesquisas que estimem as taxas de sedimentação, a proveniência sedimentar e medidas auxiliares na estimativa da poluição nos sedimentos depositados na Lagoa dos Patos.

4. OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo a obtenção das taxas de sedimentação recente da Lagoa dos Patos e estimar as variações dos níveis de emissão relacionadas ao radionuclídeo ^{210}Pb e ^{137}Cs ao longo da coluna sedimentar. Logo, pretende-se identificar as variações interanuais nas taxas de sedimentação e correlacionar com alterações climáticas de curto período.

Pretende-se aprimorar o conhecimento sobre as modificações ambientais recentes, vinculadas às alterações antrópicas nas bacias de drenagem, relacionando com a proveniência dos sedimentos. Serão incluídas análises isotópicas através dos elementos Samário e Neodímio (Sm-Nd), verificando as contribuições atuais, bem como as variações espaço-temporais das áreas fontes ao longo da coluna sedimentar, com o objetivo de identificar possíveis oscilações do aporte e áreas fontes de sedimentos em períodos de longo e curto prazo.

Para atingir este objetivo, será comparada a assinatura isotópica medida pelo método Sm-Nd dos sedimentos extraídos de testemunhos coletados no piso lagunar com a assinatura do material em suspensão coletado nos rios que desembocam na Lagoa dos Patos. Além disso, serão comparados estes valores como a assinatura isotópica das unidades litológicas de onde provêm estas drenagens com o intuito de traçar a proveniência dos sedimentos que depositaram no interior lagunar.

Adicionalmente, este trabalho pretende determinar a susceptibilidade magnética dos sedimentos coletados em testemunhos, com vistas a avaliar os parâmetros do magnetismo ambiental. Adicionalmente será realizado a quantificação do aporte de metais no sedimento depositado na Lagoa dos Patos e assim fazer um diagnóstico das condições ambientais recentes com vistas ao monitoramento das potenciais atividades que impactam a qualidade ambiental.

4.1. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos dessa tese, inseridos no contexto de seu objetivo principal são:

- Estimar as taxas de sedimentação recente com a utilização dos radioisótopos ^{210}Pb e ^{137}Cs , além de identificar as variações interanuais no aporte sedimentar nas últimas décadas;
- Relacionar as taxas de sedimentação com o evento climático El Niño e assim compreender como esta variação climática natural afeta a sedimentação na Lagoa dos Patos;
- Identificar as rochas fontes de sedimentos, tendo como base a utilização dos elementos Sm-Nd no conhecimento da proveniência sedimentar, comparando as idades T_{DM} e o fator ϵ_{Nd} dos sedimentos coletados na Lagoa dos Patos com as drenagens e rochas fontes associadas;
- Determinar a susceptibilidade magnética em duas diferentes frequências de operação (976 Hz e 15616Hz);
- Correlacionar a variação de susceptibilidade magnética com a granulometria, matéria orgânica, carbonato biodetrítico e metais presentes nos sedimentos. Desta forma, pretende-se determinar a influência antropogênica e natural nas propriedades magnéticas dos sedimentos depositados na Lagoa dos Patos.

5. O ESTADO DA ARTE

A precisão no estabelecimento de idades em rochas e sedimentos, através dos avanços da geologia isotópica, oferece elementos e fontes de informações valiosas que servem de ferramentas indispensáveis na investigação de processos geológicos, hidrológicos, atmosféricos, paleoclimáticos, entre outros.

A compreensão da dinâmica e da gênese do planeta, bem como a construção e a calibração do Tempo Geológico, cria a necessidade de dizer quando exatamente

um evento ocorre, tornando-se hoje tão importante quanto dizer onde e como o mesmo aconteceu.

Devido ao desenvolvimento de diversos métodos, com maior capacidade analítica de obtenção das razões entre isótopos radioativos e radiogênicos, obtêm-se idades cada vez mais precisas e acuradas. O desenvolvimento das técnicas analíticas baseadas no decaimento de isótopos se deu a partir do reconhecimento do fenômeno natural do decaimento radioativo, descoberto por Antoine Henri Becquerel (Faure & Mensing, 2005).

Em 1897, o britânico Joseph John Thomson descobriu o elétron. No ano seguinte, Marie Curie isolou o rádio e inventou o termo radioatividade. Em 1903, o alemão Philipp Lenard descreveu o átomo com duas cargas: positivas e negativas, separadas pelo vazio. O neozelandês, Ernest Rutherford, descobre em 1906 os núcleos atômicos e as transmutações: na radioatividade, o átomo de um elemento perde corpúsculos para tornar-se átomo de outro elemento.

A partir de então, o cálculo da idade de materiais de cunho geológico tem tido forte desenvolvimento através do uso da geocronologia, sendo esta baseada no decaimento de elementos radioativos. Os elementos químicos, por sua vez, são formados por átomos, os quais possuem núcleos compostos por prótons (p) e nêutrons (n) que somados determinam a massa atômica (A) dos mesmos.

Desta forma, serão considerados isótopos os elementos que apresentam o mesmo número de prótons, porém diferentes números de massa, devido às diferenças entre o número de nêutrons presentes em seus núcleos (Fig. 3).

O decaimento radioativo é uma reação espontânea que ocorre no núcleo do átomo instável (elemento pai ou radioativo), que se transforma em outro átomo estável (elemento filho ou radiogênico). Durante o decaimento radioativo, cada elemento-pai leva um determinado tempo para se transformar em elemento-filho, sendo denominado este tempo de constante de desintegração, que, por sua vez, não é afetada por mudanças físicas ou químicas ocorridas no ambiente. O tempo necessário para que metade dos elementos pais transforme-se em elementos-filhos é chamado de meia-vida (Fig. 4).

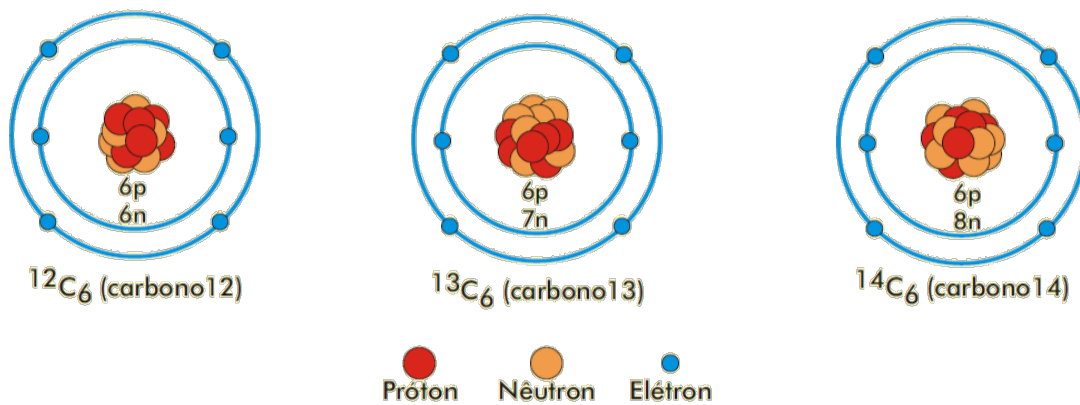


Figura 3 – Isótopos do C; todos têm o mesmo número atômico ($Z=6$), que é igual ao número de prótons no núcleo, mas números de massa diferentes ($A=12, 13$ ou 14), de acordo com o número de nêutrons (6, 7 ou 8) presentes no núcleo, extraído de Teixeira *et al.* (2000).

A radioatividade é a emissão de energia e/ou partículas do núcleo do átomo, devido à instabilidade do mesmo. Segundo Santos *et al.* (2008), os elementos radioativos, presentes no meio ambiente podem ser originados pelos raios cósmicos (^7Be e ^{14}C); elementos produzidos artificialmente através de detonações atômicas (^{137}Cs e ^{90}Sr); isótopos primordiais (^{238}U e ^{40}K) e produtos do decaimento natural a partir dos isótopos primordiais (^{226}Ra , ^{222}Rn , ^{210}Pb).

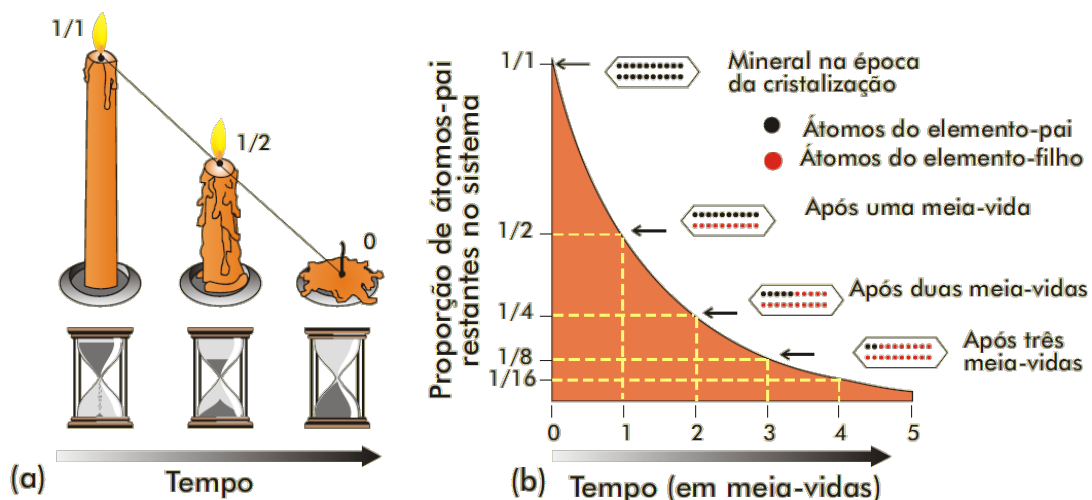
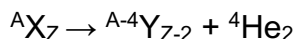


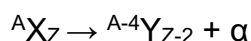
Figura 4 - Decaimento radioativo e o conceito de meia-vida, extraído de Teixeira *et al.* (2000).

Segundo White (2005), normalmente em um nuclídeo instável a tendência em atingir um equilíbrio energético faz com que partículas ou energia sejam emitidas do núcleo atômico. Estes núcleos instáveis possuem diferentes tipos de emissão: no caso de elementos com número atômico ($Z > 52$), geralmente ocorre emissão de partícula α (alfa); porém, partículas β (beta) e radiação γ (gama) são emitidas por quase todos os isótopos.

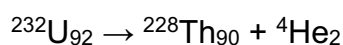
No decaimento alfa (α), o núcleo pai emite uma partícula α , ou seja, um núcleo de hélio 4, composto de dois prótons e dois nêutrons. Assim, quando um núcleo emite uma dessas partículas, seu número atômico diminui em duas unidades e o seu número de massa (A) diminui de quatro unidades, conforme o exemplo:



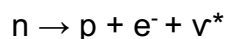
ou,



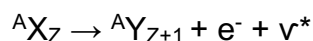
Como exemplo, pode-se citar o decaimento do núcleo de urânio 232:



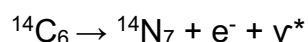
O decaimento beta (β) ocorre quando o número de nêutrons (n) é grande comparado ao número de prótons (p), o núcleo correspondente pode ser instável e o número de nêutrons pode ser diminuído pela transformação de um nêutron num próton (Faure & Mensing, 2005). Essa transformação é acompanhada da emissão de um elétron (e^-) e de um antineutrino (ν^*), sendo também denominado de decaimento β^- , segundo o modelo:



O núcleo filho tem o mesmo número de massa que o núcleo pai, mas um número atômico com uma unidade a mais:

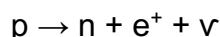


Como exemplo, pode-se citar o decaimento do núcleo de carbono 14:

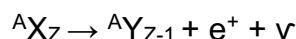


Quando o número de prótons é relativamente grande comparado ao número de nêutrons, o núcleo correspondente pode ser instável, e o número de prótons pode ser diminuído pela transformação de um próton em um nêutron (Dickin, 1995). Essa transformação é acompanhada da emissão de um pósitron (e^+), uma partícula

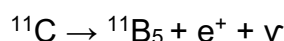
idêntica ao elétron, exceto pela carga, que é positiva além de um neutrino (ν), sendo denominado de decaimento β^+ , em que:



O núcleo filho tem o mesmo número de massa que o núcleo pai, mas um número atômico com uma unidade a menos:



Como exemplo, pode-se citar o decaimento do núcleo de carbono 11:



O decaimento gama (γ) é a emissão de radiação eletromagnética com frequências muito elevadas na porção do espectro eletromagnético, causada por um rearranjo dos prótons em um núcleo. Isso pode ocorrer, por exemplo, quando um núcleo sofre decaimento α ou β , deixando o núcleo filho em um estado excitado. Este, então, ao passar ao estado fundamental, emite radiação γ (Faure & Mensing, 2005).

4.1 SISTEMA DE DECAIMENTO DO ${}^{210}\text{Pb}$

O elemento ${}^{210}\text{Pb}$ é um radioisótopo utilizado como um dos métodos mais promissores na estimativa de taxa de sedimentação de curto período, possuindo meia-vida de 22,3 anos (Goldberg, 1963; Oldfield & Appleby, 1984). É um elemento intermediário da série de decaimento radioativo do ${}^{238}\text{U}$, um radionuclídeo que forma elementos radioativos naturais presentes no ambiente em quantidades traços, e, que após sucessivos decaimentos, atingem o elemento estável ${}^{206}\text{Pb}$ (Fig. 5).

O primeiro trabalho utilizando o ${}^{210}\text{Pb}$ como traçador de deposição de sedimentos foi realizado por Goldberg (1963), que correlacionou o ${}^{210}\text{Pb}$ com taxa de sedimentação, utilizando para tanto a medição da emissão de partículas beta. Este autor se baseou em trabalhos anteriores que descreviam o comportamento de alguns radionuclídeos naturais em água (Koide & Goldberg, 1961; Koczy, 1958), em sedimentos (Goldberg & Koide, 1962) e também na meia-vida do ${}^{210}\text{Pb}$ (Eckelman *et al.*, 1960).

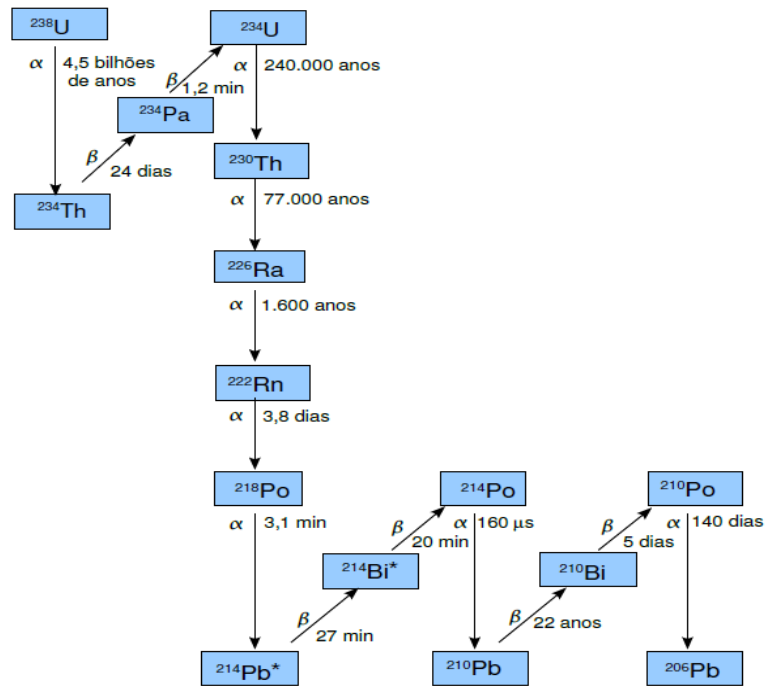


Figura 5 - Série de decaimento radioativo do Urânio 238 ($^{238}\text{U}_{92}$) para Chumbo 206 ($^{206}\text{Pb}_{82}$). Neste processo, a emissão de partículas alfa e partículas beta transforma o Urânio 238 (radioativo) em Chumbo 206 (radiogênico), um elemento estável. Modificado de Teixeira *et al.* (2000).

A conclusão deste trabalho pioneiro foi que este elemento é um excelente marcador de taxas de sedimentação para sedimentos com idades inferiores a 250 anos, com maior aplicabilidade para sedimentos com idades entre 5 e 100 anos.

Em seguida, o método foi aplicado a sedimentos lacustres por Krishnaswamy *et al.* (1971); e, subsequentemente, introduzido para sedimentos marinhos por Koide *et al.* (1972). Desde então, o uso do ^{210}Pb tem sido amplamente utilizado na estimativa da taxa de sedimentação de ambientes marinhos recentes, por exemplo, Huh e Su (1999); Lesueur *et al.* (2001); Alperin *et al.* (2002); Oguri *et al.* (2003); Owen & Lee (2004); e em sedimentos lacustres Koide *et al.* (1972, 1973); Robbins & Edgington (1975); Ahn *et al.* (2010) e Kirchner (2011), entre outros.

A presença de ^{210}Pb na atmosfera deve-se ao elemento intermediário da série de decaimento do ^{238}U , o ^{226}Ra ($T_{1/2} = 1622$ anos), que, presente na crosta terrestre, decai para o elemento ^{222}Rn ($T_{1/2} = 3,8$ dias) (Fig. 5). Por ser um gás, o ^{222}Rn passa a ser liberado do solo e se difunde na atmosfera, onde decai via uma série de elementos filhos de meias-vidas curtas para ^{210}Pb a uma taxa média de 42 átomos.min.cm⁻² (Eakins & Morrison, 1978).

O ^{210}Pb presente na atmosfera é então transferido diretamente através da precipitação atmosférica para lagos e reservatórios ou indiretamente pelo escoamento superficial das bacias hidrográficas, em um intervalo de tempo de

residência de 9,6 dias a algumas semanas (Eakins & Morrison, 1978; Ivanovich & Harmon, 1992).

Deste modo, quando entra em um lago ou oceano, acaba se depositando no fundo, e posteriormente, passa a ser incorporado à coluna sedimentar por processos de trocas químicas na interface sedimento/água. Seguindo o ciclo natural de decaimento, o radioisótopo ^{210}Pb ($t_{1/2} = 22,3$ anos), decai via emissão de partículas beta ($E_{\beta} = 17$ keV) e raios gama ($E_{\gamma} = 47$ keV) para ^{210}Bi ($t_{1/2} = 5,01$ dias, $E_{\beta} = 1,16$ MeV), que origina o ^{210}Po ($t_{1/2} = 138,4$ dias, $E_{\alpha} = 5,31$ MeV) e finalmente gera o elemento estável ^{206}Pb .

Em muitos ambientes, o elemento ^{210}Pb está presente em excesso em relação ao seu precursor o ^{226}Ra . Tal fato deve-se ao ciclo natural de emissão do ^{222}Rn pelo solo e pelas rochas e ao posterior decaimento para ^{210}Pb , que, quando absorvido pelos aerossóis, retorna ao ambiente terrestre e aquático por deposição atmosférica. Esta fonte de entrada de ^{210}Pb no sedimento, está, portanto, em excesso com relação ao ^{226}Ra , sendo denominado ^{210}Pb não-suportado, e sua concentração diminui com a profundidade nos depósitos sedimentares, devido ao seu decaimento radioativo conforme ilustrado na figura 6.

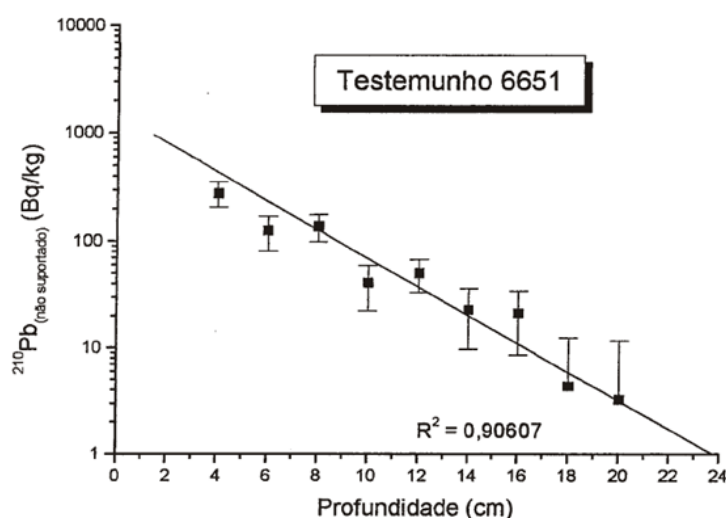


Figura 6 - Gráfico ajustado da concentração de $^{210}\text{Pb}_{\text{(não suportado)}}$ em função da profundidade do testemunho 6651 obtido na margem continental sudeste brasileira, extraído de Tessler (2001).

O ^{210}Pb formado no sedimento pelo decaimento natural do ^{226}Ra , ou seja, sem passar pela fase atmosférica, está em equilíbrio radioativo com o mesmo e é denominado ^{210}Pb suportado (em equilíbrio). Portanto, dentro de um depósito sedimentar é possível identificar o ^{210}Pb oriundo da deposição externa (*fallout* atmosférico), ou seja, o $^{210}\text{Pb}_{\text{(não suportado)}}$ e o formado *in situ*, o $^{210}\text{Pb}_{\text{(suportado)}}$, sendo

que a relação entre estes elementos fornece a base para a determinação da taxa de sedimentação. O ciclo do ^{210}Pb é descrito na figura 7.

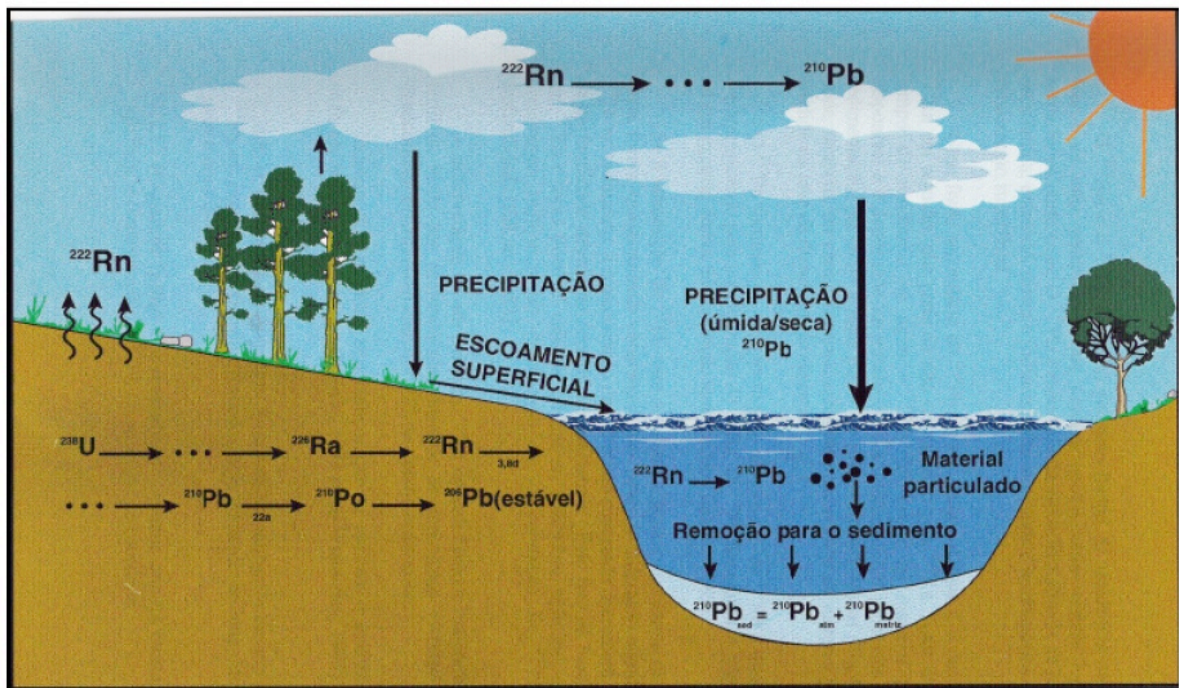


Figura 7 - Ciclo do ^{210}Pb na natureza, modificado de Mozeto (2004).

A taxa de sedimentação é, portanto, calculada por meio da detecção da atividade de $^{210}\text{Pb}_{(\text{n\~{a}o suportado})}$ em função da profundidade do sedimento. Este método requer um detector que seja sensível a raios gama de baixa energia e que também possua baixa radiação de fundo, além de alta eficiência de detecção e contagem.

Além disso, a análise necessita de um estudo detalhado para corrigir a atenuação da radiação por auto absorção, o que deve ser feito para cada matriz estudada. Auto absorção é a porcentagem da emissão radioativa que é absorvida dentro da própria amostra, o que ocorre especialmente nos radionuclídeos com energias mais baixas.

Para esta correção é utilizada uma fonte pontual de ^{241}Am . Neste caso, cada amostra é detectada por 300s, com a fonte sobre o recipiente, e 300s sem a fonte de ^{241}Am . O fator de auto absorção para cada amostra é determinado segundo a equação (1):

$$F = \frac{\ln A/N}{A/N-1} \quad (1)$$

em que:

F = fator de auto absorção;

A = número de contagens do ^{241}Am , com a amostra (cps – contagem por segundo);

N = número de contagens do ^{241}Am , sem a amostra (cps).

Assim, a atividade de $^{210}\text{Pb}_{(\text{não suportado})}$, por espectrometria gama, é determinada segundo seu fotopico de 46,5 keV, utilizando a equação (2):

$$A = \frac{(C \cdot F) - Br}{t \cdot m \cdot p_{\gamma} \cdot \varepsilon_{Pb-210}} \quad (2)$$

Em que A é a atividade do ^{210}Pb na amostra ($\text{Bq} \cdot \text{Kg}^{-1}$), C é o número de contagens do ^{210}Pb na amostra, F é o fator de auto absorção, Br é o número de contagens da radiação de fundo na região do ^{210}Pb (46,5 KeV), t é o tempo de contagens da amostra em segundos, m é a massa da amostra em quilogramas, p_{γ} é a probabilidade de emissão da radiação gama proveniente do ^{210}Pb igual a 0,0418 e ε_{Pb-210} é a eficiência do detector para ^{210}Pb igual a (12,7 + 3,8) %.

A determinação do $^{210}\text{Pb}_{(\text{suportado})}$ é complexa devido à baixa intensidade de emissão dos raios gamas (186 KeV), que é de cerca de 4%, e também à interferência do pico do ^{235}U (185,7 KeV). Desta forma, a determinação do $^{210}\text{Pb}_{(\text{suportado})}$ se faz por meio da detecção do seu precursor na série de decaimento, ou seja, o ^{226}Ra .

Sendo assim, para analisar o ^{226}Ra via espectrometria gama pode-se utilizar o elemento ^{214}Bi , com pico de 609 keV. Para tanto, é necessário que seja estabelecido o equilíbrio radiativo entre o ^{222}Rn , intermediário na cadeia, e o ^{226}Ra . Deste modo, após o fechamento dos recipientes das amostras e envolvimento com plástico filme, as amostras aguardam pelo menos 20 dias após a preparação, para que pelo menos 80% do equilíbrio seja atingido (Canet & Jacquemin, 1990).

Por fim, a atividade de ^{214}Bi , por espectrometria gama, é determinada segundo a equação (3):

$$A_{Ra-226} = \frac{C_{Bi-214} - Br}{t \cdot m \cdot p_{\gamma} \cdot \varepsilon_{Bi-214}} \quad (3)$$

Na qual A_{Ra-226} é a atividade do ^{226}Ra na amostra ($\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$), C_{Bi-214} é o número de contagens do ^{214}Bi na amostra, Br é o número de contagens da radiação de fundo na região do ^{214}Bi (609 keV), t é o tempo de contagem da amostra (em segundos), m é a massa da amostra (em quilogramas), p_{γ} é a probabilidade de

emissão da radiação gama proveniente do ^{214}Bi igual a 0,412 e $\epsilon_{\text{Bi-214}}$ é a eficiência do detector para o ^{214}Bi igual a $(4,0 \pm 0,8)\%$.

4.1.1 Idade Modelo CIC (Constant Initial Concentration)

Este modelo desenvolvido por Appleby & Oldfield (1978), é aplicado em ambientes onde as informações disponíveis sugerem um fluxo constante de $^{210}\text{Pb}_{(\text{n\~{a}o suportado})}$ para o sedimento e uma taxa de sedimentação também constante com o tempo, gerando perfis que apresentam uma diminuição exponencial da atividade em função da profundidade da coluna sedimentar (Robbins, 1978).

O modelo necessita ainda de correções para o efeito de compactação, sendo que, dependendo da porosidade e do conteúdo orgânico dos sedimentos, esta pode ser de grande importância, normalmente contribuindo para aumentar as taxas de sedimentação inicialmente observadas.

A compactação se deve ao fato de que os espaços porosos são continuamente modificados durante tempos geológicos, tanto em seus tamanhos como em suas formas, pela pressão devida ao soterramento por sedimentos mais novos e por processos diagenéticos.

O cálculo da taxa de sedimentação utilizada é obtido conforme a equação (4):

$$S = \frac{-\lambda \cdot D}{\ln \frac{C_0}{C}} \quad (4)$$

Em que S é a taxa de sedimentação em $\text{cm}\cdot\text{ano}^{-1}$, λ é a constante de decaimento radioativo do ^{210}Pb igual a $0,31076 \text{ ano}^{-1}$, D é a distância entre o topo e o estrato, medido em centímetros, C_0 $_{\text{Pb-210}}$ é a contagem do $^{210}\text{Pb}_{(\text{n\~{a}o suportado})}$ no topo do testemunho, C é a contagem do $^{210}\text{Pb}_{(\text{n\~{a}o suportado})}$ na base do testemunho.

4.1.2 Modelo CRS (Constant Rate of Supply)

Este modelo foi desenvolvido inicialmente por Goldberg (1963). Em aplicações mais recentes, Robbins (1978) criou o termo Modelo de Fluxo Constante (CF) enquanto Appleby & Oldfield (1978) o designaram como Modelo de Taxa Constante de Fornecimento (CRS).

O Modelo de Fluxo Constante é aplicado quando a taxa de sedimentação é variável com o tempo e o fluxo de ^{210}Pb para os sedimentos remanescentes é constante (Robbins, 1978). O excesso de ^{210}Pb a uma profundidade x de um perfil

se igualará ao fluxo (constante) integrado durante o correspondente intervalo de tempo.

O cálculo da determinação da taxa de sedimentação neste método é expresso pela equação (5):

$$t = \frac{1}{\lambda} \cdot \log \left(\frac{A^\circ}{Ax} \right) \quad (5)$$

em que:

λ = decaimento constante do ^{210}Pb ,

A° = atividade total do $^{210}\text{Pb}_{(\text{suportado})}$ e

Ax = atividade do $^{210}\text{Pb}_{(\text{suportado})}$ em uma camada de sedimentos situada a uma profundidade x .

4.1.3 Aplicabilidade do Método ^{210}Pb

O método de obtenção de taxas de sedimentação por radionuclídeos naturais e/ou artificiais é considerado muito bem desenvolvido, inequívoco em situações de aporte de sedimentos e de fluxo de isótopos constantes e sem processos de misturas de camadas sedimentares.

A utilização deste radionuclídeo demonstra que a ordem de grandeza das taxas de sedimentação, nas baías e plataformas em todo o mundo, é na ordem de milímetros/ano; e no talude e bacia oceânica, esta ordem de grandeza cai para décimos a centésimos de milímetros por ano.

Porém, áreas com significativo aporte continental como o delta do Mississipi (Oktay *et al.*, 2000 e Allinson *et al.*, 2000) e a foz do rio Yangtzé (Chung & Chang, 1995), apresentam uma ordem de centímetros/ano, sendo consideradas extremamente altas. Uma síntese dos resultados das taxas de sedimentação obtidas com a utilização do ^{210}Pb , em diversos ambientes sedimentares, pode ser observada na tabela 1.

Nichols (1989), apresentou resultados referentes a taxa de sedimentação em 22 lagoas costeiras na costa leste dos EUA e Golfo do México. Os resultados mostram valores entre os extremos de 0.3 mm.a^{-1} em Chincoteague para 110 mm.a^{-1} em depósitos deltaicos de Atchafalaya. Taxas de sedimentação relativamente altas ($> 5,6 \text{ mm.a}^{-1}$) são típicas de lagoas com setores de ativa sedimentação deltaica, como Apalachicola, Mobile e Leste Matagorda.

Tabela 1. Comparação entre as taxas de sedimentação de curto prazo em diversos ambientes deposicionais. (*média).

Ambiente de Sedimentação	Taxa de Sedimentação (mm.a ⁻¹)	Referência
Deltas	10 - 450	Olsen, 1978
Fiordes	1 – 1000 (*10)	Syvitski <i>et al.</i> , 1987
Lagos	2,6 - 14	Olsen, 1978
Rios Estuarinos (Costa Atlântica EUA)	1,7 - 3,9 (*2,6)	Nichols, 1986
Mares interiores	0,1 – 0,7	Olsen, 1978
Planícies de Marés (Costa Leste e Golfo do México EUA)	1,4 – 14 (*5,6)	Stevenson <i>et al.</i> , 1986
Lagunas (Costa Atlântica e Golfo do México EUA)	1,0 - 6,0 (*3,1)	Nichols, 1989

Os valores encontrados para a maioria das lagoas (70%) variam dentro de limites de 0,7 a 5,0 mm.a⁻¹ e taxa média de 3,4 mm.a⁻¹. Resultados semelhantes podem ser verificados em outros locais do mundo onde o mesmo método geocronológico foi aplicado (Tab. 2).

Tabela 2. Exemplos de taxas de sedimentação obtidas pelo método ²¹⁰Pb em ambientes lagunares (*média).

Localização	Taxa de sedimentação (mm.a ⁻¹)	Zona Climática	Referência
Laguna Berre, França	5,5 - 7,5	Temperada	Robert <i>et al.</i> , 2006
Laguna de Veneza, Itália	1,4 - 1,8	Temperada	Cochran <i>et al.</i> , 1998
Laguna Thau Basin, França	1,6 - 2,1	Temperada	Monna <i>et al.</i> , 1996
Laguna Great Sound, EUA	1,8 - 5,4	Temperada	Carson <i>et al.</i> , 1998
Laguna Rhode Island, EUA	0,06 - 2,1	Temperada	Boothroyd <i>et al.</i> , 1985
Laguna Rehoboth, EUA	2,6 - 3,0	Temperada	Beasley, 1987
Laguna Apalachicola, Eua	6*	Temperada	Donoghue, 1987
Laguna Mobile, Eua	5,6*	Temperada	Ryan e Goodell, 1972
Laguna Point Judit, Eua	3,7 - 5,0	Temperada	Boothroyd <i>et al.</i> , 1985
Laguna Wachapreague, Eua	3,1*	Temperada	Oertel, <i>et al.</i> , 1989

Ahn *et al.* (2010), avaliaram a dinâmica de sedimentos para os últimos 300 anos no Lago Toro, Japão, através da utilização do método ²¹⁰Pb (modelo CRS). Os valores médios encontrados para o período inicial de análise foram na ordem de 13,0 a 14,1 toneladas km⁻².ano⁻¹ até 1963 aumentando para 30,5 toneladas km⁻².ano⁻¹ no período posterior a 1963. Tal aumento, segundo os autores, é motivado pela conversão de florestas de várzea e de terra firme em terras cultivadas. Em particular, a zona ocidental do lago, perto do Rio Kushiro apresentou taxa de sedimentação muito elevada, o que é atribuível ao ingresso de sedimentos provenientes do rio durante as cheias.

O modelo CIC não se mostrou aplicável por causa de flutuações nos perfis ^{210}Pb desde 1963, bem como pela variação na granulometria ao longo dos testemunhos; desta forma, o modelo CRS foi o escolhido, pois sugere que existe variação no fluxo de ^{210}Pb e nas taxas de sedimentação.

Lu & Matsumoto (2005) investigaram dez testemunhos de sedimentos em Ise Bay, Japão, medindo o excesso de ^{210}Pb através de espectrometria gama. Usando modelo (CRS), identificaram tendência do aumento geral na taxa de sedimentação ao longo do século passado, sendo correlacionado com o rápido crescimento econômico da área e intensificação da correspondente alteração ambiental (Fig. 8).

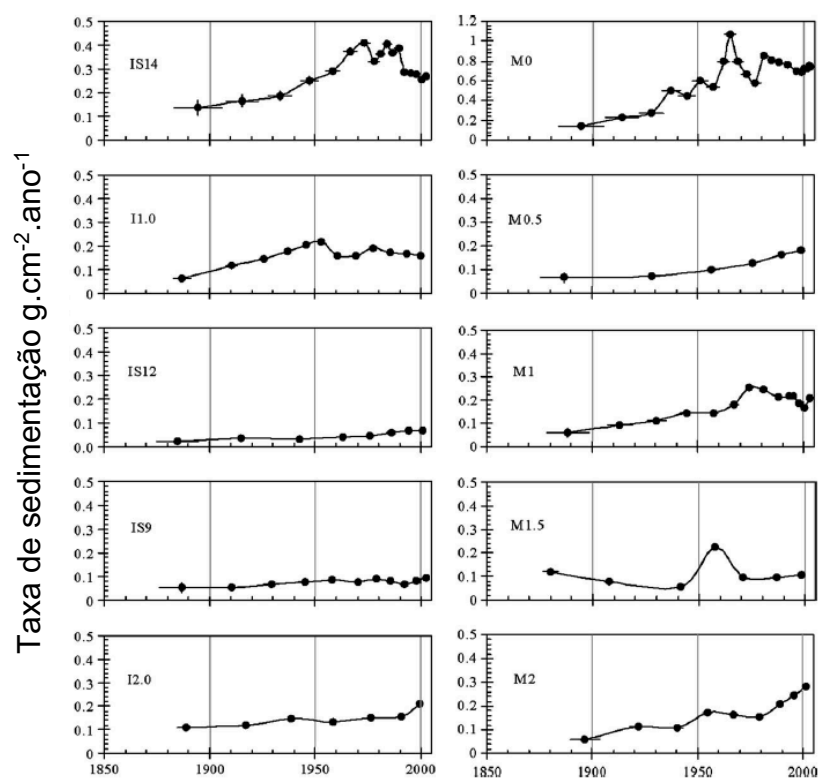


Figura 8 – Variação temporal das taxas de sedimentação de dez testemunhos coletados em Ise Bay, Japão, modificado de Lu & Matsumoto (2005).

Os autores concluíram que este aumento das taxas de sedimentação está relacionado ao aumento do uso da terra para produção agrícola, obras de controle de erosão costeira e dragagens, que induziram a entrada de sedimentos para a baía desde meados de 1970.

A utilização do método ^{210}Pb na determinação de taxas de sedimentação no Brasil já é considerado bastante difundido com inúmeras publicações. O primeiro trabalho realizado no sul do Brasil para determinação de taxa de sedimentação, ainda com o uso de espectrometria alfa para a utilização do ^{210}Pb , foi feito por Martins *et al.* (1989) na Lagoa dos Patos (RS). As taxas de sedimentação de curto

período, calculadas pelo método ^{210}Pb , em sedimentos presentes no topo de dois testemunhos, indicam valores entre 3,5 a 8,3 $\text{mm}\cdot\text{ano}^{-1}$

Posteriormente Dillenburg & Burnett (1995) utilizando o modelo CIC, obtiveram o valor de 4,2 $\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$ para a Lagoa de Tramandaí, um corpo lagunar que também está inserido na Planície Costeira do RS (PCRS). Ivanoff *et al.*, (2018) através do modelo CIC obteve na Lagoa Itapeva inserida na porção norte da PCRS taxas de sedimentação entre 2,4 a 3,3 $\text{mm}\cdot\text{ano}^{-1}$, sendo a taxa de sedimentação diretamente influenciada pela proximidade dos rios que escoam para a lagoa. Niencheski *et al.* (2014), estimou na porção estuarina da Lagoa dos Patos taxas de sedimentação na ordem de 3,0 $\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$ a 3,4 $\text{mm}\cdot\text{ano}^{-1}$ em dois testemunhos rasos.

Nota-se que, até então, os dados referentes à taxa de sedimentação aplicados ao Estado apenas demonstraram valores absolutos na ordem de milímetros, não sendo investigadas as variações nas últimas décadas das taxas de sedimentação pelo método CRS o que possibilita acompanhar mudanças no fornecimento de sedimentos por fatores naturais ou antropogênicos.

4.2 SISTEMA DE DECAIMENTO DO ^{137}Cs

O ^{137}Cs é um elemento artificialmente produzido pela fissão do ^{235}U , sendo o radionuclídeo produzido em maior quantidade por essa reação juntamente com o ^{90}Sr . Segundo Figueira (2000), esse nuclídeo tem como características um alto rendimento de fissão, meia-vida de 30,17 anos e decaimento para ^{137}Ba por emissão beta (β) e radiação gama (γ) (Fig. 9).

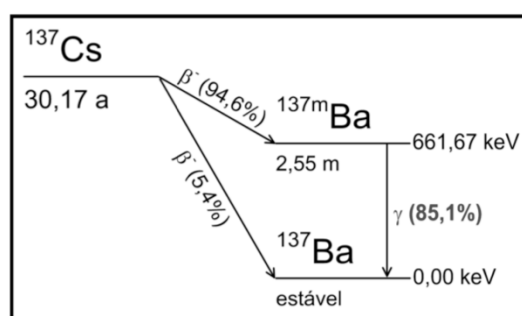


Figura 9 - Padrão de decaimento do ^{137}Cs , modificado de Figueira (2000).

O elemento ^{137}Cs , bem como os demais radionuclídeos artificiais ($^{239,240}\text{Pu}$, ^{241}Am) não existiam na natureza, entretanto a partir dos testes de armas nucleares e acidentes em reatores de fissão nuclear estes elementos foram gerados e iniciaram sua deposição em sedimentos por todo o globo. O ápice da concentração atribui-se ao biênio 1963/1964, devido ao grande número de testes de armas nucleares feitos

na atmosfera por vários países em pontos distintos do globo terrestre, em especial no hemisfério norte.

No Hemisfério Sul, o *fallout* de testes nucleares nas décadas de 50 e 60 (com máximo em 1963) é a fonte dominante desse radionuclídeo (Noureddine *et al.*, 2006). O *fallout* radioativo é a principal via de contaminação dos oceanos por radionuclídeos advindos de testes nucleares. Ele se dá através dos movimentos das massas de ar na troposfera e na estratosfera, causando a distribuição desses contaminantes por todo um hemisfério (no caso de episódios que afetam apenas as massas de ar na troposfera, como o acidente de Chernobyl) ou por todo o globo (como explosões de bombas nucleares, que afetam as massas de ar na troposfera e na estratosfera) após um evento nuclear na atmosfera (Kathren, 1984).

No hemisfério sul, os maiores testes foram efetuados pela França no Atol de Mururoa (Pacífico), entre 1964 e 1966 (Pennington *et al.*, 1973; Appleby *et al.*, 1991; UNSCEAR, 2000; Arnauld *et al.*, 2006). Na década de 60, vários tratados de destruição desses tipos de armamentos foram assinados, e, por isso, a concentração do ^{137}Cs e de outros radionuclídeos artificiais, como o $^{239,240}\text{Pu}$ e o ^{241}Am , têm diminuído na atmosfera e nos sedimentos desde então.

Apesar de uma pequena quantidade do ^{137}Cs proveniente do *fallout* estar presente nos sedimentos oceânicos, 90% deste radionuclídeo é encontrado na coluna d'água, e a sua incorporação ocorre nesta interface por troca isotópica, iônica ou pela biota. No ambiente marinho, o ^{137}Cs também apresenta uma forte afinidade ao material particulado e pode ser transferido da coluna d'água para o sedimento por uma série de processos físico-químicos, como sedimentação de partículas insolúveis provenientes do ciclo do combustível nuclear, adsorção ou precipitação de compostos inorgânicos (carbonatos, oxi-hidróxidos ou argilas), sedimentação com a matéria húmica, entre outros. (Kansanen, 1991).

Nos sedimentos, o ^{137}Cs permanece fortemente adsorvido nas partículas mais finas, principalmente silte e argila, e materiais húmicos. Entretanto, em áreas costeiras, existem controvérsias em relação ao comportamento deste radionuclídeo. Alguns pesquisadores acreditam que, uma vez incorporado ao sedimento, o ^{137}Cs permanece imobilizado, apresentando baixa capacidade reativa; outros atribuem a esse elemento uma grande capacidade de mobilidade nas águas intersticiais por troca iônica e pela reatividade das partículas (Calmet & Fernandez, 1990).

Na década de 70 foram realizados os primeiros trabalhos sobre taxas de sedimentação utilizando o radioisótopo artificial ^{137}Cs em sequências sedimentares

recentes de sistemas fluviais e marinhos (Krishnaswamy *et al.*, 1971 e Koide *et al.*, 1972, 1973). Estes primeiros trabalhos ressaltavam a necessidade de confirmar a taxa de sedimentação obtida pelo método do ^{210}Pb com outros marcadores, fossem estes outros radionuclídeos, ou estudos de polens, ou ainda marcadores estratigráficos bem conhecidos.

Para tanto, a determinação de ^{137}Cs por espectrometria gama é realizada diretamente pelo seu fotopico de 661 keV. Segundo Figueira *et al.* (1997), os problemas para a detecção deste radionuclídeo estão relacionados ao alto valor detectado para a radiação de fundo (branco) e à baixa capacidade de detecção dos equipamentos de contagem, quando são analisadas amostras que apresentam baixos níveis deste elemento. Estes autores minimizaram esses problemas com o uso de contagens cumulativas de ^{137}Cs , por longos períodos, na amostra em análise e na amostra correspondente à radiação de fundo, e com a suavização dos picos de radiação gama detectados, sendo normalmente a contagem adotada de 120000s.

Assim, a atividade de ^{137}Cs por espectrometria gama é obtida por meio da equação (6):

$$A_{^{137}\text{Cs}} = \frac{C_{^{137}\text{Cs}} - BG}{t \times m \times \varepsilon_{^{137}\text{Cs}}} \quad (6)$$

em que:

$A_{^{137}\text{Cs}}$ = atividade do ^{137}Cs na amostra (Bq.kg^{-1});

$C_{^{137}\text{Cs}}$ = número de contagens do ^{137}Cs na amostra;

BG = número de contagens da radiação de fundo na região do ^{137}Cs (661 keV);

t = tempo de contagem da amostra, em segundos;

m = massa da amostra, em quilogramas;

$\varepsilon_{^{137}\text{Cs}}$ = eficiência do detector para o ^{137}Cs .

Os picos de ^{137}Cs obtidos nos testemunhos são associados ao máximo de emissão atmosférica deste radionuclídeo no hemisfério sul, por explosões nucleares ocorridas entre os anos de 1963-1965, com subsequente deposição constante ao longo dos anos.

4.2.1 Aplicabilidade do Método de Decaimento do ^{137}Cs

Atualmente a principal utilização do ^{137}Cs é a checagem de taxas de sedimentação oriundas do método do ^{210}Pb , bem como o reconhecimento deste tipo contaminante no ambiente. Tendo em vista que o ^{137}Cs tem uma forte afinidade com

o material em suspensão, este elemento possui uma tendência a ter como reservatório final os sedimentos (Ligero *et al.*, 2001).

O ^{137}Cs tem uma tendência de bioacumulação em tecidos musculares de organismos, principalmente bentônicos (Figueira, 2000), devido às suas características químicas similares às do potássio (Santos *et al.*, 2008). Assim, seu estudo é importante por ele ser um contaminante nocivo (Figueira & Cunha, 1993) e pela possibilidade de funcionar como um traçador de processos sedimentares (Sanders *et al.*, 2010).

Kirchner (2011) mensurou a taxa de sedimentação no lago Kinneret através da obtenção de um testemunho na área central e mais profunda do lago. As taxas de sedimentação derivadas do ^{210}Pb são quase constantes ao longo da maior parte do testemunho, conforme documentado pelo bom ajuste do modelo CIC (fig. 10, à esquerda).

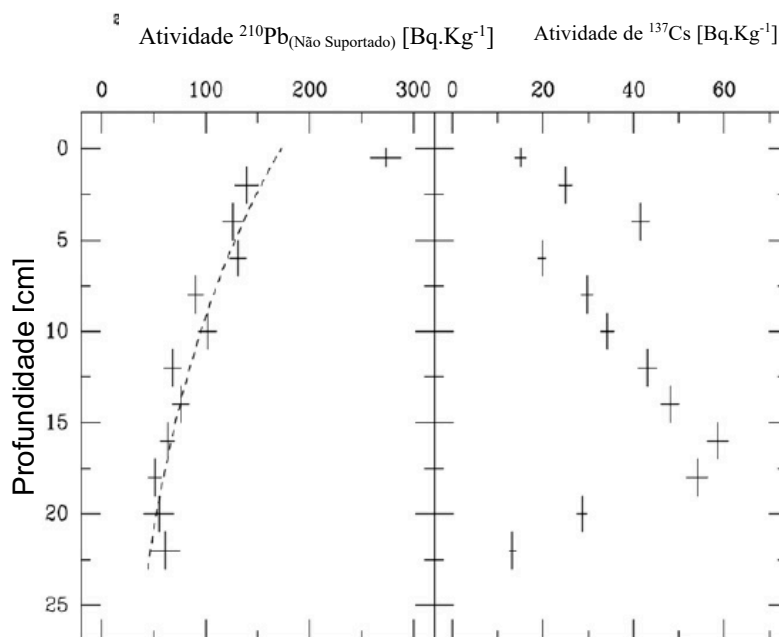


Figura 10 - Concentrações de ^{210}Pb (Não suportado) à esquerda e ^{137}Cs à direita em um testemunho de sedimentos tomadas do Lago Kinneret, Israel, modificado de Kirchner (2011).

Deve-se ressaltar, no entanto, que a metodologia do ^{210}Pb não permitiu estabelecer uma cronologia absoluta do sedimento, devido ao problema da perda de material na parte superior e inferior, não podendo ser identificada a distribuição exata de superfície e profundidade deste radionuclídeo.

Este problema pode ser resolvido pela combinação entre as informações sobre taxas de sedimentação via ^{210}Pb com as informações obtidas a partir de concentrações de ^{137}Cs no testemunho. Este radionuclídeo antropogênico mostra

um pico acentuado de concentração (fig. 10, à direita) correspondente ao valor máximo de testes de armas atômicas em 1963 e do acidente de Chernobyl em 1986.

Das interpretações desses picos, as taxas de sedimentação apresentaram a ordem de $0,5 \text{ cm.ano}^{-1}$ (1986 e 1994) e $0,52 \text{ cm.ano}^{-1}$ (1963 e 1986), respectivamente, o que também indica uma pequena variação no tempo do regime de sedimentação entre 1963 e o tempo de amostragem, resultando em uma taxa de sedimentação de média $0.525 \pm 0.068 \text{ cm.ano}^{-1}$.

Fukumoto (2007), apresentou no sistema Estuarino de Santos e São Vicente, Estado de São Paulo, valores sobre taxas de sedimentação utilizando as informações obtidas com o radionuclídeo ^{137}Cs . Foram obtidos três testemunhos para avaliação da atividade do ^{210}Pb , sendo que os resultados demonstraram uma não-linearidade da atividade do ^{210}Pb (não suportado), o que dificultou a determinação das taxas de sedimentação utilizando este radionuclídeo (Fig. 11).

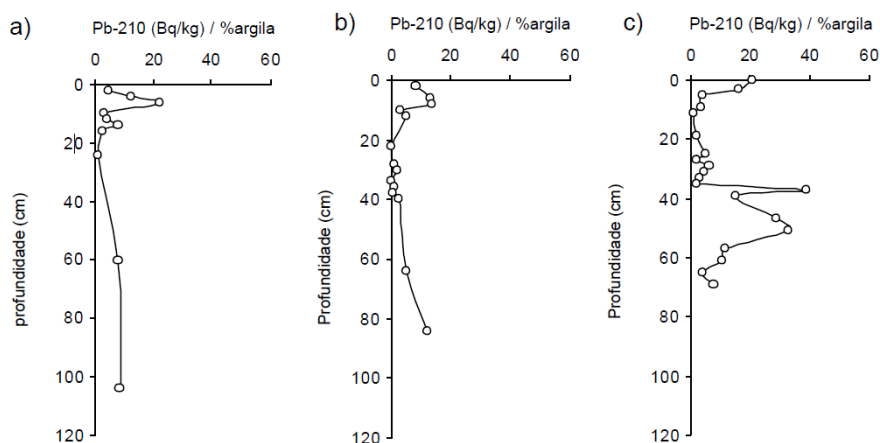


Figura 11 - Variação da atividade do ^{210}Pb (não-suportado) com a profundidade no: (a) Largo de Santa Rita; (b) Rio Casqueiro e (c) Largo do Canéu, extraído de Fukumoto (2007).

Desta forma, a análise do ^{137}Cs mostrou-se mais adequada do que a do ^{210}Pb . A figura 12 apresenta a variação da atividade do ^{137}Cs com a profundidade nos testemunhos estudados.

Sendo assim, no Largo de Santa Rita, tomou-se como pico de atividade do ^{137}Cs a profundidade de 60 cm. Atribuindo a esta profundidade o ano de 1964 e considerando constante a taxa de sedimentação na região desde então, tem-se uma taxa de sedimentação de $(1,58 \pm 0,15) \text{ cm.ano}^{-1}$.

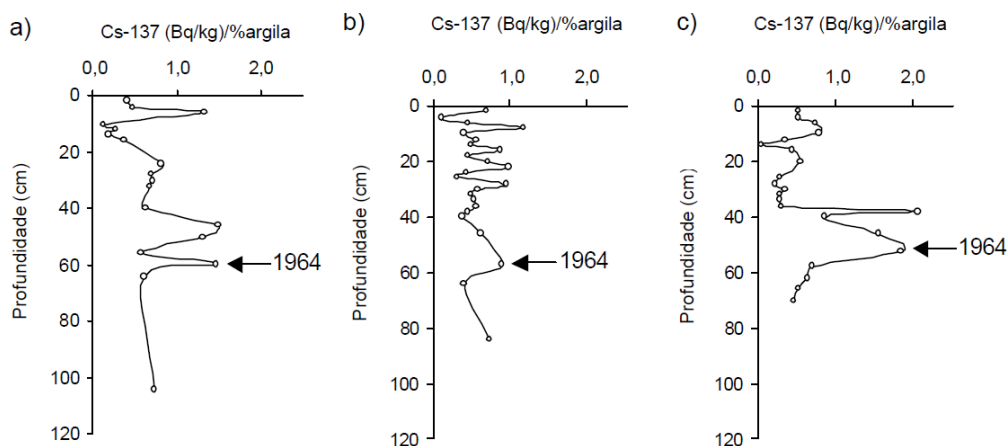


Figura 12 - Variação da atividade do ^{137}Cs com a profundidade no: (a) Largo de Santa Rita; (b) Rio Casqueiro e (c) Largo do Canéu, extraído de Fukumoto (2007).

No testemunho relativo ao Rio Casqueiro, tomando como pico de atividade do ^{137}Cs a profundidade de 57 cm, estabelece-se que esta corresponde ao ano de 1964. Considerando constante a taxa de sedimentação na área nas últimas décadas, pode-se calcular a taxa de sedimentação para o Rio Casqueiro como sendo de $(1,50 \pm 0,14) \text{ cm.ano}^{-1}$. No Largo do Canéu, o pico de atividade do ^{137}Cs ocorre na profundidade de 51 cm, e a taxa de sedimentação é de $(1,34 \pm 0,13) \text{ cm.ano}^{-1}$.

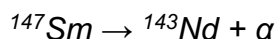
4.3 SISTEMA ISOTÓPICO SAMÁRIO E NEODÍMIO

O sistema radiométrico dos elementos Samário (Sm) e Neodímio (Nd) é uma metodologia eficientemente utilizada na obtenção de idades em rochas, meteoritos e depósitos sedimentares, sendo esta técnica amplamente difundida em estudos de proveniência mineral. O reconhecimento da proveniência sedimentar possibilita a reconstrução ambiental, tectônica e geográfica, bem como a identificação de paleocorrentes; desta forma, o reconhecimento da origem dos sedimentos se torna uma ferramenta valiosa no entendimento de parâmetros geológicos e climáticos atuantes em ambientes de sedimentação.

Os elementos Sm e Nd pertencem ao grupo dos Lantanídeos, ou elementos terras-raras (ETR) leves, e ocorrem, na grande maioria, nos minerais e nas rochas, sempre em teores muito baixos. São encontrados, em geral, substituindo os elementos de íons grandes encontrados principalmente nos clinopiroxênios, anfibólios, granadas, micas e feldspatos. Em alguns casos, os ETR são concentrados, como constituintes principais de alguns minerais acessórios de rochas

graníticas, como, por exemplo, alanitas, monazitas, xenotímio, columbita-tantalita, fluorita, sheelita e cassiterita (Bertotti, 2005).

O método tem por premissa o decaimento do elemento Samário (^{147}Sm), um isótopo radioativo, para um isótopo radiogênico de Neodímio (^{143}Nd) por emissão de partículas α , conforme exemplo:



A taxa desta desintegração é extremamente lenta, apresentando meia vida na ordem de 106 bilhões de anos (Ga), o que representa aproximadamente 23 vezes a idade da Terra.

Devido à magnitude de sua meia-vida, as variações na quantidade de ^{143}Nd radiogênico formado a partir do isótopo pai ^{147}Sm são pouco expressivas; por esta razão a técnica do Sm-Nd foi inicialmente aplicada na datação de rochas extraterrestres e terrestres antigas, (Kawashita & Torquato, 1998).

Os teores muito baixos de Sm e Nd nos materiais terrestres (concentrações da ordem de ppm) e a meia-vida muito longa do sistema de decaimento fazem com que as variações de abundância entre os diferentes isótopos de Nd sejam muito sutis. Por esses motivos, apenas nas últimas décadas, com o desenvolvimento de técnicas mais modernas, eficientes e precisas de separação iônica entre os ETR e da espectrometria de massas, foi possível a utilização em larga escala do sistema Sm-Nd em estudos isotópicos aplicados às geociências (DePaolo, 1988).

Este sistema inicia-se de forma que todos os minerais da rocha têm a mesma razão $^{143}\text{Nd} / ^{144}\text{Nd}$, mas diferentes razões $^{147}\text{Sm} / ^{144}\text{Nd}$. Com o passar do tempo geológico, à medida que esta última razão decresce, a primeira aumenta em razão da acumulação de ^{143}Nd radiogênico, sendo possível determinar a idade de rochas e minerais a partir da equação (7):

$$\left[\frac{\text{Nd}^{143}}{\text{Nd}^{144}} \right]_{\text{hoje}} = \left[\frac{\text{Nd}^{143}}{\text{Nd}^{144}} \right]_{\text{inicial}} + \left[\frac{\text{Sm}^{147}}{\text{Nd}^{144}} \right]_{\text{hoje}} (e^{\lambda t} - 1) \quad (7)$$

Em que: t é o tempo e λ é a constante de decaimento de valor igual a $6,54 \times 10^{-12}$ anos $^{-1}$.

Durante os processos de formação do planeta Terra, a partir da nebulosa solar e posterior diferenciação com a formação do núcleo, considera-se que os elementos Sm e Nd apresentaram um comportamento semelhante, não tendo sofrido processo de fracionamento. Portanto, ao final de sua formação a Terra possuiria uma composição isotópica de Sm-Nd uniforme (reservatório uniforme –

UR), que somente seria modificada com a evolução do planeta e com a formação da crosta terrestre.

Dessa forma, a composição isotópica dos meteoritos condriticos, que não sofreram posterior modificação, guardaria o registro do “manto terrestre primitivo”, e por isso essa condição inicial é chamada de reservatório uniforme condritico (CHUR, DePaolo & Wasserburg, 1976). Assim, a evolução isotópica do Nd na Terra teria sido igual à dos meteoritos condriticos (CHUR) apresentando razões isotópicas para $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ no valor de 0,1967 e $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ de 0,512638 (Jacobsen e Wasserburg 1984).

Entretanto, durante os primeiros estágios de formação da crosta terrestre, este manto CHUR teria sido parcialmente fundido, gerando um magma que posteriormente formaria a crosta primitiva. Logo, o manto primordial, de composição CHUR estaria depletado (empobrecido) nos elementos compatíveis com a crosta formada.

O fracionamento de Sm em relação ao Nd seria resultante de processos de magmatismo durante a formação da crosta terrestre, fornecendo à razão Sm/Nd (e ao padrão de distribuição de ETR) um significado petrogenético importante: baixas razões Sm/Nd correspondem a um padrão de enriquecimento de ETR leves, como na composição média da crosta terrestre; por outro lado, altas razões Sm/Nd correspondem a um enriquecimento em ETR pesados, mais característico do manto terrestre e de rochas como peridotitos.

A hipotética evolução isotópica para o planeta Terra, desde a condensação a partir de uma nebulosa solar primordial há 4,6 Ga, sugere uma razão inicial de $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ na ordem de 0,506609, sendo a razão atual presumida em 0,512638, tal qual nos condritos, podendo ser observada na figura 13.

Na mesma figura aparecem duas outras retas de evoluções independentes, decorrentes de uma possível diferenciação ocorrida em T1 a partir de CHUR. O material diferenciado com razão $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ menor que 0,1967 evoluiria de forma menos acentuada atingindo RA, enquanto outro, de razão maior que 0,1967 atingiria o RB, acima de 0,512638.

Considerando que a crosta, gerada a partir da fusão parcial do manto CHUR, incorpora preferencialmente Nd em relação ao Sm, esta terá uma razão Sm/Nd diferente da razão do CHUR. A partir da formação de crosta primitiva, a razão $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ crescerá mais lentamente na crosta (pela menor abundância de ^{147}Sm) do que no CHUR. Por outro lado, na porção do manto que sofreu fusão parcial

(manto depletado – DM), haverá uma concentração maior de ^{147}Sm , provocando um crescimento mais acelerado da razão $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ (fig. 13).

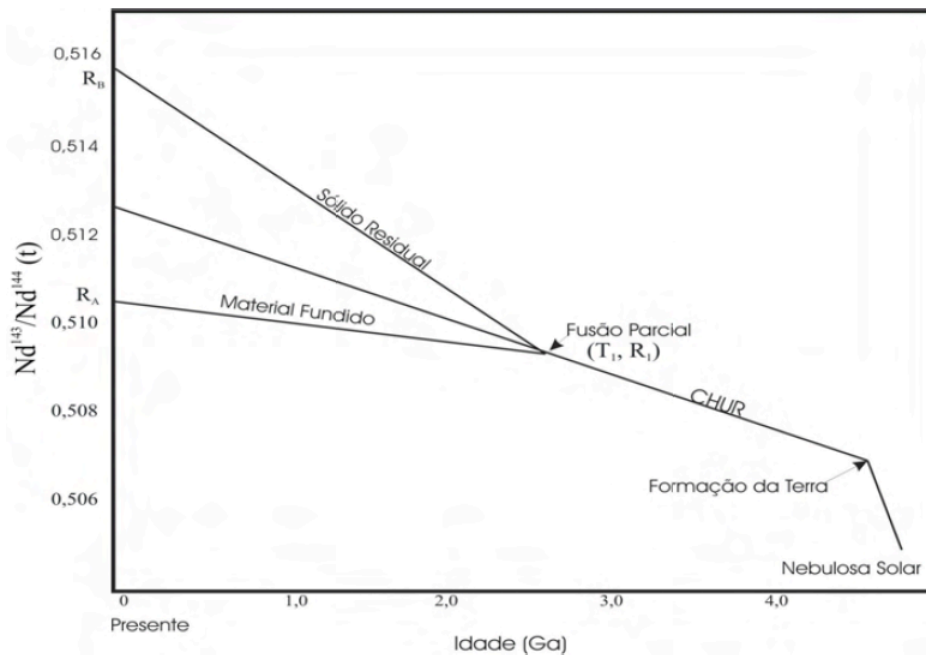


Figura 13 – Evolução da razão $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ para CHUR e Planeta Terra desde 4,6 Ga, extraído de Bertotti (2005).

Dentro de um processo de fusão parcial, o magma tem razão Sm/Nd sempre mais baixa do que a rocha fonte original. Por outro lado, as concentrações de Nd e de Sm geralmente são maiores no líquido em comparação à rocha original. Desta forma, estudos em sistemas crosta-manto possibilitaram a distinção dos tipos de materiais segundo um fator de fracionamento designado $f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$ relativo aos meteoritos condríticos (DePaolo, 1988).

Através da equação (8), pode-se deduzir que os materiais diferenciados com razão maior que 0,1967 terão f positivo (material mantélico), enquanto serão negativos os de razão menor que este valor médio admitido para os condritos (material crustal).

$$f_{\text{Sm}/\text{Nd}} = \frac{\left(\frac{\text{Sm}^{147}}{\text{Nd}^{144}}\right)_{\text{amostra}} - \left(\frac{\text{Sm}^{147}}{\text{Nd}^{144}}\right)_{\text{CHUR}}}{\left(\frac{\text{Sm}^{147}}{\text{Nd}^{144}}\right)_{\text{CHUR}}} \quad (8)$$

As variações na razão $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ entre diferentes materiais terrestres são muito sutis; desta forma foi elaborado o parâmetro ϵ_{Nd} , através do qual a compreensão e a visualização dos dados do sistema Sm-Nd tornam-se mais diretas. Assim, a metodologia Sm-Nd nos possibilita, além da determinação da idade, estabelecer um indicador petrogenético denominado de ϵ_{Nd} que é relativo a razão

$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ comparada com o CHUR, que auxilia na identificação das fontes de magmas e de processos de formação de rochas e mineralizações.

Ao longo da evolução do planeta Terra, a razão isotópica $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ do CHUR decresceu de cerca de 0,5126 (média aproximada de 58 condritos) para o valor atual de 0,511847 (DePaolo, 1988). Para saber a razão $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ do CHUR em um determinado tempo T, utiliza-se a equação (9) descrita por De Paolo (1988):

$$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{\text{CHUR}}(T) = ^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{\text{CHUR}} - ^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}_{\text{CHUR}} [e^{\lambda_{\text{Sm}}T} - 1] \quad (9)$$

em que:

$$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{\text{CHUR}} = 0,511847;$$

$$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}_{\text{CHUR}} = 0,1967;$$

$$\lambda_{\text{Sm}} = 0,00654/\text{Ga}.$$

A partir da comparação com este “padrão de referência”, a razão isotópica $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ de uma amostra de rocha no tempo T é dada pelo parâmetro $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$, definido pela equação (10):

$$\epsilon_{\text{Nd}}(T) = 10^4 \left[\frac{^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{\text{amostra}}(T) - ^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{\text{CHUR}}(T)}{^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{\text{CHUR}}(T)} \right] \quad (10)$$

Os valores positivos de $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ refletem razões $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ maiores que a do CHUR e, portanto, uma origem mantélica para determinado conjunto de amostras, enquanto valores negativos indicam razões $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ mais baixas e derivação crustal (Fig. 14).

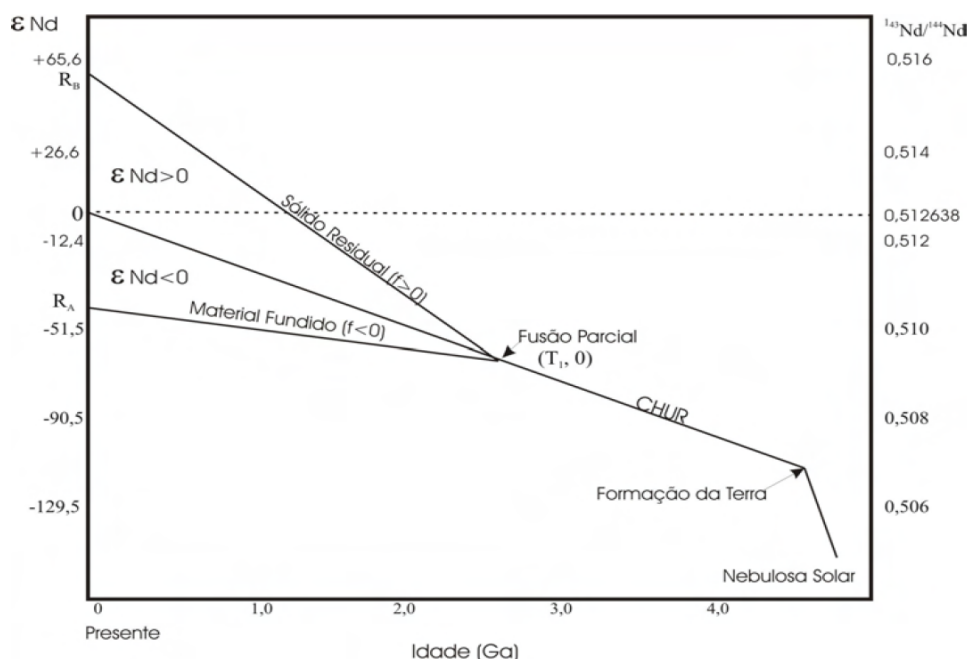


Figura 14 - Curva de evolução condritica e de materiais derivados em T_1 por fusão parcial em função do ϵ_{Nd} , extraído de Bertotti (2005).

4.3.1 Idades Modelo

A explicação da evolução isotópica de Nd, no manto superior e materiais crustais, podem ser interpretados através de dois modelos clássicos. O primeiro é baseado na evolução dos condritos (CHUR - *Chondritic Uniform Reservoir*), um modelo indiferenciado e uniforme, e o segundo, que compõe grande parte do manto existente na Terra, é o modelo do manto empobrecido (DM - *Depleted Mantle*), que admite uma modelagem em que o manto sofreria episódios de fracionamento envolvendo a extração de magmas basálticos. Desta forma, permanece um manto residual enriquecido na razão Sm/Nd e empobrecido geoquimicamente em elementos litófilos de íons grandes.

No primeiro caso, a idade modelo identificada como T_{CHUR} , proposta por De Paolo & Wasserburg (1976), assume que a rocha derivou-se do manto, que o reservatório é uniforme e que a razão Sm/Nd é da ordem de 0,31, ou seja, a média de 6 meteoritos condriticos, além do meteorito Juvinas (Jacobsen & Wasserburg, 1980). Ao assumir tal hipótese, a idade modelo T_{CHUR} de derivação seria aquela do momento em que $\epsilon_{Nd}(t)$ seria nula, ou seja, a razão $^{143}Nd/^{144}Nd$ da rocha seria igual à dos condritos ou CHUR.

A expressão resultante, assumindo esta hipótese para T_{CHUR} , é descrita pela equação (11):

$$T_{CHUR} = \frac{1}{\lambda} \ln \left[1 + \frac{\left(\frac{Nd^{143}}{Nd^{144}} \right)_{CHUR}^{hoje} - \left(\frac{Nd^{143}}{Nd^{144}} \right)_{rocha}^{hoje}}{\left(\frac{Sm^{147}}{Nd^{144}} \right)_{CHUR}^{hoje} - \left(\frac{Sm^{147}}{Nd^{144}} \right)_{rocha}^{hoje}} \right] \quad (11)$$

A idade modelo T_{CHUR} pode ser determinada também graficamente, interceptando a reta de evolução da amostra com a correspondente à do reservatório condritico (Fig. 14).

No segundo caso, a idade modelo é definida por T_{DM} , na qual assume que a geração da crosta continental se deu a partir de um reservatório mantélico, causando o empobrecimento em elementos leves (LILE – Large Ion Lithophile Elements) e também dos elementos leves dos ETR neste reservatório, resultando no que é denominado como “manto empobrecido” (*Depleted Mantle*) conforme figura 15.

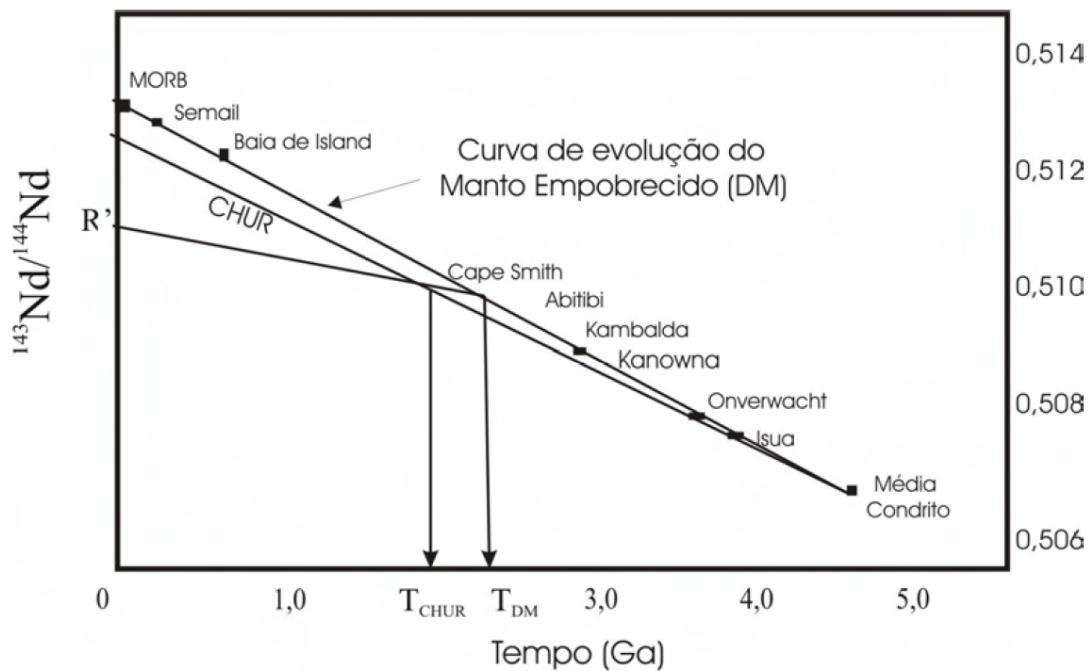


Figura 15 - Curva de evolução planetária (CHUR) e manto empobrecido, modificado de Ben Ohtman *et al.* (1984).

Ao se aplicar o conceito de idade modelo T_{CHUR} , as amostras da crosta originadas deste manto empobrecido não forneceriam certamente uma idade real de formação da crosta. A idade modelo mais razoável deve ser calculada em relação à possível curva de evolução do manto empobrecido (DM).

Uma das possíveis curvas é a sugerida por Ben Ohtman *et al.* (1984), cuja evolução da razão isotópica ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$) T_{DM} sugerida não é linear, mas quadrática e da forma descrita na equação (12):

$$\left(\frac{\text{Nd}^{143}}{\text{Nd}^{144}}\right)_{\text{DM}}^t = At^2 + Bt + C \quad (12)$$

na qual:

$$A = 1,53077 \times 10^{-5}$$

$$B = -0,22073 \times 6,54 \times 10^{-3}$$

$$C = 0,513078$$

t = dado em Ga.

Os coeficientes A, B e C foram calculados como os que melhor se ajustavam à curva do manto empobrecido e foram definidos por dados isotópicos em MORB (*Mid Ocean Ridge Basalts*), ofiolitos (Bay of Island, Semail), rochas vulcânicas máficas pré-cambrianas (Kambalda, Kanowna, Onverwacht), Komatiitos (Cape Smith, Abitibi), rochas supracrustais de Isua e dois meteoritos (Angra dos Reis e Juvinas).

A idade modelo conhecida como T_{DM} é obtida através da resolução do sistema com as equações (7) e (12), em que $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ inicial = $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{DM}$, cuja solução geral é dada pela equação (13):

$$T_{DM} = \frac{-\left[B + \left(\frac{Sm^{147}}{Nd^{144}}\right)\lambda\right] - \left\{ \left[B + \left(\frac{Sm^{147}}{Nd^{144}}\right)\lambda\right]^2 - 4A \left[C - \left(\frac{Nd^{143}}{Nd^{144}}\right)_{am} \right] \right\}^{\frac{1}{2}}}{2A} \quad (13)$$

4.3.2 Aplicabilidade do Método Sm-Nd

A Geologia isotópica tem utilizado o sistema de decaimento do ^{147}Sm para ^{143}Nd especialmente na determinação de idades em meteoritos, de rochas lunares e terrestres antigas, bem como no reconhecimento da proveniência de sedimentos em bacias sedimentares.

Inicialmente o método foi utilizado na cosmocronologia como mecanismo de determinação da idade de meteoritos; o trabalho pioneiro de Notsu *et al.* (1973) estabeleceu uma idade de $4,3 \pm 2,5$ Ga para o meteorito acondrítico Juvinas. Ainda que este valor apresentasse elevado grau de imprecisão posteriormente no trabalho de Lugmair & Scheinin (1975), a idade do mesmo meteorito foi mensurada de uma forma mais precisa, sendo a idade estabelecida em $4,56 \pm 0,08$ Ga com uma razão inicial para $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})$ igual a $0,50825 \pm 0,00012$.

Lugmair *et al.* (1976), utilizaram posteriormente o método na datação de rochas lunares, sendo que a idade Sm/Nd obtida de um troctolito lunar foi de $4,26 \pm 0,06$ Ga, e a razão inicial Sm/Nd obtida de $0,50715 \pm 0,00007$. A semelhança em relação às análises dos condritos nos leva a especular que a Lua, a exemplo da Terra, evoluiu semelhantemente sob o ponto de vista isotópico.

Um dos primeiros trabalhos utilizando a metodologia Sm-Nd em materiais terrestres foi desenvolvido por DePaolo & Wasserburg (1979), em rochas do complexo Stillwater (EUA), cuja idade apresentada foi de $2,701 \pm 0,008$ Ga, enquanto os dados isotópicos em rocha total alinham-se perfeitamente com a mesma, confirmando a idade de cristalização magmática.

A composição isotópica dos sedimentos de fundo e da carga em suspensão dos ventos na região leste do Oceano Atlântico Norte foram verificadas no trabalho de Grousset *et al.* (1988), o qual encontrou heterogeneidades significativas nas assinaturas isotópicas das amostras. Os valores encontrados apresentaram uma variabilidade maior, com a razão $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ situando-se entre $0,511892$ e $0,512890$ (Fig. 16).

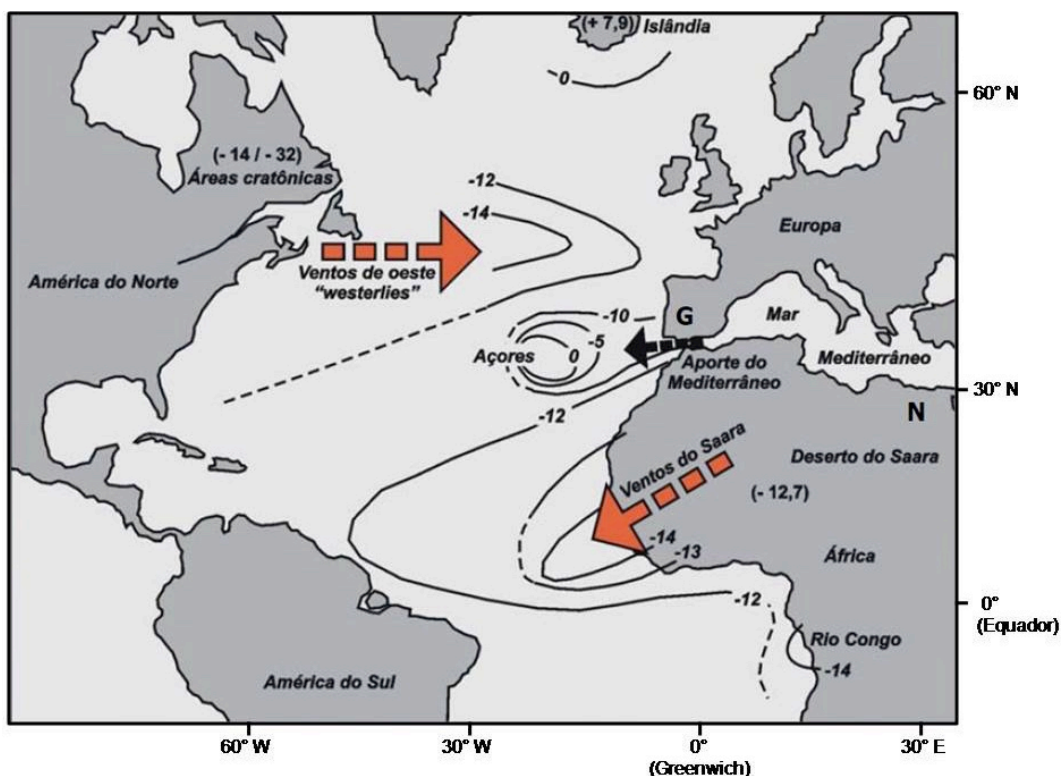


Figura 16 - Valores de ϵ_{Nd} obtidos por Grousset *et al.* (1988) em amostras de sedimentos recentes do Oceano Atlântico Norte.

Valores positivos de ϵ_{Nd} foram observados nas imediações do Arquipélago dos Açores, correspondendo a idades-modelo menores que 1,0 Ga, por influência da erosão do próprio arquipélago. Uma área com valores de ϵ_{Nd} entre -2,5 e -10 ocorre entre o estreito de Gibraltar (G, na Figura 16) e os Açores, com idade-modelo média de 1,5 Ga.

A interpretação dos autores leva em conta uma assinatura vulcanogênica juvenil do Mar Mediterrâneo, pela atividade vulcânica no sul da Europa, além da proveniência vulcânica dos sedimentos do Nilo (N, na Figura 16), no nordeste da África. Ao Sul e ao Norte desta faixa, os valores de ϵ_{Nd} ficam entre -12 e -15, com idades-modelo sempre maiores que 1,75 Ga, sugerindo contribuição significativa dos ventos provenientes do Saara e dos crátons norte-americanos (Grousset *et al.*, 1988).

DePaolo (1988) demonstra que é possível mensurar a composição isotópica da água dos oceanos e interpretar a proveniência de correntes devido à heterogeneidade da distribuição de neodímio nos mesmos. O valor médio do ϵ_{Nd} no Oceano Pacífico é de -3, e o valor médio para o Atlântico é em torno de -13 (DePaolo, 1988). O valor do ϵ_{Nd} para o Oceano Índico é de -8,3 (Bertram, 1993), sendo intermediário aos valores do Pacífico e do Atlântico. Portanto, a composição

isotópica do Nd na água oceânica pode ser usada para apontar a água derivada de diferentes regiões com a finalidade de estudar a circulação global das correntes oceânicas.

Esse fato é uma consequência de que o neodímio chega aos oceanos por diferentes rios e precipita tão rapidamente que o tempo de circulação para homogeneizar a água é insuficiente. Uma vez que o tempo de residência do neodímio nos oceanos é de 200 anos, este prazo mostra-se substancialmente menor que o tempo de mistura estimado dos oceanos, que é em torno de 1000 anos.

O trabalho de Mahiques *et al.* (2008) interpretou as assinaturas isotópicas dos sedimentos no Oceano Atlântico Sul, nos setores Sudeste e Sul da Margem Continental sul americana, onde a plataforma continental argentina apresentou valores de ϵ_{Nd} , variando entre -0,1 a -4,0, com um valor médio de -1,9. Estes resultados mostram que as rochas andinas podem ser consideradas como fonte de sedimentos para esta área. A relativa homogeneidade das assinaturas isotópicas pode ser uma indicação da eficácia das correntes locais na redistribuição de sedimentos. Para sedimentos mais finos, essa homogeneidade foi atribuída à eficácia dos ventos de oeste no transporte de poeira da cadeia andina para o Atlântico Sul, não ocorrendo mistura de sedimentos entre o setor sul e os localizados mais ao norte.

Os sedimentos do estuário do Rio de La Plata mostram uma média no valor do ϵ_{Nd} de -9,6, o que é semelhante ao setor sul do Brasil (-9,3). Neste caso, os basaltos da Província Magmática da Bacia do Paraná podem ser identificados como potenciais rochas geradoras parciais para os sedimentos do Rio de La Plata, bem como no setor sul do Brasil até o paralelo 28°S.

Entre 28°S e 25°S, os isótopos de Nd sugerem que os sedimentos são provenientes de rochas mais antigas da crosta superior. Os sedimentos do Sudeste do Brasil apresentam o menor ϵ_{Nd} médio (-13,0) na área de estudo. Estes sedimentos possivelmente são originados da erosão do Escudo Brasileiro e são distribuídos para o sul pelo fluxo da corrente do Brasil, que transporta a água Tropical na direção Sul.

Por fim, além destas inúmeras possibilidades de utilização do sistema Sm-Nd, McLennan *et al.* (1990) também abordaram a questão da influência granulométrica sobre os resultados do sistema Sm-Nd, trabalhando com as porções de base (areias) e topo (lamas) de pacotes turbidíticos de bacias distribuídas por

todo o mundo. Os autores citados obtiveram diferenças de até 440 Ma na idade-modelo T_{DM} entre as duas frações, especialmente em amostras de bacias contíguas a arcos continentais, onde existem rochas crustais e mantélicas disponíveis para a sedimentação.

Este aspecto da granulometria foi abordado mais recentemente por Innocent *et al.* (2000), através do estudo de seis amostras de sedimentos do Holoceno e associadas ao último máximo glacial da porção offshore do Labrador (leste do Canadá). As amostras foram separadas em três frações distintas: fração argila ($\Phi > 9$), fração silte fino coesivo (Φ entre 7 e 8) e silte grosso (Φ 8). Observou-se que a fração mais grossa é depletada em Sm e Nd em relação às frações mais finas, e que a fração argila ($\Phi > 9$) possui sistematicamente as menores razões $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$.

Nas amostras mais jovens, abaixo de 10,3 Ma, as frações mais finas mostram um enriquecimento em um componente radiogênico em relação ao intervalo mais grosso. Isso demonstra que o silte seria transportado desde a costa da América do Norte (terrenos pré-cambrianos), enquanto a argila seria trazida do norte, através de correntes marinhas profundas, desde a Islândia (a provável fonte do componente radiogênico, mantélico).

Por outro lado, nas amostras com idades de 22 e 26 Ma, influenciadas pelo último evento glacial, não ocorre esta diferença entre as frações, além da assinatura ser muito mais crustal. Isto significa, na interpretação de Innocent *et al.* (2000), que durante o último evento glacial a influência da corrente marinha que traz sedimentos finos da Islândia para o sul teria sido muito reduzida.

4.4 MAGNETISMO AMBIENTAL

O magnetismo ambiental constitui uma área da ciência originada em meados da década de 1970 que atualmente apresenta grande desenvolvimento. As pesquisas realizadas nessa área contribuem significativamente para o ramo das geociências auxiliando na compreensão de mudanças climáticas, padrões de poluição, biomineralização, processos deposicionais e diagenéticos, proveniência sedimentar, entre outras aplicações (Liu *et al.*, 2012).

A fração de grãos magnéticos em sedimentos, usualmente composta por magnetita, hematita, maghemita, goetita ou um sulfeto de ferro é variável, porém obedece a alguns fatores controladores (Evans & Heller, 2003). Nesse sentido, diversas técnicas são utilizadas em rochas e minerais para investigar a formação,

transporte, deposição e alterações pós-deposicionais dos minerais magnéticos sob a influência de uma ampla gama de processos de origem natural ou antropogênica (Thompson e Oldfield, 1986; Evans & Heller, 2003).

As alterações induzidas por fatores climáticos, biogênicos e litológicos mostram reflexos nos parâmetros e nas características dos portadores magnéticos presentes em sedimentos como concentração, tamanho e forma do grão magnético. Essas informações podem ser obtidas via emprego de técnicas experimentais para estudos da mineralogia e do magnetismo de materiais, permitindo o estabelecimento de possíveis mecanismos de variação ambiental nos mais diferentes contextos (Liu *et al.*, 2012).

4.4.1 Parâmetros Magnéticos

Todos os materiais são magnéticos, ou seja, respondem de uma forma característica, pela sua composição química e, ou, pela sua estrutura, quando submetido a um campo magnético. A capacidade dos materiais em obter magnetização sob o campo magnético externo aplicado é definido pela susceptibilidade magnética (χ), um parâmetro geofísico facilmente mensurável (Evans e Heller, 2003; Thompson e Oldfield, 1986).

Por definição, a susceptibilidade magnética corresponde a uma constante de proporcionalidade entre o campo magnético aplicado (H) e a magnetização (M) (Lowrie, 1997), sendo descrita na equação 14:

$$k = \frac{M}{H} \quad (14)$$

Sendo,

k = suscetibilidade magnética volumétrica;

M = momento magnético dipolar por volume unitário;

H = intensidade do campo magnético aplicado.

Posteriormente, esta resultante pode ser dividida pela densidade do material, possibilitando a obtenção dos valores de susceptibilidade por unidade de massa, conforme a equação 15:

$$\chi = \frac{k}{\rho} \quad (15)$$

Sendo,

χ = suscetibilidade magnética de massa (expressa em $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$);

k = suscetibilidade magnética volumétrica;

p = densidade do material.

As propriedades magnéticas da matéria podem determinar características associadas aos conceitos de diamagnetismo, paramagnetismo e ferromagnetismo (Fig. 17).

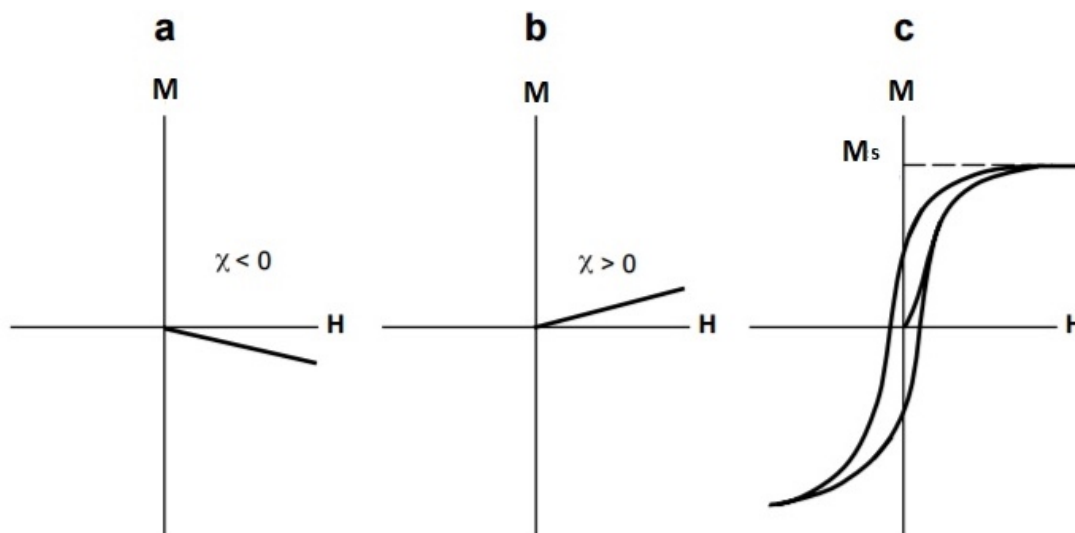


Figura 17 - Modelos teóricos de magnetização (M) para um determinado material em relação a um campo magnético aplicado (H). (a) Partícula diamagnética, susceptibilidade negativa; (b) partícula paramagnética, susceptibilidade positiva; (c) partícula ferromagnética, susceptibilidade variável (modificado de Butler, 1998).

O diamagnetismo é uma propriedade intrínseca de toda matéria, devido a presença de carga elétrica nos elétrons orbitando os átomos, surgindo da movimentação na presença um campo magnético aplicado. A interação entre esse movimento e o campo magnético aplicado resulta em uma força de Lorentz lateral, e então em um momento magnético na direção contrária ao campo aplicado (Thompson & Oldfield, 1986). Assim, os materiais diamagnéticos, como o quartzo, a calcita, a matéria orgânica, dizem-se diamagnéticos porque se magnetizam no sentido oposto ao do campo magnético aplicado e não guardam qualquer magnetização remanescente, após a remoção do campo (Fig. 17a). O valor da susceptibilidade magnética tem valor absoluto muito baixo e é negativo (Thompson & Oldfield 1986, Butler 1998).

No que se referem as pesquisas no âmbito de magnetismo ambiental, o diamagnetismo é pouco expressivo, sendo os valores de seus momentos magnéticos centenas de vezes menores comparado ao paramagnetismo, e centenas de milhares de vezes menores que o ferromagnetismo.

O paramagnetismo tem como causas a rotação dos elétrons em torno do seu próprio eixo, além do movimento orbital em torno do núcleo, apresentando assim um

momento magnético devido ao seu *spin*, e outro em relação ao movimento de órbita, tornando possível uma resultante geométrica das somas dos momentos magnéticos, diferente do diamagnetismo, no qual a energia térmica dos movimentos dos elétrons balanceia o momento magnético na partícula (Dunlop & Ozdemir, 1997).

Os materiais paramagnéticos, como a biotita e a olivina, magnetizam-se no sentido do campo aplicado e não guardam qualquer magnetização remanescente, após a remoção do campo aplicado (Fig. 17b). O valor absoluto da SM apresenta valor absoluto positivo muito baixo (Thompson & Oldfield, 1986; Butler, 1998).

Por outro lado, o ferromagnetismo surge de um momento magnético expressivo, devido a cristalografia do átomo e do subnível 3*d* incompleto de elementos como ferro, níquel e cobalto. Nesse caso, sendo os átomos adjacentes tão próximos os orbitais dos elétrons se sobrepõem, de forma a alinhar os momentos magnéticos dos átomos envolvidos, e somar seus momentos magnéticos resultantes. Conforme Butler (1998), Evans & Heller (2003), quando submetida a um campo magnético, a partícula ferromagnética adquire uma “memória” magnética, ou magnetização remanente.

Uma magnetização de saturação (M_s) é representada na Figura 17c, indicando a remanência do grão ferromagnético em função de campos magnéticos aplicados em dois sentidos (positivo e negativo). Além disso, dentre os materiais ferromagnéticos incluem-se: 1) os materiais antiferromagnéticos imperfeitos, como a hematita; 2) materiais ferrimagnéticos, como a magnetita e 3) materiais ferromagnéticos, como o ferro (Fig. 18)

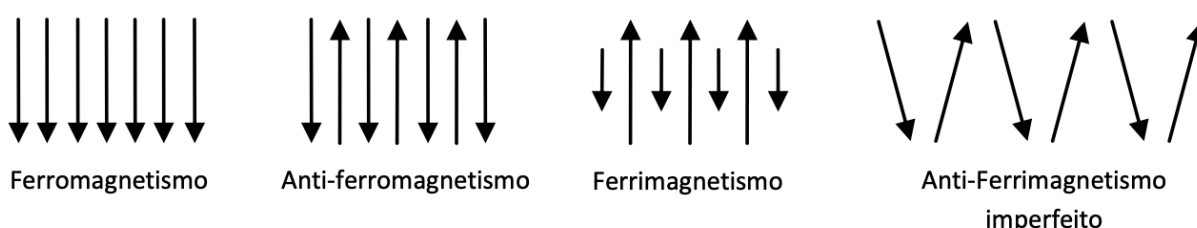


Figura 18 - Tipos de estruturas, em função do tipo de acoplamento dos momentos magnéticos dos eletros (adaptado de Thompson e Oldfield 1986).

No ferrimagnetismo, os momentos magnéticos em uma direção não são totalmente compensados pelo arranjo de momentos na direção oposta. Os materiais antiferromagnéticos também possuem sub-redes magnéticas antiparalelas, mas seus momentos magnéticos são idênticos. A ordenação antiferromagnética é destruída pela agitação térmica acima da temperatura de *Néel*. A magnetita é o

mineral natural que melhor representa o grupo de materiais ferrimagnéticos e a hematita, o grupo dos antiferromagnéticos.

Quando as partículas apresentam magnetização uniforme por toda a extensão do grão são consideradas de monodomínio ou *single domain* (SD), e conforme o tamanho aumenta, diminui-se a estabilidade energética de um grão de mineralogia similar. Em um determinado tamanho crítico, a magnetização do grão se divide em múltiplos domínios, cada qual com seu balanço de energia e direção (Fig. 19), sendo partículas deste tipo classificadas como de multidomínio ou *multidomain* (MD).

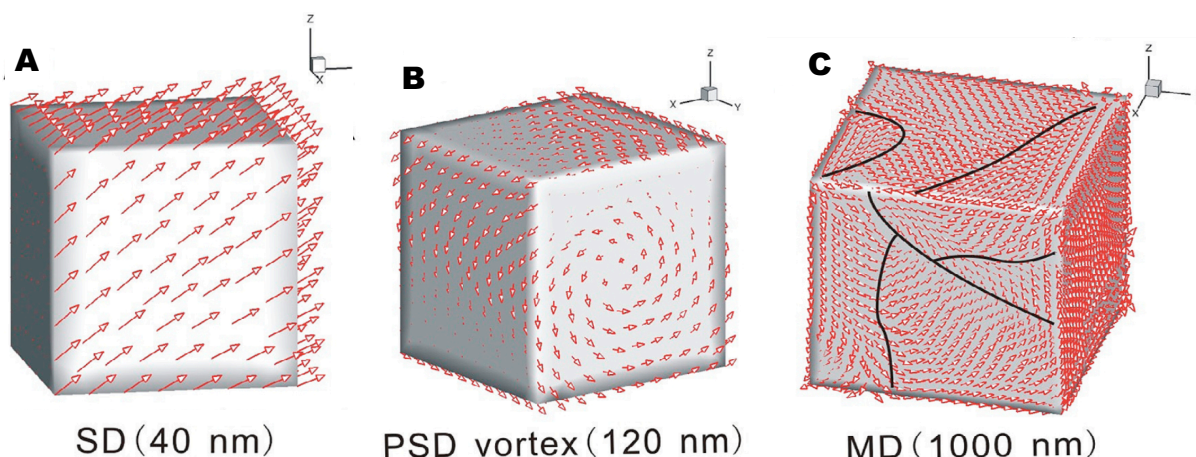


Figura 19. Estados micromagnéticos teóricos associados para um cubo de magnetita uniaxial com tamanhos diferentes. Com o aumento do tamanho dos grãos, as estruturas de spin evoluem de uniaxial (Figura 19A), para vórtice (Figura 19B) e para estados de múltiplos domínios (Figura 19C). Os modelos dividem os grãos em: A) *single domain* (SD), B) *pseudo single domain* (PSD) e C) *multidomain* (MD), modificado de Liu *et al.* (2012).

Alguns grãos MD podem apresentar poucos domínios em sua extensão, de forma que muitas de suas propriedades se assemelham a assembleias de grãos SD, sendo esses considerados grãos com pseudo-monodomínios ou *pseudo single domain* (PSD). Um quarto tipo de propriedade dependente de granulometria é o super-paramagnetismo, na qual o comportamento magnético é influenciado consideravelmente por fatores de estabilidade de remanência e energia térmica, sendo característico nas interpretações de parâmetros magnéticos (Evans & Heller, 2003; Thompson & Oldfield, 1986).

4.4.2 Aplicabilidade do Magnetismo Ambiental

Os métodos magnéticos aplicados ao estudo de rochas, de sedimentos e de solos constituem ferramentas valiosas para desvendar variações ambientais, tanto no passado geológico quanto nos ambientes modernos. Sedimentos aluviais e

fluviais tem sido foco de estudos magnéticos ambientais, não somente pelo seu interesse intrínseco, mas principalmente porque constituem o material do qual o sedimento litogênico é parcialmente derivado e sobre o qual os processos pedogênicos atuaram.

Nesse sentido, as propriedades magnéticas de sedimentos fluviais foram incorporados a diversos estudos com objetivo de auxiliar na interpretação da proveniência em registros sedimentares marinhos (por exemplo, Salomé & Meynadier, 2004; Horng & Roberts, 2006; Horng & Huh, 2011), bem como no rastreamento de descargas intensas, associadas a eventos como tufões e tempestades, provocando transporte rápido do continente para a plataforma continental (Salomé & Meynadier, 2004; Horng & Roberts, 2006; Horng & Huh, 2011).

Sedimento lacustres também constituem elementos de grande interesse para o magnetismo ambiental, pois podem registrar sinais paleoclimáticos terrestres contínuos de alta resolução. Em estudos pioneiros sobre depósitos de argila em lagos Ising (1943), descobriu que a concentração de magnetita é maior nas camadas de primavera em relação à demais camadas sazonais, o que indica que as propriedades magnéticas dos sedimentos de lagos são fortemente controladas por fatores climáticos.

Os principais avanços nos estudos magnéticos ambientais de sedimentos lagunares ocorreram nas décadas de 1960 a 1980, liderados principalmente por grupos britânicos (Thompson, 1973; Thompson *et al.*, 1975, 1980; Dearing & Flower, 1982; Sandgren & Snowball, 2002). Desde então, os estudos de sedimentos lagunares, usando abordagens magnéticas ambientais, tornaram-se internacionalmente importantes. Alterações no conteúdo de óxido de ferro magnético (em termos de mineralogia, concentração e tamanho de grão) nos sedimentos estão ligadas ao clima por meio de processos como o desenvolvimento do solo na bacia hidrográfica, o agente erosivo (por exemplo, água, gelo) nas áreas de captação e através do fornecimento de carbono orgânico e processos pós-deposicionais no fundo lagunar.

Estudos sobre o magnetismo no solo podem estimar as propriedades magnéticas dos horizontes A e B (Maher, 1998), que são frequentemente aprimoradas devido à neoformação de ferrimagnetos de tamanho nano (magnetita e, ou, maghemita) com argilas contendo ferro e silicatos máficos fornecendo a fonte de ferro (Zhou *et al.*, 1990; Spassov *et al.*, 2003). Portanto, as propriedades magnéticas

do solo carregam informações importantes sobre a dinâmica dos processos pedogênicos (Zhou *et al.*, 1990; Tauxe *et al.*, 1990; Singer *et al.*, 1996) e a ligação entre propriedades magnéticas e clima (Maher *et al.*, 1994).

Além disso, diversos estudos apresentaram resultados promissores na avaliação da qualidade ambiental, mostrando correlações significativas entre características magnéticas e poluição por metais pesados, uma vez que, muitas emissões antrópicas contêm finas partículas altamente magnéticas. A estreita relação da suscetibilidade magnética com a contaminação por metais pesados foi comprovada por análises combinadas de dados químicos e magnéticos por Heller (1998), Bityukova (1999), entre outros. Na maioria dos casos, partículas magnéticas e metais pesados podem ser produzidos juntos, mas formam partículas separadas, como foi comprovado por Kapicka (2001).

Nesse sentido, as medidas de suscetibilidade têm sido usadas para avaliar a distribuição espacial da poluição, por exemplo, em torno de usinas de energia (Kapicka, 1999) ao longo de estradas e rodovias (Hoffmann, 1999), transporte de poluentes por via aérea (Strzyszcz, 1999) ou água (Scholger 1998). Além disso, pesquisas têm indicado a extensão da contaminação com essa técnica em áreas estuarinas (Dong *et al.*, 2014), sedimentos fluviais (Zhang *et al.*, 2011), particulados urbanos (Guo & Li, 2017 ; Zong *et al.*, 2017), sedimentos lacustres (Gascón Díez *et al.*, 2017; Guan *et al.*, 2016; Yunginger *et al.*, 2018), sedimentos marinhos (Kim *et al.*, 2013; Ravisankar *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2017), entre outros.

Um método bastante eficaz para caracterizar anomalias antropogênicas ou geogênicas é a medição adicional da suscetibilidade ao longo de perfis de solo ou testemunhos de sondagem. Valores elevados no sedimento superficial, juntamente com um enriquecimento considerável ($>20 \times 10^{-8} \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$) no extrato superficial, provaram ser um indicador confiável de tensões antropogênicas (Hanesch & Scholger, 2002). Entretanto, as medições de suscetibilidade por si só não podem fornecer informações sobre qual contaminante especificamente atinge uma área em potencial. É então imprescindível realizar análises químicas no sedimento para a identificação e quantificação.

6. MATERIAIS E MÉTODOS

Para realização deste trabalho foram coletados 4 testemunhos sedimentares na Lagoa dos Patos e 1 no Rio Guaíba utilizando um testemunhador do tipo *piston core* (Fig. 20), sendo as amostragens distribuídas sobre as áreas centrais com

maiores cotas batimétricas e pontos próximos às principais drenagens (Fig. 1). Estes locais amostrados possibilitam monitorar as áreas de caráter deposicional além de facilitar a diferenciação da proveniência referente as principais drenagens que escoam para o interior lagunar.



Figura 20 - A) Liberação do testemunhados à gravidade. B) Recuperação do amostrador com guindaste. C) Abertura dos perfis e seleção das amostras para análises na Litoteca do Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica (CECO-UFRGS).

Os testemunhos foram amostrados a cada 2 cm, sendo as amostras separadas em dois lotes, onde as frações destinadas à análise por espectrometria gama foram acondicionadas em recipientes plásticos de 6 cm de diâmetro por 1,5 cm de altura, hermeticamente fechadas e cobertas com duplo filme plástico. O restante da amostra foi analisado quanto à granulometria, proveniência por Sm-Nd, susceptibilidade magnética e concentração de metais.

6.1 Granulometria

A determinação da granulometria ao longo da coluna sedimentar foi realizada com equipamento granulômetro da série Cilas, modelo 1180, pertencente ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. A interpretação segundo os procedimentos estatísticos de Folk & Ward (1957) e Shepard (1960) fornecem um parâmetro essencial para se compreender o ambiente de sedimentação e o regime hidrodinâmico em que o ecossistema encontra-se submetido.

6.2. Taxa de sedimentação com a utilização dos isótopos ^{210}Pb e ^{137}Cs

A taxa de sedimentação, para um período de aproximadamente 150 anos, foi calculada a partir da emissão de raios gamas dos radionuclídeos ^{210}Pb e ^{137}Cs , utilizando espectrometria gama. Para tanto foi utilizado um detector de germânio hiperpuro (modelo GMX 25190 P, da EG&G Ortec), equipado com uma blindagem de chumbo, ligado a analisadores multicanais SPECTRUM MASTERTM e eletrônica associada, pertencente ao Laboratório de Espectrometria Gama do Instituto Oceanográfico da USP.

6.3. Proveniência sedimentar através do sistema isotópico Sm e Nd

Para a obtenção destas análises, foram realizados trabalhos laboratoriais no Laboratório de Geologia Isotópica do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sendo estes divididos em quatro fases: pesagem (1), abertura (2), separação química (3) e espectrometria de massa (4). A etapa de espectrometria de massa determina as razões isotópicas dos elementos Sm e Nd através de um espectrômetro Micromass VG SECTOR 54 Multi-collector para obtenção da proveniência dos sedimentos.

Dois parâmetros foram utilizados nestes estudos: o ϵ_{Nd} , que compara a composição isotópica da rocha estudada com a composição ideal de um manto terrestre de composição condrítica (CHUR); e a idade modelo T_{DM} , que reflete a época de extração do magma formador de uma determinada suíte ígnea a partir do manto depletado.

6.4 Susceptibilidade Magnética

As medidas susceptibilidade magnética foram efetuadas no Laboratório de Paleomagnetismo da Universidade de São Paulo (USPMag). As amostras para análises magnéticas foram coletadas usando caixas plásticas cúbicas de 8 cm³,

colocadas lado a lado continuamente em cada testemunho, com orientação para o fundo em um total de 30 amostras de cada perfil.

A susceptibilidade magnética de cada amostra foi medida usando um sistema equipado com Kappabridge MFK1-FA (AGICO Ltda) com duas frequências de excitação 976 Hz (χ_{lf}) e 15616 Hz (χ_{hf}) em um campo de 200 A / m à temperatura ambiente (Fig. 21). A susceptibilidade magnética (χ , massa específica em $\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$) é um indicativo da contribuição de todos os materiais magnéticos para a amostra global.



Figura 21 - Susceptômetro MFK1-A Kappabridge (AGICO), utilizado para as medidas de susceptibilidade magnética.

6.5 Determinação de metais

A análise da concentração de metais foi realizada no LaQIMar (Laboratório de Química Inorgânica Marinha) da Universidade de São Paulo, Brasil, seguindo o protocolo EPA 3052 (USEPA, 1996). O método consiste em uma digestão total dos sedimentos por microondas com ácidos fortes. O primeiro passo é o uso de HNO_3 seguido de HF para diluir completamente os silicatos (Loring e Rantala, 1992). Posteriormente, é adicionado H_2O_2 para eliminar completamente a matéria orgânica. Para avaliar a precisão das análises, o material de referência certificado SS-2 EnviroMAT e os espaços em branco foram analisados seguindo o mesmo protocolo. As soluções das amostras foram analisadas pelo espectrômetro de emissão de plasma óptico acoplado indutivamente (ICP-OES) Varian modelo 710ES.

Capítulo 2 – Use of ^{210}Pb and ^{137}Cs in the assessment of recent sedimentation in Patos Lagoon, southern Brazil.

(Artigo publicado no periódico *Geo-Marine Letters*)

Congratulations

Dear MICHEL Ivanoff,

We are pleased to inform you that your article has just been published:

Title

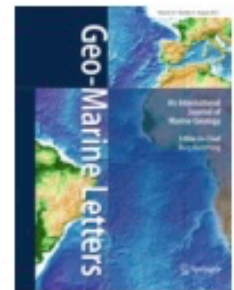
Use of ^{210}Pb and ^{137}Cs in the assessment of recent sedimentation in Patos Lagoon, southern Brazil

Journal

Geo-Marine Letters, (), 1-11

DOI

10.1007/s00367-019-00633-8



Use of ^{210}Pb and ^{137}Cs in the assessment of recent sedimentation in Patos Lagoon, southern Brazil

Michel Doeppe IVANOFF¹, Elírio Ernestino TOLDO JR.¹, Rubens Cesar Lopes FIGUEIRA² & Paulo Alves de Lima FERREIRA²

(1) Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Avenida Bento Gonçalves, 9.500, CEP 91509-900, Porto Alegre, RS, Brasil. (mdi.ivanoff@gmail.com; toldo@ufrgs.br).

(2) Departamento de Oceanografia Física, Química e Geológica, Universidade de São Paulo. Praça do Oceanográfico, 191, CEP 05508-120, Cidade Universitária, São Paulo, SP, Brasil (rfigueira@usp.br; paulo.alves.ferreira@hotmail.com).

Abstract

In this study, the sedimentation conditions of Lagoa dos Patos, southern Brazil, were analyzed by applying ^{210}Pb and ^{137}Cs geochronological methods on four geological cores. The sedimentation rates showed a decreasing north-to-south pattern, indicating a strong influence of the Guaíba River discharge (the main Patos Lagoon tributary) on the transport of sediments into the interior of the lagoon. Core PT2 (north) had the highest sedimentation rate (of the order of 7.0 mm.y^{-1}), while the central and central-southern drilling sites (PT4 and PT7) presented roughly lower values that corresponded to rates of 5.5 and 4.4 mm.y^{-1} , respectively. This decreasing trend was reversed at the southernmost site (PT8), which showed a 4.8 mm.y^{-1} rate due to the joint influence of the Camaquã River and São Gonçalo Channel discharges, combined with higher flocculation associated with the site's proximity to the estuary. Significant interannual oscillations of the sedimentation rates were observed when the CRS model was applied to the ^{210}Pb data. In general, the rates were higher in periods of higher precipitation, whereas the opposite took place in drier periods. The correlation between these anomalies and El Niño-Southern Oscillation (ENSO) events was identified. During El Niño years, the sedimentation rates increased by 135% in the northern sector (PT2); in the central and central-southern sectors, the rates increased by 164% (PT4) and 170% (PT7), respectively, while there was an increase of 262% to the south of the lagoon as observed at site PT8.

Keywords: sedimentation rate, geochronology, sedimentation in coastal lagoons.

1. Introduction

Coastal lagoons are relatively shallow water bodies separated from the ocean by sandy and generally alongshore-oriented barriers. They are often sporadically connected to the ocean by one or more restricted channels that rarely exceed a few meters deep (Kjerfve *et al.*, 1997).

From an evolutionary point of view, these coastal environments are related to eustatic sea-level variations. Some coastal lagoons are associated with ancient valleys flooded by post-glacial transgressions; others are linked to the preservation of ancient barriers; and, in some cases, the lagoons were recently conceived by the alongshore growth of relatively new sandy barriers (Kjerfve & Magill, 1989).

Like most coastal environments, these lagoons have developed during the last 7,000 years when sea level rise became stable compared to its last transgressive event, there after beginning to decrease during the Holocene (Phleger, 1981). They are often short-lived relatively to geological time scales due to rapid

sedimentation, tectonic activity, or eustatic sea-level changes (Martin & Dominguez, 1994).

Most coastal lagoons are maintained only by the protection provided by sandy barriers, with some cases where intense modifications due to human settlements perform this function such as in Chesapeake Bay (Gibbons & Nicholls, 2006) and Gold Coast (Cooper & Lemckert, 2012). Several human activities such as housing, port activity, agriculture, and power generation are potential threats to the quality of these environments because of the consequent changes in sediment production and accumulation.

Therefore, studies on sedimentation rates become relevant for the understanding of element input dynamics, which involves several sources for the coastal environment. Furthermore, the understanding of the interaction between human activities and coastal regions provides support for their management. Thus, this work aims to understand the depositional dynamics of Patos Lagoon by analyzing average rates of recent sedimentation and their interannual variability using both ^{210}Pb and ^{137}Cs geochronological methods.

2. Study Area

2.1 Climatology and Hydrology

Patos Lagoon is the largest lagoon system in South America and the world's largest choked lagoon (Kjerfve, 1986), presenting a surface area of 10,227 km², a NE-SW main axis that is over 180 km long, and an average depth of 5m. Located in the southern portion of Brazil between 30° - 32°S and 50° - 52°W, the lagoon is connected to the Atlantic Ocean by a single channel (Fig. 1), where the tide has a small amplitude (Andrade *et al.*, 2018).

The study area consists of a temperate climate with large interannual variability associated to El Niño-Southern Oscillation (ENSO) events. According to the Köppen-Geiger climate classification (presented by Strahler & Strahler, 1987), this region is classified as Cfa, which is characterized by a temperate rainy climate consisting of regularly distributed rains throughout the year. The average temperatures of the hottest and coldest months are higher than 22 °C and -3 °C, respectively.

The tributaries of Patos Lagoon (Fig. 1) belong to the Atlantic Basin and drain a total area of more than 200,000 km², divided into two large complexes consisting of several sub-basins.

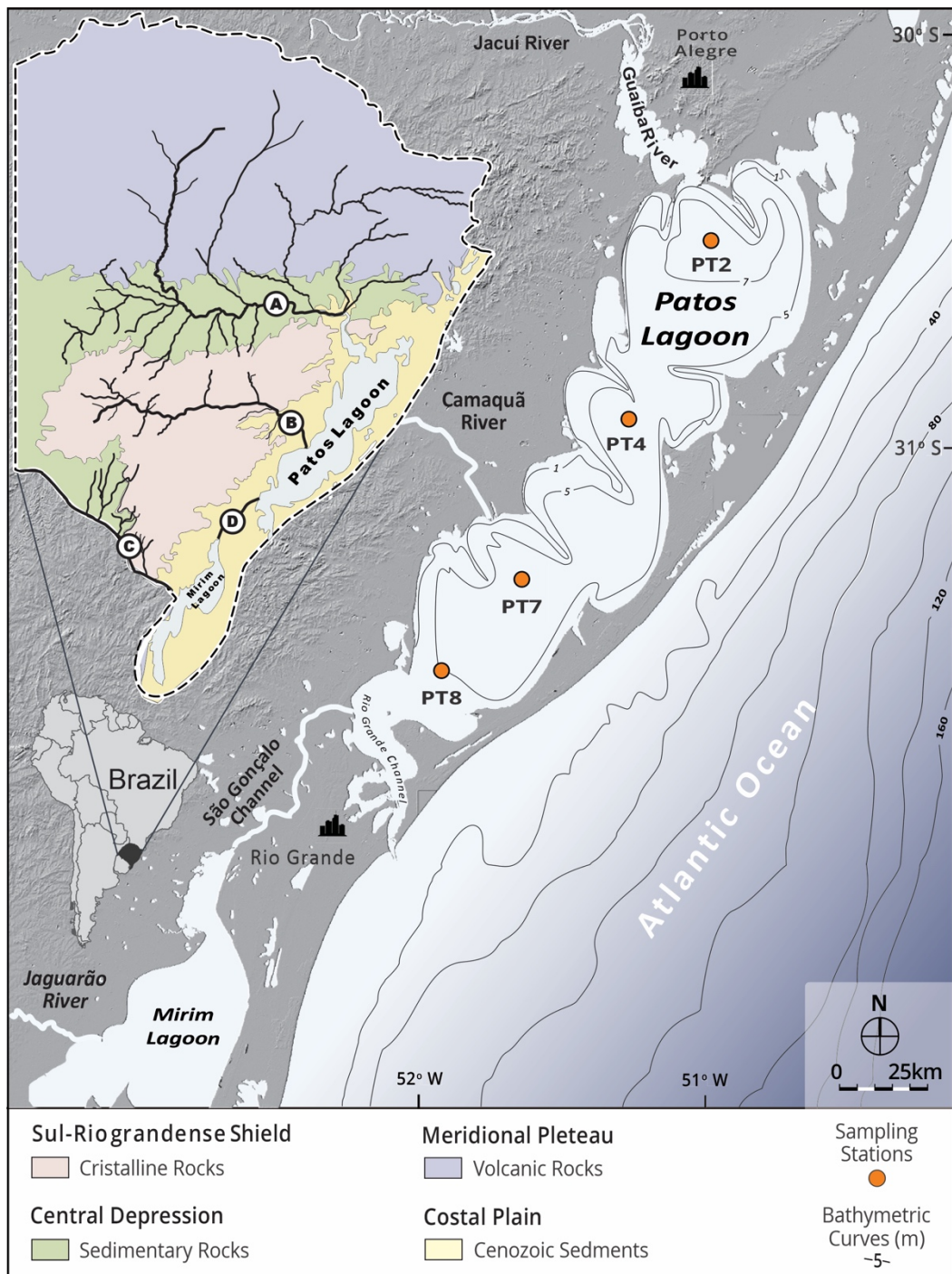


Fig. 1 Map of the study area with the location of the drilling sites. Modified from Baitelli (2012)

The largest of these complexes is the Patos Complex (drainage area of 150,432 km²), formed by the Vacacaí, Taquarí, Jacuí, Caí, Sinos, Gravataí, Camaquã and Guaíba rivers, and creeks. The other one is the Mirim Complex, which is formed by the Mirim Lagoon, the Jaguarão, Taquari, Cebolati, Piratini and Pelotas rivers, the Sarandi Grande, Santa Vitória, Rio Grande and Grande creeks, and by the São Gonçalo Channel. Its drainage area corresponds to 51,194 km² (Vieira & Rangel, 1988).

In the northern region, the main tributary is the Guaíba River, which receives

freshwater from the Jacuí-Taquarí river system that is responsible for 85% of the total mean freshwater intake into the lagoon interior. In the north of Patos Lagoon, the annual freshwater contribution is equivalent to $2,400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Seasonal variations range from $700 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ during the summer (from late December to March) to $3,000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ during the spring (from September to early December). In the central region, the main tributary is the Camaquã River, responsible for the remaining 15% of freshwater (Vaz *et al.*, 2006).

In the central area of the estuary, the São Gonçalo Channel (70 km long) connects the Patos to the Mirim Lagoon (area of $3,749 \text{ km}^2$), forming the Patos-Mirim system (Fig. 1). Although information on the freshwater contribution of this channel to the Patos Lagoon estuary is restricted, estimates indicate an average river discharge of $700 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Moller & Castaing, 1999).

The rivers that flow into the lagoon exhibit a typical pattern of mid-latitude rivers, with high discharge in the late winter and early spring, followed by low to moderate discharge during the summer and fall. However, there is significant rainfall variability in the Patos Lagoon drainage basin due to large-scale events such as the ENSO. During El-Niño years, the rainfall periods prevail and, according to Möller *et al.* (1991), discharge peaks of the order from $12,000$ to $25,000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ can occur associated with this phenomenon.

Complementary and correlated to the average flows of the main rivers is the residence time of the water inside the lagoon body. This residence time was calculated by Toldo Jr. *et al.* (2000), resulting in approximately 108 days.

Another important aspect of coastal lagoon hydrodynamics is the wave height and frequency. Toldo Jr. *et al.* (2006) made wave predictions for eleven sites of Patos Lagoon by using wind measurements from four stations. Since northeastern winds prevail in the summer and spring, the direction of the predominant waves on the lagoon's western side is NE/ENE, with mean significant wave heights ranging from 0.5 to 0.7 m and periods between 2.7-3.3 s.

On the eastern side of the lagoon, the prevailing winds are from WNW and WSW. During the winter and fall, the winds drive the highest maximum heights in the lagoon, with values corresponding to 1.6 m and a period of 4.8 s; the significant wave heights are between 0.4-0.8 m and the periods between 2.4-3.4 s. These parameters play determining roles in the sedimentation of the lagoon interior as demonstrated by Toldo Jr. *et al.* (2006).

2.1 Geological Context

The Coastal Plain encompassing the studied area was formed during transgressive-regressive events induced by the Quaternary eustatic sea-level oscillations. As a consequence of these variations, four Lagoon-Barrier depositional systems were formed: from the oldest to the most recent, those systems are called Lagoon-Barrier I, II, III, and IV. Barriers I to III are from the Pleistocene, and barrier IV is from the Holocene. The isolation of the Patos-Mirim Lagoon system initiated with the formation of Barrier III during the late Pleistocene, approximately 120,000 years ago (Tomazelli *et al.*, 2000).

The sediments that constitute the shallow bottom along the west side of the lagoon are poorly selected and their sizes range between fine sand and gravel, while on the eastern margin the sands are predominantly thin and are very well selected (Martins *et al.*, 1989). The lagoon bottom sediments have less than 4% of sand and mainly consist of silt and clayey silt in the northern half of the lagoon, while the southern half is characterized by silty clay. The mud deposited on the lagoon bottom occurs at depths below the base level for wave erosion, which rarely exceeds 4 m deep (Toldo Jr. *et al.*, 2006).

The sediments that enter the coastal lagoon interior originate from the contribution of the Camaquã River and São Gonçalo Channel especially in its southern portion; to a lesser extent, there is an input of marine sediments from the continental shelf through the Rio Grande Bar (Hartmann & Schettini, 1991). The rivers that constitute the Camaquã basin flow over the Crystalline Shield (Fig. 1), which is composed of intrusive and metamorphic igneous rocks from the Southern Brazilian Shield. Those rivers are mostly mature, with reduced erosive activity (according to Villwock *et al.*, 1972).

In addition to these sources, the Southeastern Hydrographic Basin located to the north of the state stands out, which is composed of the Jacuí and Guaíba rivers (Fig. 1). It is the largest basin from the State of Rio Grande do Sul (RS) and the largest sediment source to Patos Lagoon, presenting an average flow of $1,483 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Vaz *et al.*, 2006). This hydrographic network flows through the region composed of the Paleozoic sedimentary and Mesozoic volcanic rocks from the Paraná Basin (Tomazelli *et al.*, 2000), located in the central and northern portions of RS, respectively (Fig. 1).

Indirect estimates of the solid suspended discharge from the Guaíba River, performed by Baisch (1994) and Rigon (2009), suggest an average annual

contribution of 1×10^6 and 4×10^6 t.year⁻¹ of suspended sediments, respectively. Andrade Neto *et al.* (2012) estimated the average annual discharge of suspended solids and found it was equivalent to 1,100,000 t.year⁻¹.

3. Material and Methods

Four geological survey cores were collected in Patos Lagoon at sites that were representative of the sedimentary dynamics (Fig. 1), so that core PT2 – located to the north of the lagoon – is in an area with direct river contribution from the Guaíba River; core PT4 is in an intermediate portion regarding river discharge sources; and cores PT7 and PT8 are located in the south, in the vicinity of the Camaquã River and São Gonçalo Channel, which are main tributaries that flow into the southern sector of Patos Lagoon (Fig. 1).

The sedimentation rate was obtained by gamma spectrometry performed at the Oceanographic Institute from the University of São Paulo (USP). A coaxial hyper-pure germanium detector from the GEM series was used, EG&G ORTEC (25190P) model, with a resolution of 1.9 keV at the ⁶⁰Co photopeak of 1,332.5 keV.

The sedimentation rates were determined by ²¹⁰Pb activity ($T_{1/2} = 22.26$ years), a natural radionuclide that belongs to the radioactive decay series of ²³⁸U and ¹³⁷Cs ($T_{1/2} = 30.17$ years), which is an artificial radionuclide produced by the ²³⁵U fission.

²¹⁰Pb is incorporated into the sediment by the ²²⁶Ra natural decay and remains in radioactive equilibrium with it, the so-called “supported ²¹⁰Pb” (in equilibrium). It is analyzed by the gamma spectrometry of ²¹⁴Bi, with a photo peak of 609 keV.

In many environments, the element ²¹⁰Pb is in excess when compared to its precursor ²²⁶Ra. This happens due to the natural cycle of the ²²²Rn emanation through the soil and rocks, and due to its subsequent decay to ²¹⁰Pb. When absorbed by aerosols, ²¹⁰Pb returns to the terrestrial and aquatic environments through its fallout. This ²¹⁰Pb input source in the sediment is in excess relative to ²²⁶Ra, which is denominated as “unsupported ²¹⁰Pb”, and its concentration decreases with depth in sedimentary deposits. The relationship between these elements provides the basis for the sedimentation rate determination. The ²¹⁰Pb_(unsupported) activity is determined by directly counting its photo peak at 46.5 keV in gamma spectrometry.

The CRS model (Appleby, 2001; Lubis, 2006) was used for the ²¹⁰Pb age and sedimentation rate determinations. This model is applied by assuming that the content of ²¹⁰Pb incorporated in sediments is constant over time, regardless of the changes in the amount of sedimentary input and variations in the ²¹⁰Pb activity. The

model thus makes it possible to estimate interannual differences in sedimentation rates.

The presence of ^{137}Cs in the environment occurs due to the explosion of atomic bombs or accidents in thermonuclear power plants. The remaining radioactive material was incorporated into the air masses from the troposphere (Kathren, 1984). In the Southern Hemisphere, the peak of nuclear tests took place between the end of the Second World War and the Cold War, beginning in 1945 and having its peak in 1963 (UNSCEAR, 2000).

These events were the dominant input source of this radionuclide across the troposphere, which corresponds to the process called “fallout”. The calculation of sedimentation rates by the analysis of ^{137}Cs in sedimentary columns is obtained considering the existence of a peak in ^{137}Cs (global fallout in 1963), which is used as a reference for the calculation of the integrated sedimentation rate of the column.

4. Results

The levels of ^{210}Pb (total), ^{226}Ra , and ^{137}Cs acquired in Patos Lagoon were used to determine the sedimentation rates at each studied site, and the results are shown in Table 1.

Table 1 – Sampling and gamma spectrometry data from cores PT2, PT4, PT7 and PT8 in Patos Lagoon *S.R. = Sedimentation rate.

Core	Length (m)	Water Depth (m)	*S.R. ^{210}Pb (mm.y ⁻¹)	Mass Acumulation (g.cm ² .y ⁻¹)	S.R. ^{137}Cs (mm.y ⁻¹)
PT2	1.35	7.22	7 ± 1.2	0.62 ± 0.11	5.4 ± 1
PT4	3.79	5.69	5.5 ± 1	0.55 ± 0.1	5 ± 0.1
PT7	3.55	6.44	4.4 ± 0.8	0.4 ± 0.07	3.8 ± 1
PT8	0.71	5.12	4.8 ± 0.5	0.65 ± 0.09	5.4 ± 0.1

The ^{210}Pb results from core PT2 showed that this site had the greatest sediment deposition when compared to the other analyzed sites, presenting an average sedimentation rate of 7 ± 1.2 mm.y⁻¹ and a mass accumulation index of 0.62 ± 0.11 g.cm⁻².y⁻¹.

^{137}Cs presented a maximum activity of 5.48 ± 0.13 Bq.kg⁻¹ between 20 and 28 cm deep (Fig. 2), the mean depth interval that corresponded to 1963, thus providing a mean sedimentation rate of the order of 5.4 ± 1 mm.y⁻¹. The observed maximum ^{137}Cs activity over a range of 8 cm in the sedimentary column may be related to its vertical migration, which is usually associated with the diffusive transport through pore water or pore-water vertical convection in sediments (Ajayi & Raji, 2010; Ligeró

et al., 2005).

Core PT4 had a ^{210}Pb mean sedimentation rate of $5.5 \pm 1 \text{ mm.y}^{-1}$ and a mass accumulation index of $0.55 \pm 0.1 \text{ g.cm}^{-2}.\text{y}^{-1}$. ^{137}Cs showed a maximum activity of $5.87 \pm 0.14 \text{ Bq.kg}^{-1}$ at 26 cm deep, resulting in a rate of $5 \pm 0.1 \text{ mm.y}^{-1}$, therefore showing an excellent correlation between the sedimentation rates computed from the ^{210}Pb and ^{137}Cs data.

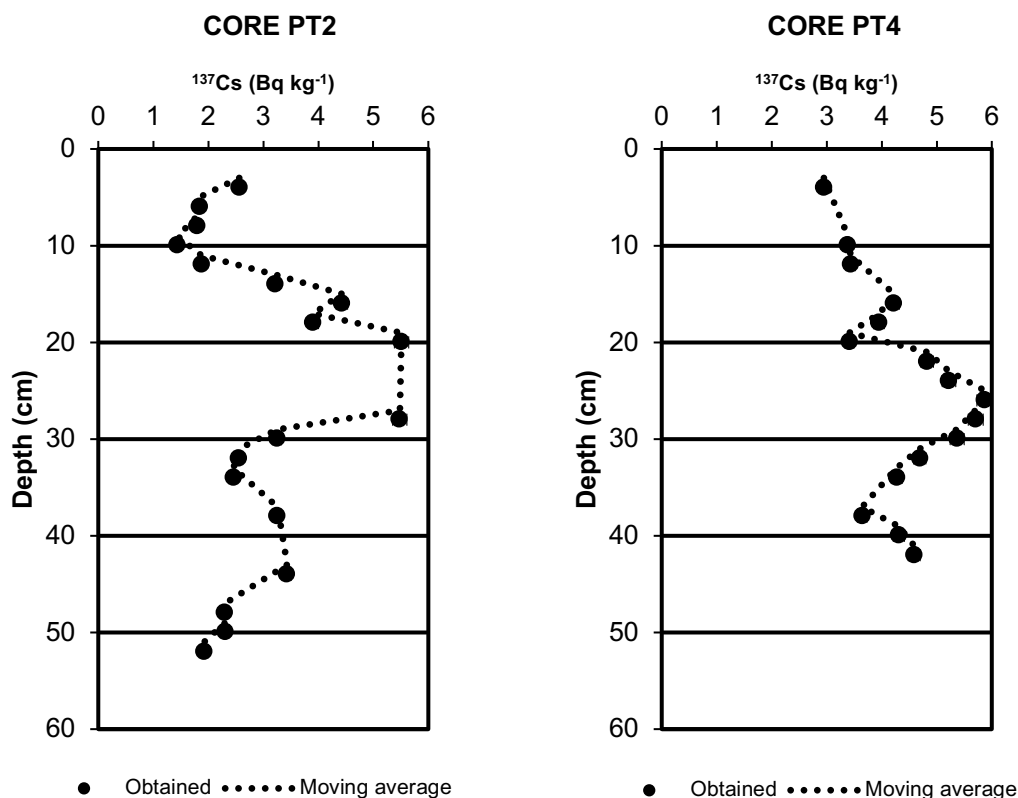


Fig. 2 ^{137}Cs activity in cores PT2 and PT4

The ^{210}Pb results from core PT7 indicate that this site had the lowest sedimentation rate among all assessed drilling sites, presenting a mean rate of $4.4 \pm 0.8 \text{ mm.y}^{-1}$ and a mass accumulation index of $0.4 \pm 0.07 \text{ g.cm}^{-2}.\text{y}^{-1}$. The highest ^{137}Cs activity – of the order of $5.64 \pm 0.13 \text{ Bq.kg}^{-1}$ occurred in the depth range from 20 to 28 cm (Fig. 3), suggesting a mean sedimentation rate of $3.8 \pm 0.1 \text{ mm.y}^{-1}$ and a ^{137}Cs vertical migration very similar to what was observed in core PT2.

Core PT8 represented the southernmost site of Patos Lagoon, where the mean sedimentation rate (according to the ^{210}Pb method) and the mass accumulation index were equal to $4.8 \pm 0.5 \text{ mm.y}^{-1}$ and $0.65 \pm 0.09 \text{ g.cm}^{-2}.\text{y}^{-1}$, respectively. Similarly to what was observed in the other cores, the PT8 maximum ^{137}Cs activity (Fig. 3) occurred at 20 cm deep, which corresponded to $3.92 \pm 0.27 \text{ Bq.kg}^{-1}$ and resulted in a sedimentation rate of $5.4 \pm 0.1 \text{ mm.y}^{-1}$.

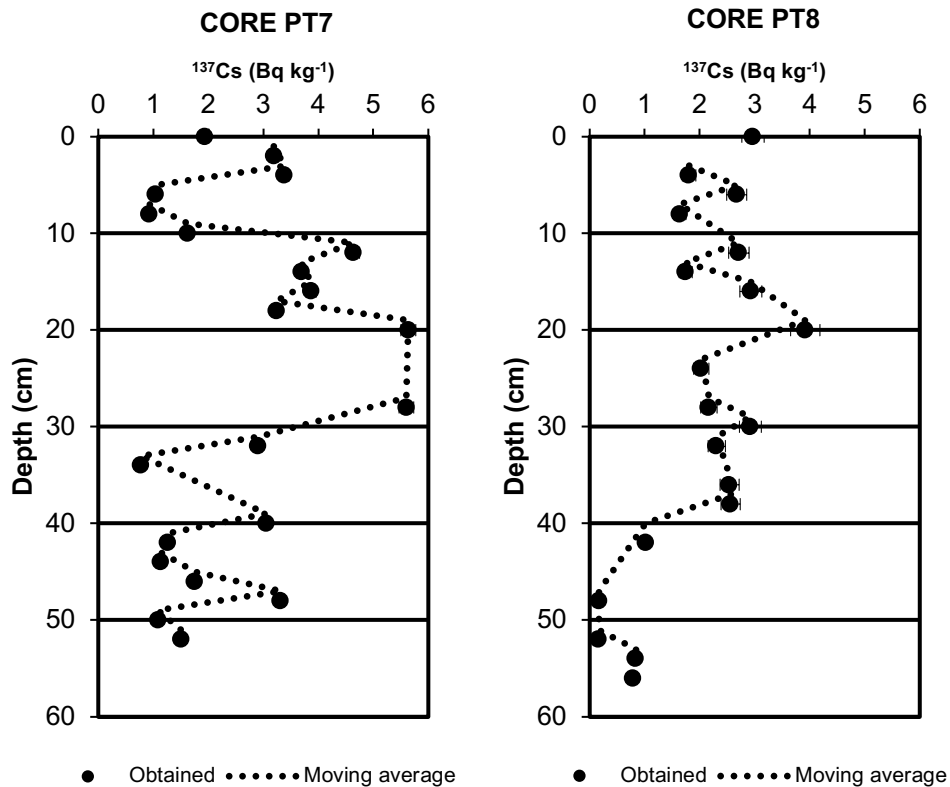


Fig. 3 ^{137}Cs activity in cores PT7 and PT8

5. Discussions

The sedimentation rates obtained with the combined use of the radioisotopes ^{137}Cs and ^{210}Pb showed a good agreement (Tab. 1). However, at the PT8 site, the sediment accumulation rate determined from ^{137}Cs – even though similar to the other sites analyzed through this method – was almost 15% higher than the rate determined from ^{210}Pb . A possible explanation for this result is the loss of surface and ^{210}Pb -associated sediments through the natural erosion induced by bottom remobilization before 1963, the year corresponding to the maximum ^{137}Cs fallout. On the other hand, core PT2 presented a ^{210}Pb sedimentation rate about 30% higher than the one obtained from ^{137}Cs , but within the presented margin of error for both radionuclides. This core probably expresses the condition of ^{137}Cs vertical migration (Fig. 2), consequently reducing the rates measured through this method.

Furthermore, the ^{210}Pb data indicated that the mean sedimentation rate of $7 \pm 1.2 \text{ mm.y}^{-1}$ (obtained from core PT2) was the highest among all analyzed sites, explained by the proximity of this drilling site to the Guaíba River, the main tributary of Patos Lagoon. According to Vaz *et al.* (2006), the Guaíba River basin contributes around 60% to the mean annual discharge of Patos Lagoon. In addition to it, the

larger depth of this area reduces the wave-driven turbulence on the bottom, favoring sedimentation (Tab. 1).

In a study developed by Tavora *et al.* (2019), it was found that the suspended solid concentrations were higher in the northern part of the lagoon and decreased towards the south. When comparing the main drivers of the lagoon circulation (wind and the Guaíba River discharge), the maximum sediment inputs occurred after peaks of river discharge combined with strong northeasterly (NE) winds, suggesting that the freshwater inflow and the wind in certain directions are the main sediment transport mechanisms in Patos Lagoon.

On the other hand, core PT4 presented an average sedimentation rate of $5.1 \pm 1 \text{ mm.y}^{-1}$, which is lower than what was found in the northern portion. This depositional behavior may be mainly explained by its larger distance from the Guaíba River mouth in addition to the absence of direct drainage at this lagoon site.

The analysis of core PT7, although situated in a site influenced by the Camaquã River, showed that this lagoon's location had the lowest deposition rate among all studied sites, presenting an average rate of 4.4 mm.y^{-1} (Fig. 1). An explanation for this finding lies in the different hydrodynamic characteristics between the PT4 site and the northern portion of the lagoon, which is directly influenced by the Jacuí-Guaíba River basin. The Camaquã River presents an average discharge of $307 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, considerably lower than the Guaíba River average flow, which corresponds to $1,493 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (Torres, 2000). Moreover, the Camaquã River basin has less agricultural activity, thus reducing the production and deposition of sediments that are unloaded into the lagoon bottom.

The southernmost portion of Patos Lagoon was analyzed through core PT8, which had a mean sedimentation rate of $4.8 \pm 0.5 \text{ mm.y}^{-1}$, a slightly higher rate than the one found for core PT7, also located in the south. This is probably due to the convergence of the Camaquã River remaining sediments, which in case did not settle near PT7 and followed the lagoon's flow towards its mouth, thus later depositing in the PT8 region. In addition to this possibility, the combined effect of the São Gonçalo Channel sediment input and higher flocculation (induced by the saline intrusion near the estuary) favors the sedimentation to the south.

Findings related to sedimentation rates in other studies carried out in coastal lagoons in southern Brazil show similarities to the rates found in Patos Lagoon. In general, they indicate that the sediment deposition nature in these water bodies presents an order of magnitude of a few millimeters per year.

Dillenburg & Burnett (1995) obtained rates between 4.2 and 4.4 mm.y⁻¹ for the Tramandaí Lagoon, located near Patos Lagoon. Ivanoff *et al.* (2017), in a study carried out in the Itapeva Lagoon, which is connected to the Tramandaí Lagoon by fluvial channels, found sedimentation rates ranging from 2.4 to 3.2 mm.y⁻¹. Both mentioned studies used the ²¹⁰Pb method.

The sedimentation rates calculated by Martins *et al.* (1989) using ²¹⁰Pb had values between 3.5 and 8.3 mm.y⁻¹ for the Patos Lagoon. In a more recent study conducted by Niencheski *et al.* (2014) in the Patos Lagoon estuary, a local sedimentation rate varying from 3.0 to 3.4 mm.y⁻¹ was estimated, which is close to the rates presented in this study.

Furthermore, the chronology derived from the application of the CRS model (Appleby, 2001; Lubis, 2006) to the ²¹⁰Pb data from this study allowed the detection of events with exceptionally high deposition rates over the last decades, mainly found in the northern and southern sectors (Figure 4).

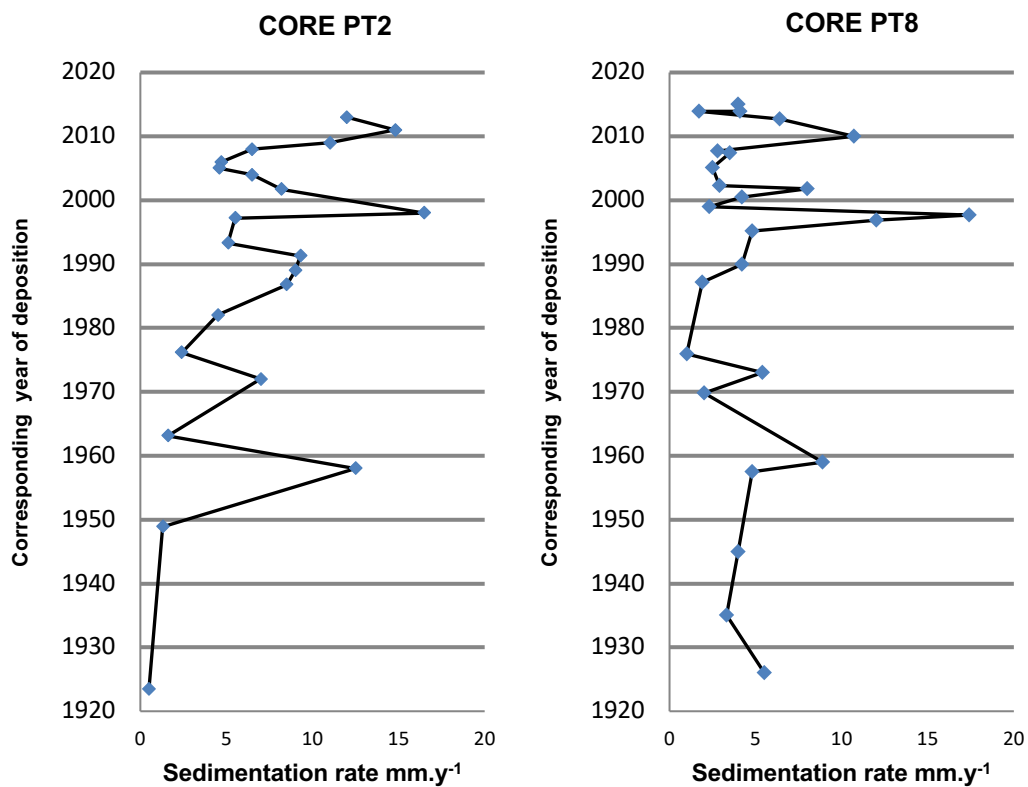


Fig. 4 Variation of the sedimentation rates from the last decades obtained from the application of the ²¹⁰Pb method (CRS model) on cores PT2 (near the Guaíba River mouth) and PT8 (near the mouths of the Camaquã River and São Gonçalo Channel).

Data from cores PT2 – located near the Guaíba River mouth – and PT8 – located in an area with influence from the São Gonçalo Channel and Camaquã River (Fig. 1) – show that the sedimentation rates at these sites were highly variable (Fig.

4). This variability suggests a combined effect of the increased sediment supply from rivers during periods of higher precipitation, and the associated water level increase, consequently causing an enlargement of the internal accommodation space. This situation alternately takes place with periods of lower precipitation and river discharge, thus causing a water level decrease that, associated with greater wave-driven turbulence on the bottom, would induce a reduction in the sedimentation rates.

Moreover, the analysis of Figures 4 and 5 revealed that, in cores PT2 and PT8, which were located in areas directly influenced by river discharges, the time intervals of 1957-1958, 1997-1998, and 2009-2010 had significantly higher sedimentation rates in comparison to their corresponding site average value.

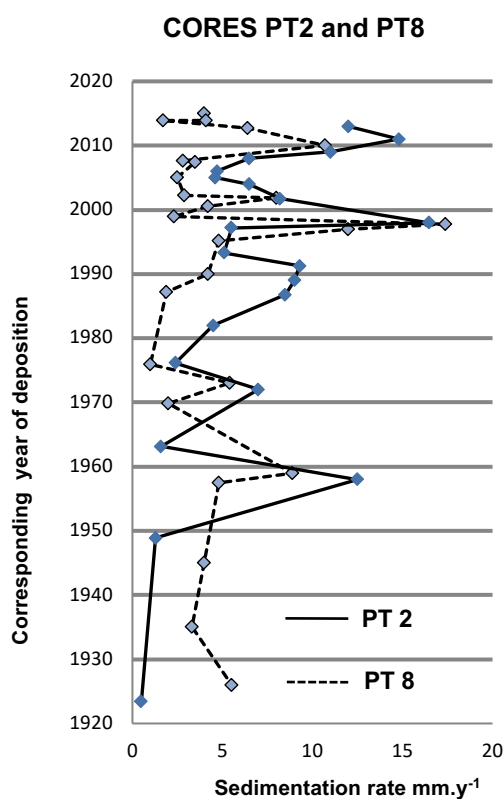


Fig. 5 Comparison between the sedimentation rates from the last decades obtained from the application of the ²¹⁰Pb method on cores PT2 and PT8, which were located near river mouths

In percentage terms, it can be observed between 1957 and 1958 that the rates reached 12.5 mm.y⁻¹ in core PT2 and 8.9 mm.y⁻¹ in PT8, representing an increase of 78 and 85 % in the average rates, respectively. Between 1997 and 1998, an even greater increase was observed, with sedimentation values jumping to 16.5 and 17.4 mm.y⁻¹ in cores PT2 and PT8, respectively, representing extreme increments of 135 and 262 % in the sedimentation rates, respectively. A similar increase between 2009 and 2010 was also evident, although to a lesser extent.

The periods in which the sedimentation rates increased were directly correlated to natural climatic fluctuations since then the southern Brazil was influenced by El Niño (according to the Climate Prediction Center – CPC – from the National Weather Service; NOAA, 2017). ENSO events are relatively discrete weather patterns that occur at time intervals from three to seven years. This phenomenon is a result of the warming of the Pacific basin associated with the weakening of the trade winds. El Niño episodes cause above-average rainfall in southern Brazil (Fig. 6), Uruguay, and northeastern Argentina (Grimm *et al.*, 1998; Philander, 1990; Ropelewski & Halpert, 1987, 1989).

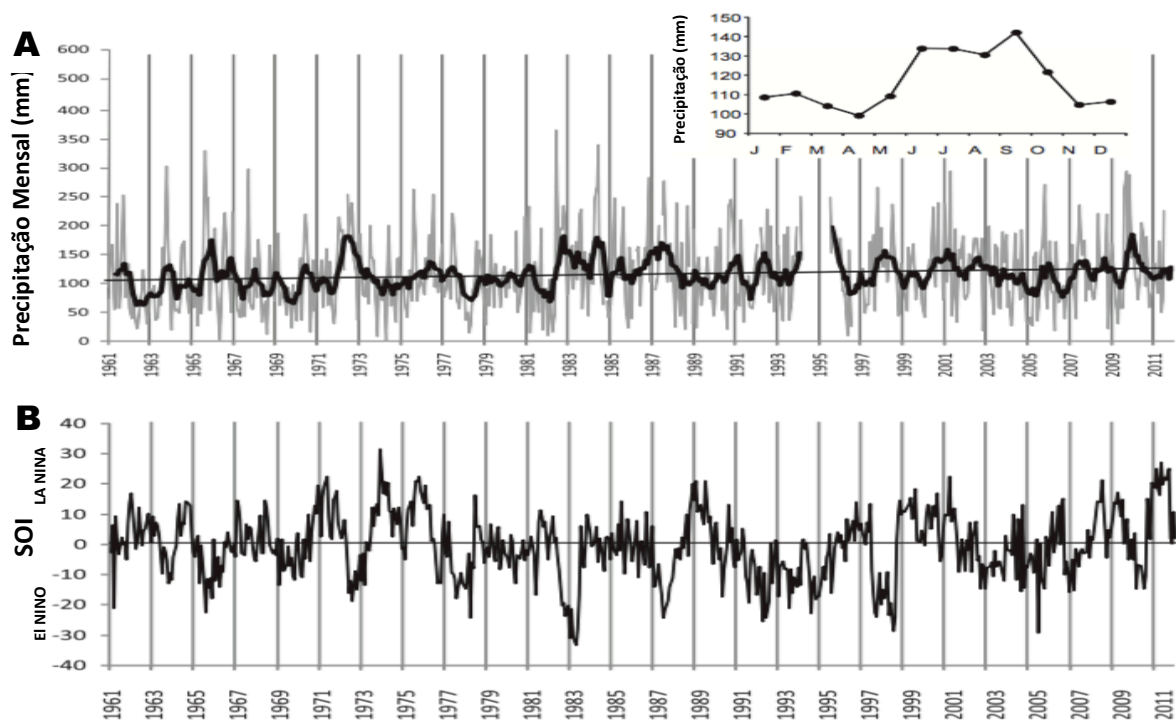


Fig. 6 a) Time series of the monthly precipitation in the city of Porto Alegre (South of Brazil) for the period between 1961 and 2011. b) Southern Oscillation Index (SOI) for the same period, demonstrating the tendency of precipitation increase and decrease during El-Niño (negative SOI) and La-Niña (positive SOI) years, respectively. Modified from Pasquini *et al.*, 2012

This phenomenon directly affects the flow of the main rivers from southern Brazil. Other rivers from the south of the continent also experience the influence of ENSO events as confirmed by studies conducted in the Negro and Paraguai rivers (Robertson & Mechoso, 1998) as well in the Uruguay River (Krepper *et al.*, 2003). This climatic oscillation is a contributor to the sedimentary load input into the rivers of the southern region, including those that discharge into the Patos Lagoon. In the southern portion of Patos Lagoon near its estuary, Marques *et al.* (2010) showed a direct relationship between the river discharge and the suspended solid input. The

authors used numerical simulations to compare the suspended solid transport towards the Atlantic Ocean during a strong El-Niño event (1998) and a neutral year (1999), thus confirming the increased flow during climate anomalies.

In order to analyze the influence of extreme events on the transport of sediments to the Patos Lagoon interior, Jung (2017) studied the average sediment export during two significant El-Niño events (1998 and 2002). The results showed an average discharge (considering the main tributaries) of approximately $3,900 \text{ m}^3 \cdot \text{y}^{-1}$, which corresponds to 167% of the historical average in relation to the periods without the El-Niño influence. The extreme flows found in an El-Niño condition indicated that the Guaíba River exported near 27 times more suspended sediments at its maximum flows than its average rate. The Camaquã River, on the other hand, increased its export rate during this event by up to 30 times, while the São Gonçalo Channel had an increase of up to six times compared to its average rates.

On the other hand, cores PT4 and PT7 showed less variable sedimentation rates over time, probably due to low river discharge. However, from the end of the 1970s to the beginning of the 1980s, the core PT4 region showed a remarkable increase in sedimentation, reaching a maximum rate of $14.5 \text{ mm} \cdot \text{y}^{-1}$, which represents an increase of 164 % when compared to its average value. During this relatively long period of sedimentary accretion, the area may have been directly influenced by the El-Niño event that took place between 1982 and 1983.

In addition, the rise in the accumulation rates in core PT4 from 1978 to 1984 is consistent with the peaks of higher sedimentation detected for the same period in core PT2, demonstrating the influence of the Guaíba River in this area to some extent, albeit on a smaller scale (Fig. 7).

A similar behavior also occurred in core PT7, where the variability of the deposition peaks showed relatively harmonic fluctuations except in 1991. During this year, southern Brazil experienced again a strong El-Niño event (NOAA, 2017), and thus the sedimentation rate increased in approximately 170 %, reaching $11.9 \text{ mm} \cdot \text{y}^{-1}$. This increase was also found in cores PT2 and PT4.

Additionally, it is important to highlight that the period of maximum precipitation in the southern region of Brazil occurs during the austral winter and spring (Fig. 6), precisely during the periods when the land is being prepared for planting the main agricultural crops in the basins that flow in to Patos Lagoon. As examples, the land preparation for corn and soybean planting is performed between August and September, and from October to December, respectively.

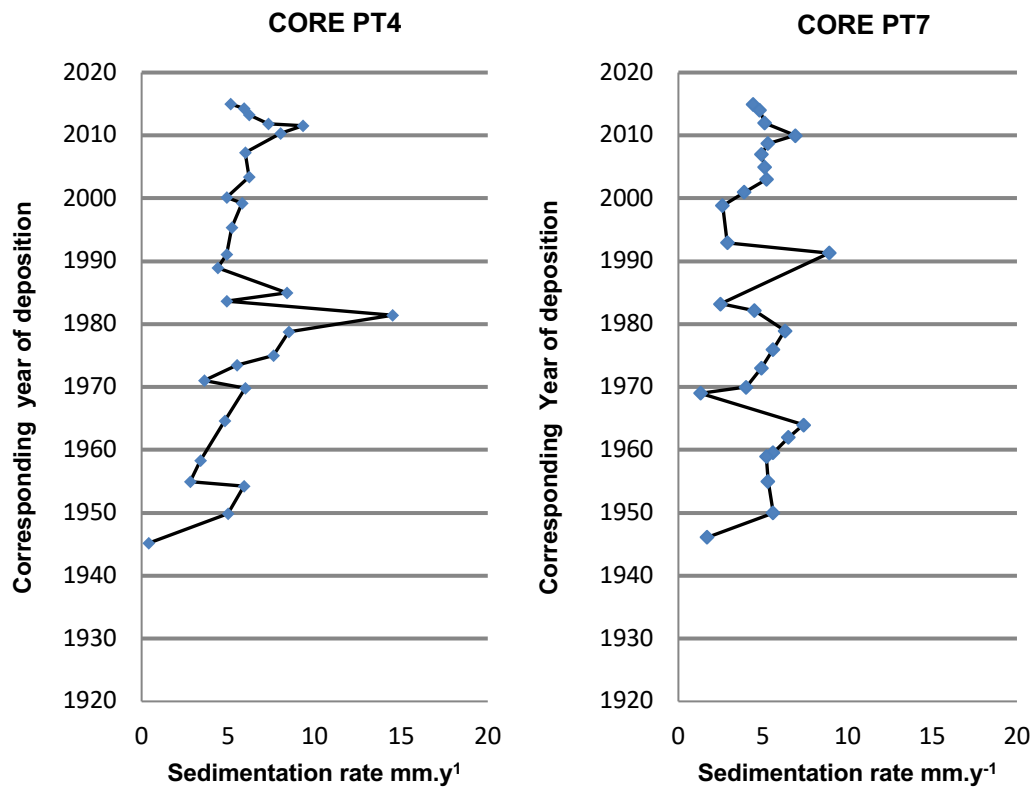


Fig. 7 Variation of the sedimentation rates from the last decades obtained from the application of the ²¹⁰Pb method on cores PT4 and PT7

In recent years, an advance of soybean crops over grazing areas has been observed, thus encompassing the drainage basins of the Jacuí, Guaíba, and Camaquã rivers; and the Plateau and Central Depression regions, also reaching the southern portion of the state. It is estimated that, between 2012 and 2013, the soybean planted area have increased over 470,241 hectares previously used for cattle grazing (FARSUL, 2013). Only considering the cities from the southern region of RS, the increase in the soybean planted area was 48% between 2010 and 2013 (EMATER-RS/ASCAR, 2014). In future terms, intensive land use should favor extreme sedimentation events due to its increased exposure. In addition to that, higher precipitation mainly during El-Niño years would contribute to greater sedimentary load flowing into the coastal lagoon.

6. Conclusions

The use of ²¹⁰Pb demonstrated that the sedimentation rates along the lagoon bottom were decreasing in a north-to-south direction. Higher sedimentation rates were found in the northern cores (PT2: 7 mm.y⁻¹; PT4: 5.5 mm.y⁻¹) relative to the southern positions (PT7: 4.4 mm.y⁻¹; PT8: 4.8 mm.y⁻¹). These results suggest that most of the sediments transported by the Guaíba River are deposited to the north of

Patos Lagoon.

The results obtained from the ^{137}Cs data had sedimentation rates very close to those acquired from the ^{210}Pb data, thus showing that ^{137}Cs is a good independent tracer to validate ^{210}Pb sedimentation rates.

The CRS model applied to the ^{210}Pb data demonstrated that the El-Niño climatic event was closely linked to periods of higher sedimentary deposition. Cores PT2 and PT8, directly influenced by river discharge, were more sensitive to the sedimentation increase in higher precipitation periods, while the more central positions of the lagoon presented a more stable sedimentation.

The increase in intensive land use by agricultural activity in southern Brazil is a factor that will tend to favor periods of extreme sedimentation due to higher soil exposure during planting periods, contributing to erosive processes.

7. References

Ajayi, I.R. & Raji, A.T. (2010) Evaluation of the ^{137}Cs activity-depth profiles by the diffusion-convection model. *International Journal of Physical Sciences*, 5 (2): 154-157.

Andrade, M.M., Toldo Jr. E.E. & Nunes, J.C.R. (2018) Tidal and subtidal oscillations in a shallow water system in southern Brazil. *Brazilian Journal of Oceanography*, 66: 245-254.

Andrade Neto, J.S., Rigon, L.T., Toldo Jr. E.E. & Schettini, C.A.F. (2012) Descarga sólida em suspensão do sistema fluvial do Guaíba, RS, e sua variabilidade temporal. *Pesquisas em Geociências* 39 (2): 161-171.

Appleby, P.G. (2001) Chronostratigraphic techniques in recent sediments. In: Last WM, Smol JP (Eds.) *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments*. Springer, Netherlands, p. 171-203.

Baisch, P. (1994) *Les oligo-elements metalliques du systeme fluvio-lagunaire du Patos, flux et devenir (Brésil)*. Bordeaux, 345p. Tese de Doutorado, Universidade de Bordeaux I.

Baitelli, R. (2012) *Evolução Paleogeográfica do Sistema de Paleodrenagem do Rio Jacuí na Planície Costeira do Rio Grande do Sul*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Cooper, J.A.G. & Lemckert, C. (2012) Extreme sea-level rise and adaptation options for coastal resort cities: a qualitative assessment from the Gold Coast, Australia. *Ocean Coastal Management*, 64: 1–14.

Dillenburg, S.R. & Burnett, W.C. (1995) Taxas de Sedimentação da Laguna de Tramandaí, no Estado do Rio Grande do Sul, Determinadas Através do Método do

Pb-210. In: V Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário. *Anais do V Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário*. Niterói – Rio de Janeiro, p. 224-229.

Hartmann, C. & Schettini, C.A.F. (1991) Aspectos hidrogeológicos na região da desembocadura da Laguna dos Patos, RS. *Revista Brasileira de Geociências*, 21(4): 371-377.

EMATER-RS/ASCAR (2014). *Valores da Produção Agrícola, Principais Grãos, Arroz Irrigado, Soja e Milho na Região Sul*. Relatório Técnico da Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Estado do Rio Grande do Sul e Associação Sulina de Crédito e Assistência Rural, Publishing Physics Web www.emater.tche.br/site/arquivos/relatorio-institucional/PAT_2014.pdf. Accessed January 2019.

FARSUL (2013). *Balanço da Agropecuária em 2013 e Perspectivas para 2014*. Relatório Econômico da Federação da Agricultura do Estado do Rio Grande do Sul, Publishing Physics Web www.farsul.org.br/arquivos/relatorio_2013.pdf. Accessed November 2019.

Gibbons, S.J.A. & Nicholls, R.J. (2006) Island abandonment and sea-level rise: an historical analog from the Chesapeake Bay, USA. *Global Environmental Change* 16: 40–47.

Grimm, A.M., Ferraz, S.E.T. & Gomes, J. (1998) Precipitation anomalies in Southern Brazil associated with El Niño and La Niña events. *Journal of Climate* 11: 2863–2880.

Ivanoff, M.D., Toldo Jr., E.E., Figueira, R.C.L. & Ferreira, P.A.L. (2017) Geocronologia com ²¹⁰Pb na avaliação das taxas de sedimentação e da dinâmica deposicional na Lagoa Itapeva, sul do Brasil. *Pesquisas em Geociências*, 44(3): 489-500.

Jung, B.M. (2017) *Variabilidade dos Fluxos de Sedimentos para a Lagoa dos Patos e os Processos de Trocas com o Oceano Adjacente*. Dissertation, University of Rio Grande.

Kathren, R.L. (1984) *Radioactivity in the environment: sources, distribution and surveillance*. New York: Harwood Academic Publishers.

Kjerfve, B. (1986) *Comparative Oceanography of Coastal Lagoons*. Academic Press, New York.

Kjerfve, B., Ribeiro, C.H.A., Dias, G.T.M., Filippo, A.M. & Quaresma, V.S. (1997) Oceanographic characteristics of an impacted coastal bay: baía de Guanabara, Rio de Janeiro, Brazil. *Continental Shelf Research* 17(13): 1609-1643.

Kjerfve, B. & Magill, K.E. (1989) Geographic and hydrodynamic characteristics of shallow coastal lagoons. *Marine Geology* 88: 187-199.

Krepper, C.M., Garcia, N.O. & Jones, P.D. (2003) Interannual Variability in the Uruguay River Basin. *International Journal of Climatology* 23: 103–115.

- Ligero, R.A., Barrera, M. & Casas-Ruiz, M. (2005) Levels of ^{137}Cs in muddy sediments on the sea bed in the Bay of Cádiz (Spain). Part II. Model of vertical migration of ^{137}Cs . *Journal of Environmental Radioactivity*, 80: 87-103.
- Lubis, A.A. (2006) Constant rate of supply (CRS) model for determining the sediment accumulation rates in the coastal area using ^{210}Pb . *J Coast Dev* 10(1): 9-18.
- Martins, I.R., Villwock, J.L., Martins, L.R. & Bemvenuti, C.E. (1989) The Lagoa dos Patos Estuarine Ecosystem (RS, Brazil). *Pesquisas em Geociências* 22: 5-44.
- Martin, L. & Dominguez, J.M.L. (1994) *Geological history of coastal lagoons*. In: Kjerfve B (Ed.) Coastal Lagoon Processes. Elsevier Sci. Publishers p. 41–68.
- Marques, W.C., Fernandes, E.H., Moraes, B.C., Möller, O.O. & Malcherek, A. (2010) The Dynamics of Patos Lagoon Suspended Sediment Plume and Its Contribution for the Deposition Pattern in the Southern Brazilian Inner Shelf. *Journal of Geophysical Research* 115: 10–45.
- Moller, O.O.J., Paim, P.S. & Soares, I. (1991) Facteurs et mecanismes de lacirculation dês eaux dansl' estuaire de La lagune dos Patos. *Bulletim Institute de Geologie Du Bassin d'Aquitaine* 49, 15–21.
- Moller, O.O.J. & Casting, P. (1999) *Hydrographical characteristics of the estuarine area of Patos Lagoon (30° S, Brazil)* In Perillo GM, Piccolo MC, Pino M (Eds.) Springer, Estuaries of South America: Their geomorphology and dynamics, Berlin p. 83–100.
- National Weather Service (NOAA). CPC: Climate Prediction Center. www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml. Accessed January 2019
- Niencheski, L.F., Moore, W.S. & Windom, H.L. (2014) History of human activity in coastal southern Brazil from sediment. *Marine Pollution Bulletin* 78: 209-212.
- Pasquini, A.I., Niencheski, L.F.H. & Depetris, P.J. (2012) The ENSO signature and other hydrological characteristics in Patos and adjacent coastal lagoons, south-eastern Brazil. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 111: 139-146.
- Philander, S.G.H. (1990) *El Niño, La Niña, and the South Oscillation*. Academic Press, San Diego.
- Phleger, E.B. (1981) A review of some general features of coastal lagoons. Coastal lagoon research, present and future. UNESCO *Technical Papers in Marine Science* 33: 7-14.
- Rigon, L.T. (2009) *O fluxo de carga sólida em suspensão do Rio Guaíba*. Monografia de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Robertson, A.W. & Mechoso, C.R. (1998) Interannual and Decadal Cycles in River Flows of Southeastern South America. *Journal of Climate* 11: 2570–2581.

Ropelewski, C.F. & Halpert, M.S. (1987) Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño/Southern Oscillation. *Monthly Weather Review* 115: 1606–1626.

Ropelewski, C.F. & Halpert, M.S. (1989) Precipitation patterns associated with the high index phase of the southern oscillation. *Journal of Climate* 2: 268–284.

Strahler, A.N. & Strahler, A.H. (1987) *Modern Physical Geography*. John Willey and Sons, New York

Tavora, J., Fernandes, E.H.L., Thomas, A.C., Weatherbee, R. & Schettini, C.A.F. (2019) The influence of river discharge and wind on Patos Lagoon, Brazil, Suspended Particulate Matter. *International Journal of Remote Sensing* 40: 1-20.

Toldo Jr., E.E., Dillenburg, S.R., Corrêa, I.C.S. & Almeida, L.E.S.B. (2000) Holocene Sedimentation in Lagoa dos Patos Lagoon, Rio Grande do Sul, Brazil. *Journal of Coastal Research* 16(3): 816-822.

Toldo Jr., E.E., Almeida, L.E.S.B., Corrêa, I.C.S., Ferreira, E.R. & Nelson, L.S.G. (2006) Wave prediction along Lagoa dos Patos coastline, southern Brazil. *Atlântica* 28(2): 87-95.

Toldo Jr., E.E., Dillenburg, S.R., Corrêa, I.C., Almeida, L.E.S.B., Weschenfelder, J. & Gruber, N.L.S. (2006) Sedimentação de longo e curto período na Lagoa dos Patos, Sul do Brasil. *Pesquisas em Geociências* 36(2): 79-86.

Tomazelli, L.J., Dillenburg, S.R. & Villwock, J.A. (2000) Late Quaternary geological history of Rio Grande do Sul coastal plain, southern Brazil. *Revista Brasileira de Geociências* 30(3): 470-472.

Torres, R.J. (2000) *Uma análise preliminar dos processos de dragagem do porto de Rio Grande, RS*. Dissertation, University of Rio Grande.

UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation). 2000. *Sources and effect of ionizing radiation*. United Nations, New York.

Vaz, A.C., Mooller, O.J. & Almeida, T.L. (2006) Análise quantitativa da descarga dos rios afluentes da Lagoa dos Patos. *Revista Atlântica* 28(1): 13-23.

Vieira, E.F. & Rangel, S.L.S. (1988) *Planície Costeira do Rio Grande do Sul: Geografia física, vegetação e dinâmica sócio-demográfica*. Sagra Editora, Brasil.

Villwock, J.A., Martins, L.S. & Formoso, M.L.L. (1972) Contribuição ao estudo da mineralogia de argilas dos sedimentos de fundo da Lagoa dos Patos (Rio Grande do Sul, Brasil). *Estudos Sedimentológicos* 2: 13-34.

Capítulo 3 - Magnetic parameters of holocenic sediments from Patos Lagoon and Guaíba River as indicators of heavy metal pollution

(Artigo submetido ao periódico *Marine Pollution Bulletin*)



Submissions Being Processed for Author Michel Doeppre Ivanoff, M.Sc

Page: 1 of 1 (1 total submissions)

Display 10 results per page.

Action	Manuscript Number	Title	Initial Date Submitted	Status Date	Current Status
Action Links	MPB-D-20-00880	Magnetic parameters of holocene sediments from Patos Lagoon and Gualaiba River as indicators of heavy metal pollution	21 May 2020	21 May 2020	With Editor

Page: 1 of 1 (1 total submissions)

Display 10 results per page.

[<< Author Main Menu](#)

Magnetic parameters of holocenic sediments from Patos Lagoon and Guaíba River as indicators of heavy metal pollution

Michel Doeppre IVANOFF¹, Elírio Ernestino TOLDO JR.¹, Jairo Francisco SAVIAN¹, Rubens Cesar Lopes FIGUEIRA², Carolina BUENO³, Maurício Vaccari ALIPRANDINI¹, Gelvam André HARTMANN⁴

(1) Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Avenida Bento Gonçalves, 9.500, CEP 91509-900, Porto Alegre, RS, Brasil. (mdi.ivanoff@gmail.com, toldo@ufrgs.br, jairo.savian@ufrgs.br).

(2) Departamento de Oceanografia Física, Química e Geológica, Universidade de São Paulo. Praça do Oceanográfico, 191, CEP 05508-120, Cidade Universitária, São Paulo, SP, Brasil (rfigueira@usp.br)

(3) Oceanografía y Ecología Marina, Instituto de Ecología y Ciencias Ambientales, Facultad de Ciencias, Universidad de la República, Iguá 4225, Montevideo, Uruguay. (cbueno@fcien.edu.uy)

(4) Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brazil. (gelvam@on.br)

Abstract. The magnetic susceptibility (χ_{lf}) and concentration of heavy metals were determined in cores extracted from Patos Lagoon and its main tributary, the Guaíba River, to assess the mutual relationship between χ_{lf} and the anthropogenic pollution in recent sediments dated according to the ²¹⁰Pb method. The determination of TOC, CaCO₃, and granulometry allowed us to estimate how those variables influence χ_{lf} . The results demonstrated the importance of regional lithologies in the magnetic response of sediments especially in areas influenced by volcanic rocks. The cores corresponding to the Guaíba River and central region of Patos Lagoon showed an increase in the content of metals. The application of the Pollution Load Index (PLI) indicated deterioration of environmental quality in the superficial layers, showing a significant correlation between χ_{lf} , mud, and TOC. The main causes that explain the increase in metals, PLI, and χ_{lf} are agriculture, mining, and discharge of industrial and urban effluents.

Keywords: Lagoon sedimentation, environmental magnetism, magnetic susceptibility, heavy metals.

1. Introduction

Coastal lagoons represent environments of great ecological importance and, together with mangroves and estuaries, constitute highly productive transitional ecosystems between the continent and the ocean. Due to this interaction with the ocean, the freshwater supply and the hydrological balance of precipitation and evaporation consequently show longitudinal and temporal gradients of salinity (Kjerfve, 1994), providing the conditions for the occurrence of characteristic communities of fresh, brackish, and marine waters (Smith, 1994).

The intense development of coastal regions in recent decades – associated with urbanization, industrialization, and agriculture – has gradually intensified the impacts on the environment, directly affecting the water quality and biological productivity. In addition, these activities have been increasing the concentration of substances in the air, soil, and water that have potentially harmful effects on human health. Currently, heavy metals are accumulated in excess in coastal spaces through various anthropogenic activities such as the disposal of urban and industrial

wastewater (Dang *et al.*, 2002), atmospheric deposition of aerosol particles, rain deposition, or agricultural and port activities (Alloway, 2013).

The contamination of sediments by heavy metals is a serious environmental problem that is becoming increasingly intense on a global scale, potentially able to transfer toxic elements to the surrounding vegetation from low to high trophic levels (Ali *et al.*, 2013). This type of element can accumulate in living tissues along the food chain since they are not biodegradable, reaching humans mainly through food. In addition, heavy metals can cause toxicological effects on soil microorganisms, leading to a decrease in their activity and number of individuals (Khan *et al.*, 2010).

Another important aspect is that metallic compounds may have different characteristics in terms of mobility, toxicity, and chemical behavior patterns. Therefore, knowing the concentration and distribution of metals in sediments is essential to assess contamination in the environment and minimize potential effects on human health (Yalcin *et al.*, 2016).

Environmental magnetism is a technique that uses the magnetism of rocks and minerals to reveal processes and reshape the history of environmental evolution (Verosub & Roberts, 1995). The magnetic characteristics of substances in the natural environment are affected by the type, content, and grain size of magnetic minerals. Moreover, these characteristics may reflect comprehensive information including the sedimentary source, transport patterns, level of diagenesis in addition to showing great potential in the assessment of metal pollution (Yu, 1989).

Magnetic susceptibility is an easily measurable geophysical parameter that describes the ability of materials to be magnetized under the influence of an external magnetic field (Evans & Heller, 2003; Thompson & Oldfield, 1986). Its application for the characterization and categorization of pollution is made possible by the common occurrence of magnetic particles in sedimentary deposits affected by the incorporation of materials from technological processes (Magiera *et al.*, 2011).

However, natural processes such as weathering, climate change, and biomineralization also tend to influence the magnetic susceptibility over time in sedimentary deposits (Grison *et al.*, 2011; Magiera *et al.*, 2006, 2007; Szuszkiewicz *et al.*, 2016; Thompson & Oldfield, 1986). Therefore, as a quantitative and qualitative assessment of the level of contamination, magnetometry becomes a valuable tool when integrated with geochemical methods that assist in the identification of processes influencing sediment magnetization.

Several studies have found promising results in assessing environmental

quality by significantly correlating magnetic characteristics with heavy metal pollution. Many of these studies have indicated the contamination extent in estuarine areas (Dong *et al.*, 2014), river sediments (Zhang *et al.*, 2011), urban particulates (Guo & Li, 2017; Zong *et al.*, 2017), lake sediments (Gascón Díez *et al.*, 2017; Guan *et al.*, 2016; Yunginger *et al.*, 2018), marine sediments (Kim *et al.*, 2013; Ravisankar *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2017), among other applications.

In this sense, we extracted three drill cores along the Guaíba River and Patos Lagoon hydrographic system to characterize the magnetic susceptibility and verify its correlation with heavy metals in recent decades. This historical reconstruction included dating according to the ^{210}Pb method and a simultaneous analysis of the mechanisms influencing the magnetic susceptibility: total organic carbon (TOC), biogenic carbonate (CaCO_3), and the granulometric distribution of sediments.

2. Study Area

Patos Lagoon, located in the southern region of Brazil, constitutes the largest lagoon system in South America and largest choked lagoon in the world (Kjerfve, 1986). It has a surface area of 10,227 km² and an average depth of 5 m, comprising a main axis that extends for more than 180 km in the NE-SW direction (Fig. 1). It is connected to the Atlantic Ocean at the southern end through a single connection channel where the tidal variation is only 0.47 meters (Martins *et al.*, 1989).

Among the tributaries that flow into Patos Lagoon and drain a total area of approximately 170,000 km², the Guaíba River stands out for having an approximately 50-km long, 470-km² basin, whose mouth is located south of the city of Porto Alegre. It has an average depth of 2 m (maximum of 31 m) and minimum and maximum widths of 900 m and 19 km, respectively (Menegat *et al.*, 1998).

The Guaíba River basin flows through fourteen cities that have an estimated population of 2.2 million inhabitants and a demographic density of approximately 900 inhabitants/km², 98% of whom living in urban areas (IBGE, 2010). The high degree of urbanization is responsible for several environmental problems – e.g. industrial pollution and the low treatment rate of domestic sewage (Andrade, 2019) – that compromise the water quality of this watershed, mainly used for public supply and irrigation.

The Coastal Plain encompassing the study area was formed during transgressive-regressive events induced by sea-level eustatic oscillations during the Quaternary. As a consequence of these variations, four Lagoon-Barrier depositional

systems were formed (named from the oldest to the most recent): Lagoon-Barrier I, II, and III systems, of Pleistocene age, and Lagoon-Barrier IV system, from the Holocene. The isolation of Patos Lagoon was initiated by the formation of Barrier III in the Late Pleistocene, approximately 120,000 years ago (Tomazelli *et al.*, 2000).

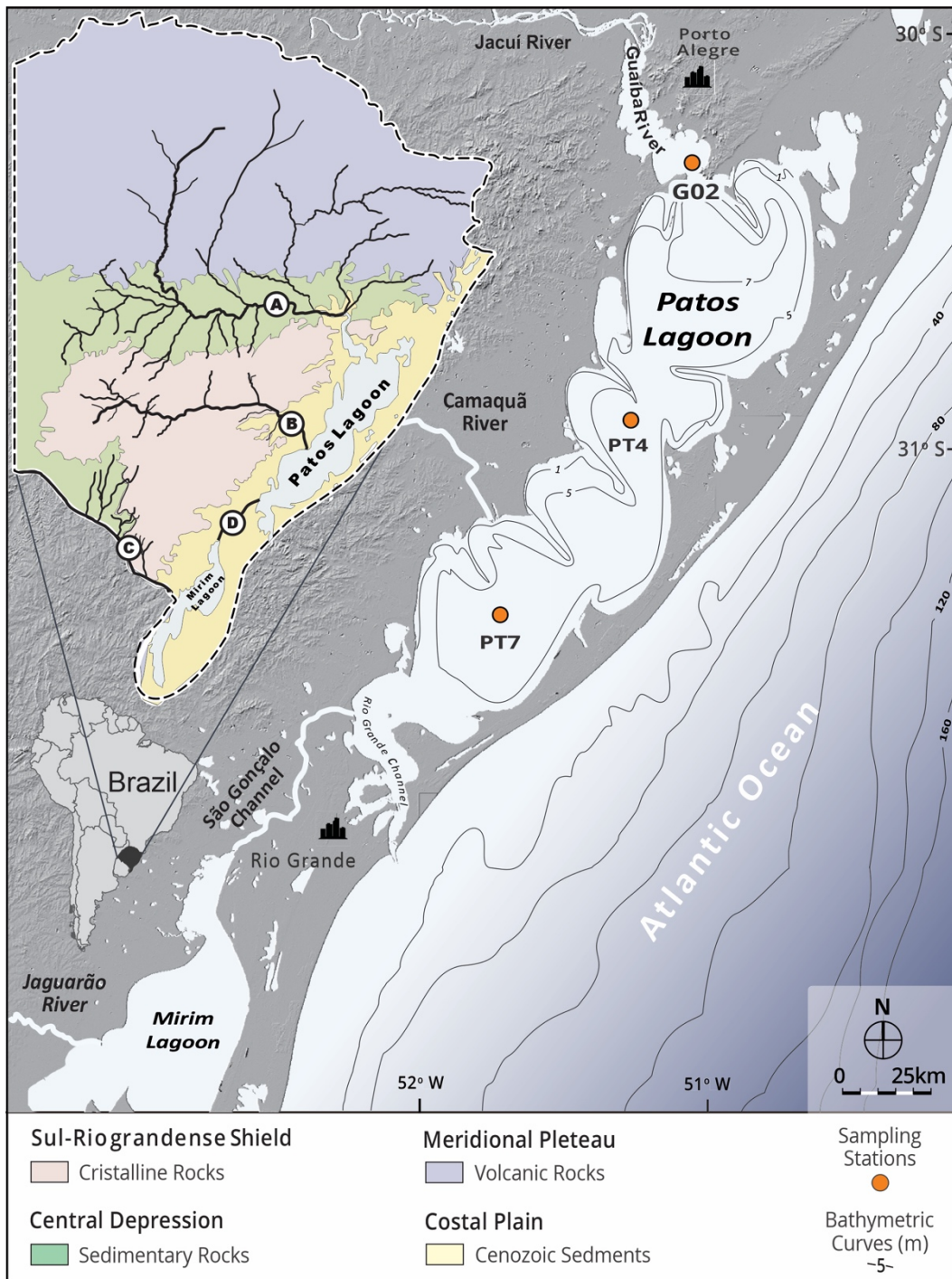


Figure 1 - Map of the study area indicating the sampling sites of the sedimentary cores, regional lithology, and main tributaries that flow into the Guaíba River and Patos Lagoon: (A) Jacuí River, (B) Camaquã River, (C) Jaguarão Rivers, and (D) São Gonçalo Channel.

According to Martins *et al.* (1989), the sediments that constitute the shallow bottom along the west side of Patos Lagoon are poorly selected and vary between the sizes of fine sand and gravel. On the other hand, the sands on the east margin

are predominantly fine and very well selected. The lagoon bottom sediments have less than 4% of sand and consist mainly of silt and clayey silt in the northern half, while the southern half is characterized by silty clay. The mud deposited on the lagoon bottom occurs at depths below the base level of wave-driven erosion, which rarely exceeds 4 m (Toldo Jr. *et al.*, 2000).

Indirect estimates of the suspended solid load from the Guaíba River into Patos Lagoon – reported by Baisch (1994) and Rigon (2009) – suggest an average annual contribution of 1 and 4×10^6 t year⁻¹, respectively. According to Andrade Neto *et al.* (2012), the estimate of the average annual load of suspended solids comes to 1,100,000 t year⁻¹.

3. Material and methods

3.1 Main sampling

In order to conduct this study, two sedimentary cores were extracted from Patos Lagoon and one from its largest tributary, the Guaíba River. The position of the Guaíba River core, which was close to its mouth, aimed to assess the load of pollutants generated before being discharged into the lagoon and their subsequent dilution effect (Fig. 1). Sampling prioritized holocenic sedimentation sites with low-energy depositional characteristics (Toldo Jr. *et al.*, 2000). A type of piston core was used for sampling, recovering 60 cm of continuous sedimentary deposits. The position and characteristics of the sampling sites are described in Table 1.

Table 1. Location and depth of the drill cores extracted from the Guaíba River and Patos Lagoon.

Drilling site	Latitude (°S)	Longitude (° W)	Water depth (m)	Sediment Recovery (cm)
G04	30° 18' 39"	51° 16' 10"	4.45	60
PT4	31° 01' 55"	51° 18' 04"	5.69	60
PT7	31° 26' 52"	51° 40' 10"	6.44	60

3.2 Granulometry

The granulometry determination along the sedimentary column of the cores was performed by a CILAS 1090 laser granulometer provided by the Institute of Hydraulic Research (IPH) from the Federal University of Rio Grande do Sul (UFRGS). This equipment has a measurement range from 0.04 to 500 µm, a 0.01-Φ resolution, and a repeated measurement error of less than 3%. The interpretation of

the results was performed according to the statistical procedures from Folk & Ward (1957) and Shepard (1960), which provide essential parameters to understand the sedimentation environment and the hydrodynamic regime to which the ecosystem is subject.

3.3 Magnetic susceptibility measurements

The magnetic susceptibility measurements were performed at the Paleomagnetism Laboratory from the University of São Paulo (USPMag). The samples destined for the magnetic analyzes were collected using cubic plastic boxes of 8 cm³ placed side by side continuously in each core and oriented towards the bottom, totaling 30 samples for each core profile.

The magnetic susceptibility of each sample was measured using a system equipped with an AGICO MFK1-FA multi-function Kappabridge at two excitation frequencies, 976 Hz (χ_{lf}) and 15,616 Hz (χ_{hf}), under a field of 200 A m⁻¹ at room temperature. The magnetic susceptibility (χ , specific mass in units of m³ kg⁻¹) is indicative of the contribution of all the magnetic materials (ferromagnetic, paramagnetic, and diamagnetic) in the global sample (Evans & Heller, 2003).

In addition, the frequency-dependent susceptibility (χ_{fd}) was calculated, which expresses the difference between the low-frequency (χ_{lf}) and high-frequency (χ_{hf}) susceptibility measurements. This quantity is expressed by a percentage and is calculated from Equation 1 as proposed by Dearing (1996):

$$\chi_{fd}(\%) = \left[\frac{(\chi_{lf} - \chi_{hf})}{\chi_{lf}} \right] \times 100 \quad (1)$$

This parameter serves as a qualitative measure of the presence of single-domain (SD) and multiple-domain (MD) magnetic minerals (Dearing, 1996), or it indirectly assesses the size of the magnetic grains (Liu *et al.*, 2012).

3.7 Sediment pollution indices

In order to detect possible changes in the quality of sediments and identify the order of magnitude at which the basal concentration of metals was exceeded in the study area, the Concentration Factor (CF) was used as a tool to later obtain the Pollution Load Index (PLI). CF is expressed according to Equation 2:

$$CF = \frac{C(E)}{C(B)} \quad (2)$$

where C(E) is the element concentration [mg kg⁻¹] in a stratum sample from

an analyzed profile, and $C(B)$ is the background concentration of the element [mg kg^{-1}], calculated by the average of the last five bottom samples of each profile.

PLI of the sedimentary samples was calculated to establish their association with magnetic parameters, indicating how much a sample exceeds the metal concentrations for natural environments. It also evaluates the general toxicity status of samples (Tomlinson *et al.*, 1980). According to Liu *et al.* (2013), four pollution levels can be defined: no pollution ($PLI < 1$), moderate pollution ($1 < PLI < 2$), heavy pollution ($2 < PLI < 3$), and extremely heavy pollution ($PLI > 3$). In this study, PLI was calculated for the metals As, Ba, Cr, Cu, Ni, Pb, and Zn according to Equation 3:

$$PLI = \sqrt[n]{CF_1 \times CF_2 \times \dots \times CF_n} \quad (3)$$

where CF is the Concentration Factor for each metal, calculated as $C(E)/C(B)$, and CF_n is the Concentration Factor of element n analyzed in the sample.

4. Results

4.1 Lithology

According to the granulometric analysis, the extraction site of core G04 had a predominantly muddy sedimentary composition (Fig. 2), with samples being classified as medium silt (median = 5.9 Φ). The sand fraction was of little significance, reaching a maximum value of only 15% at 34 cm deep.

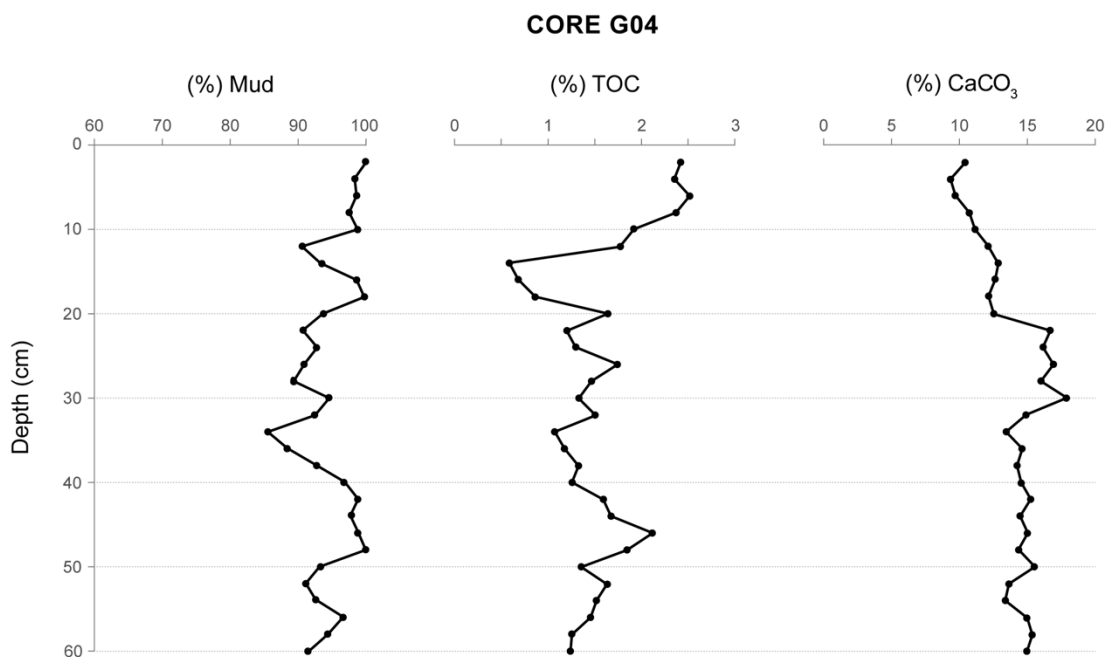


Figure 2 - Granulometric data of the Guaíba River core (G04) represented by the percentages of mud, total organic carbon (%TOC) and carbonates (%CaCO₃).

The CaCO_3 percentages ($\%\text{CaCO}_3$) were relatively stable and close to 12% except for the depth interval between 20 and 30 cm, where the values ranged between 16 and 17%. On the other hand, there was a higher percentage of TOC ($\%\text{TOC}$) in the superficial portion of the core, increasing from 0.6 to 2.5% and indicating a recent organic matter input into the Guaíba River southern region (Fig. 2).

In the central area of Patos Lagoon, where core PT4 was extracted, the data showed the smallest granulometric variations in relation to the other studied sectors (Fig. 3). In this core, muddy sediments were poorly selected and comprised 98.95% of the sampled intervals, in which the fine silt class was predominant.

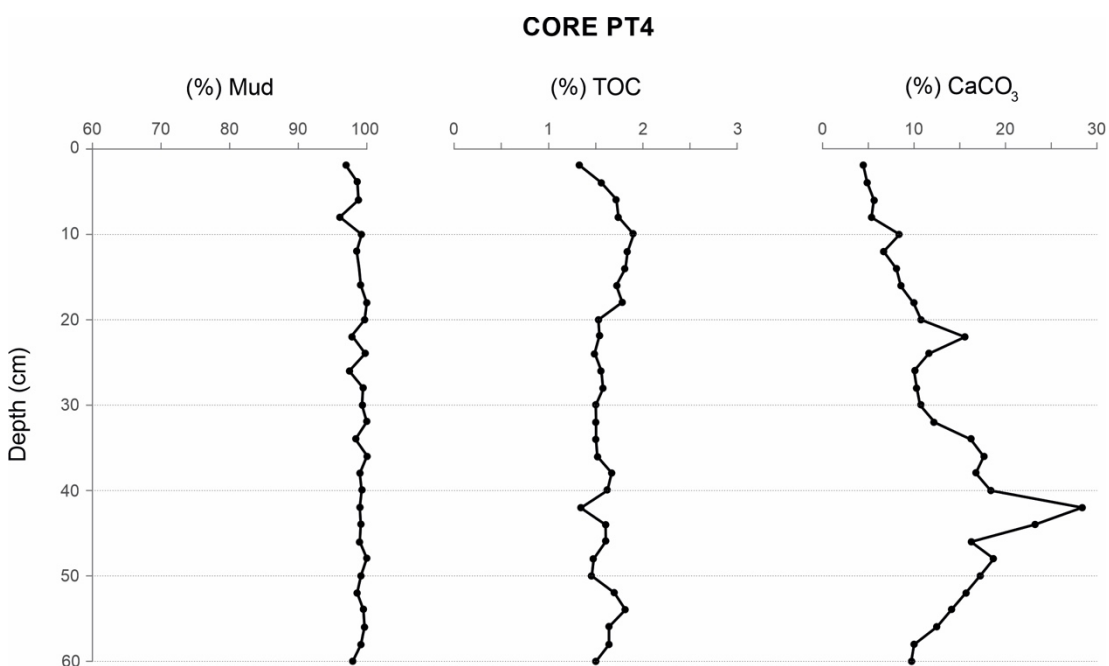


Figure 3 - Granulometric data of the Patos Lagoon central region core (PT4) represented by the percentages of mud, total organic carbon ($\%\text{TOC}$) and carbonates ($\%\text{CaCO}_3$).

The sand content was of little significance, with an average concentration of 1.04% along the profile and associated median of 6.1 Φ . $\%\text{CaCO}_3$ was higher in the lower portion of core PT4, reaching a maximum value of 28% at 42 cm deep and gradually decreasing towards the surface, where its minimum percentage was observed (4.4%). A similar behavior occurred with $\%\text{TOC}$ (Fig. 3), which fluctuated between 0.7 and 1.8% and showed a decreasing trend from the profile bottom to its top.

Regarding core PT7, variations in the granulometric classes were evident (Fig. 4), showing a higher concentration of fine sediments in the lower and upper portions of the profile. In the depth range between 24 and 38 cm, there was a sharp increase

in the average particle diameter, where the sand fraction constituted up to 53% of the sediment. The granulometric classes varied from very fine silt to medium sand, prevailing poorly selected sediments associated with a median of 5.6 Φ . Core PT7 %TOC was the lowest among the three analyzed cores, characterized by an average of 1.39% and a moderate variation along the profile. Similarly, this vertical pattern was also followed by %CaCO₃ (Fig. 4), but with an average value of 13.8%.

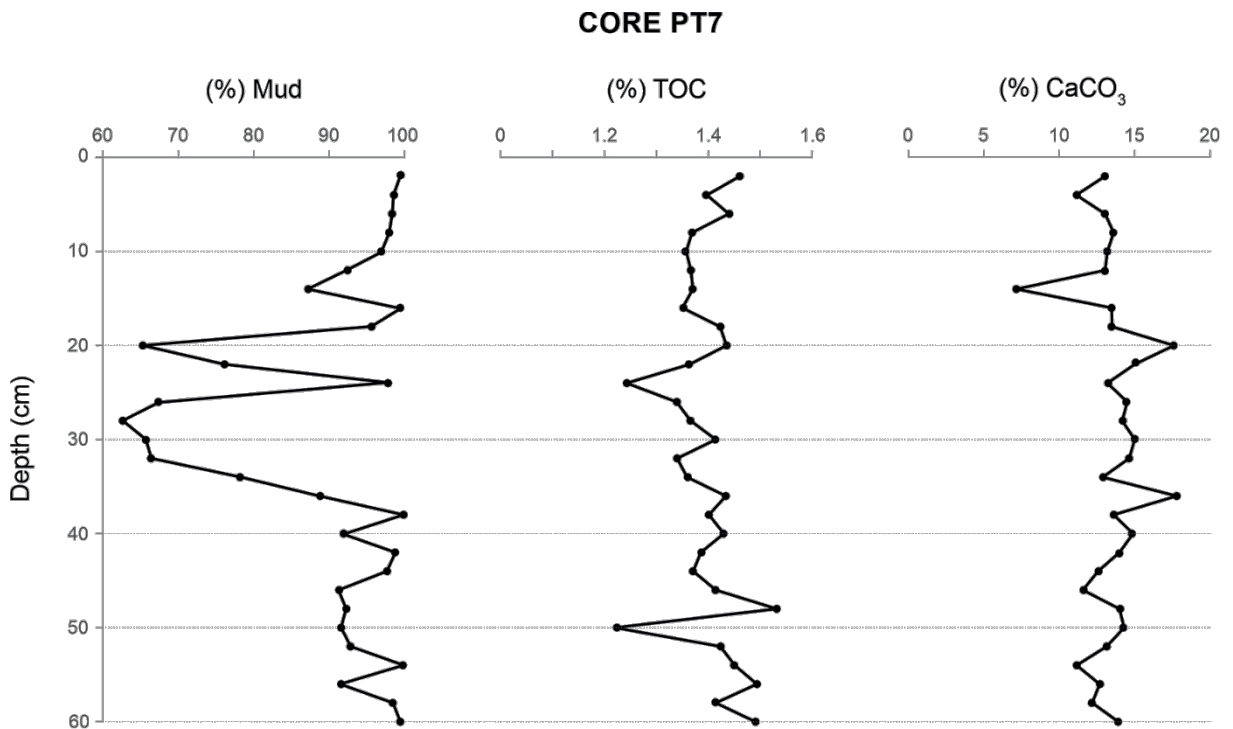


Figure 4. Granulometric data of the Patos Lagoon southern region core (PT7) represented by the percentages of mud, total organic carbon (%TOC) and carbonates (%CaCO₃).

4.2 Magnetic susceptibility

The Guaíba River core (G04) samples had χ_{lf} values between 28 and 39 x 10⁻⁸ m³ kg⁻¹ from the bottom to 24 cm deep (Fig. 5), only reaching its maximum value of 2,641 x 10⁻⁸ m³ kg⁻¹ when at 8 cm deep. From this point on, χ_{lf} showed a downward trend towards the surface, where it decreased to 1,454 x 10⁻⁸ m³ kg⁻¹. The differences between χ_{lf} and χ_{hf} (χ_{fd}) ranged from 0 to 4% from the profile bottom to 38 cm deep, oscillating between 7 and 11% from 36 to 32 cm. In shallower layers, χ_{fd} followed a trend of harmonic variation containing values near those of the bottom (Fig. 6).

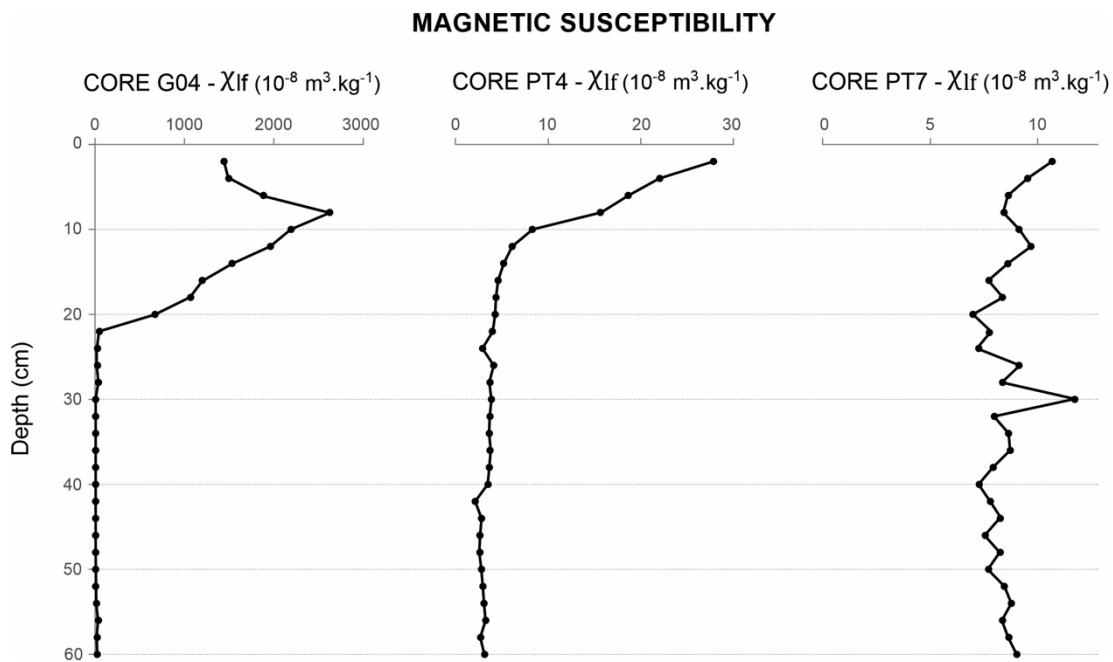


Figure 5. Low-frequency magnetic susceptibility (χ_{lf}) related to cores G04 (Guaíba River), PT4 (Patos Lagoon central region), and PT7 (Patos Lagoon southern region).

In core PT4, χ_{lf} fluctuated between 2.1 and $6 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ from the profile bottom to 20 cm deep, showing a tendency to homogeneity similar to the behavior of the lower strata from the Guaíba River core profile (Fig. 5). From 20 cm deep to the top of core PT4, an increasing χ_{lf} trend started and intensified after 10 cm deep, achieving the maximum value of $28 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ in the surface sample. The χ_{fd} results indicated that the magnetic susceptibility varied little between the two frequencies, demonstrated by the average χ_{fd} of only 2% and maximum value of 5% (Fig. 6).

In the southern region of Patos Lagoon, the χ_{lf} measured results yielded a maximum value of $11 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ at the profile top, showing harmonic variations towards the bottom where the minimum values of about $8 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ were found (Fig. 5). Differently from what was observed in the other analyzed sites, this profile did not show significant χ_{lf} growth in the top sediments, indicating that there were no meaningful changes in recent sedimentary characteristics. On the other hand, core PT7 had the greatest χ_{fd} among all studied cores, reaching maximum values of around 24% at depths of 8, 28, and 40 cm, and an average value of 22% (Fig. 6). The lowest χ_{fd} was near 15% and occurred between 12 and 26 cm deep.

SUSCEPTIBILITY FREQUENCY DEPENDENCE

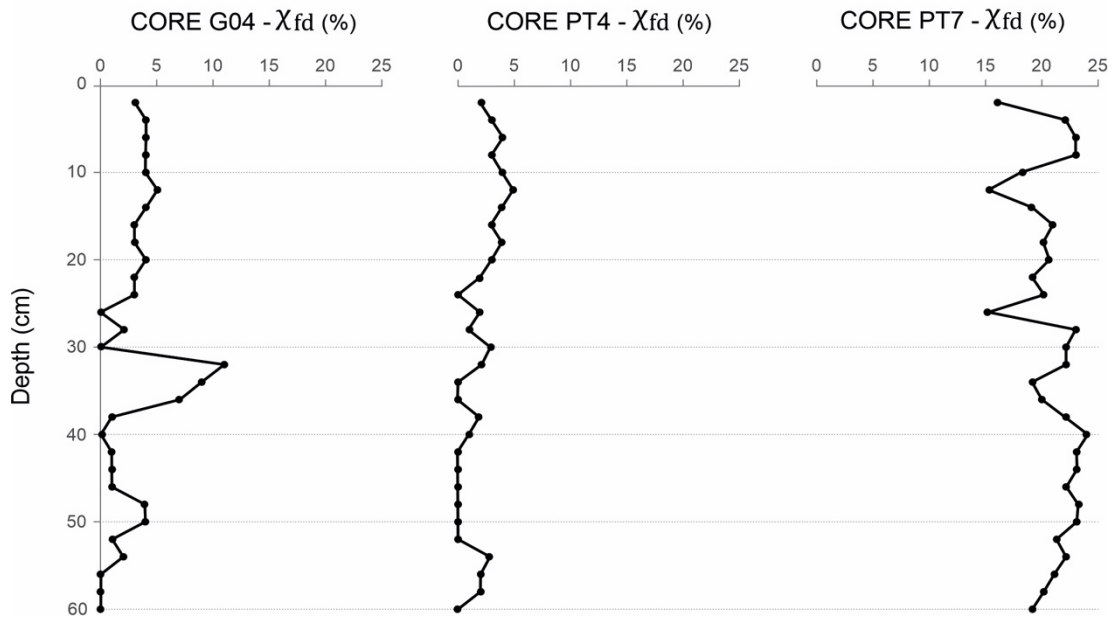


Figure 6. Frequency-dependent magnetic susceptibility (χ_{fd}) measured in cores G04 (Guaíba River), PT4 (Patos Lagoon central region), and PT7 (Patos Lagoon southern region).

4.3 Concentration of metals

The metals showed a considerable variation in their concentrations according to the site and sampled depth of each core. These results might mean – besides the influence of different weathering processes on regional lithologies – the addition of anthropogenic inputs. The measurements of metal concentration with respective maximum, minimum, and average values for each core are shown in Table 2.

Table 2. Concentration of metals with respective maximum, minimum, and mean values for each analyzed core: G04 (Guaíba River), PT4 (Patos Lagoon central region), and PT7 (Patos Lagoon southern region).

Core	Concentration (mg.kg ⁻¹)	As	Ba	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Fe	Ti
G04	Maximum	15.17	452.06	69.34	78.02	31.23	25.81	162.03	73776.4	8047.24
	Minimum	5.48	121.49	27.99	29.74	12.46	11.66	80.66	28528.5	3494.34
	Average	8.70	243.76	38.28	45.62	18.87	16.80	105.22	47396.4	4759.02
PT4	Maximum	12.82	313.96	35.84	19.36	35.39	17.30	89.71	36098.3	5050.78
	Minimum	2.88	107.60	18.04	9.70	14.95	6.71	43.18	13745.1	1507.13
	Average	6.96	178.40	29.75	15.37	27.36	12.13	78.53	28752.9	3342.90
PT7	Maximum	10.44	209.19	46.95	34.93	22.58	15.30	114.90	43520.1	4259.71
	Minimum	5.10	94.44	31.12	24.83	16.41	10.93	92.71	29940.9	2829.84
	Average	7.35	141.61	40.61	31.38	19.37	12.83	104,24	37706.7	3711.34

5. Discussion

5.1 Magnetic susceptibility

The core extracted from the Guaíba River had an average χ_{lf} of $576 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$, the highest among the other evaluated sites from Patos Lagoon since cores PT4 and PT7 yielded average values of χ_{lf} equal to 6.05 and $8.5 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$, respectively. The greater magnetization of the Guaíba River sediments could be explained by the contribution of materials produced by the weathering of the Serra Geral Formation volcanic rocks, which are loaded into the Guaíba River after being carried by the tributaries from the Jacuí River eastern margin.

According to Costa *et al.* (1999), Lu (2000), Lu *et al.* (2008), and Pratama *et al.* (2018), sediments originated from volcanic rocks have greater magnetic susceptibility when compared to sediments from other types of rocks. This is due to their high Fe concentration, whose presence considerably influences χ_{lf} values since it is a ferromagnetic element. The average Fe concentration measured in core G04, the closest site to the basalt source area, was $47,396 \text{ mg.kg}^{-1}$, 71% and 26% higher than the concentrations in cores PT4 and PT4, respectively (Tab. 2).

The Guaíba River χ_{fd} varied from 0 to 11%, indicating a mixture between MD and SD minerals, which was due to the variability in the supply of magnetic particles observed along this profile. Low χ_{fd} values are associated with MD geological materials with low Fe concentration (Dearing, 1999), inherent to the paleozoic sedimentary rocks present in the Jacuí River basin (Fig. 1), responsible for supplying approximately 20% of the total sedimentary load deposited in the Guaíba River (Delaney, 1965).

In general, higher χ_{fd} values indicate a mixture between SD and MD particles resulting from the presence of primary magnetite, which is found in soils that originated from magmatic rocks (Maher, 1986). In this case, high χ_{fd} may point out the weathering intensity on MD magnetite, forming superparamagnetic or SD secondary maghemite (Costa *et al.*, 1999; Dearing, 1999) from the volcanic rocks drained by the tributaries from the Jacuí River eastern margin. The presence of magnetite in the Serra Geral Formation volcanic rocks was previously identified by Ernesto *et al.* (1990) and Roisenberg & Viero (2000).

The Patos Lagoon central area had the lowest χ_{lf} average ($6.02 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$), strongly contrasting with the corresponding value found in the Guaíba River core.

This suggests that the contribution of sediments from the Serra Geral Formation volcanic rocks considerably weakens in this region. Similar to core G04, the profile of core PT4 showed an increase in χ_{lf} starting at 20 cm deep towards the surface, simultaneously followed by a reduction in the CaCO_3 concentration. This relationship was already expected due to the diamagnetic behavior of carbonates, which reduces the magnetic susceptibility.

Core PT4 χ_{fd} was below 2% from the bottom up to 22 cm deep, indicating the predominance of MD minerals in this depth range. MD minerals, separately, are common in soils formed on acidic and metamorphic magmatic rocks poor in Fe, i.e., on ferromagnetic minerals (Mullins, 1977). These lithological sets are present in the Camaquã River basin, the closest watershed to the sampled site (Philipp and Machado, 2001). According to Dunlop and Özdemir (1997), the magnetic minerals contained in intrusive rocks slowly cool down inside the crust, forming larger magnetic grains. In the upper portion of core PT4, χ_{fd} varied between 2 and 5%, suggesting a mixture of smaller MD and SD minerals, which might indicate an increase in the contribution of Guaíba River materials in recent sediments. This finding is reinforced by the observed sharp increase in χ_{lf} in the top sediments of this profile, reaching $28 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ and corresponding to ten times the bottom χ_{lf} (Fig. 5).

The Patos Lagoon southern region core was extracted from an area in which the Guaíba River sediments converge with the materials carried by the Camaquã River and São Gonçalo Channel. From a depositional point of view, this feature makes this area highly dynamic, confirmed by the greater variability found in the PT7 χ_{lf} data in comparison with the other studied sites. In this region, the São Gonçalo Channel sediments are mostly originated from the Jaguarão River, whose eastern margin tributaries flow over sedimentary lithological domains from the Paleozoic Age. Along this course, there are sandstones mainly composed of quartz and feldspars, thus forming sediments with less Fe content (Motta *et al.*, 2002).

Furthermore, χ_{lf} in the upper strata of core PT7 was lower than in the other cores since quartz and feldspars reduce this parameter due to their diamagnetic behavior. The average χ_{lf} at the PT7 drilling site was $8.5 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$, with no indication of a recent increase in the top layers. Therefore, differently from what was observed in the G04 and PT4 locations, there was no recent input of basalt particles.

Further discussing the Patos Lagoon southern region, its χ_{fd} measurements ranged from 15 to 24%, indicating the predominance of very fine superparamagnetic minerals that probably did not find the hydrodynamic conditions for deposition in the other studied areas. According to Rosenbaum & Reynolds (2004), before the lithogenic components accumulate, the magnetic minerals transported by watersheds are selected by the hydrodynamic energy, which retains thicker particles along the transport course. In addition, due to the higher salinity of this region resulting from its proximity to the estuary, flocculation is facilitated, favoring the deposition of the finest magnetic materials.

5.2 Relationship between concentration of heavy metals and magnetic susceptibility

Strong positive correlations between heavy metals and magnetic susceptibility provide a simple, fast and non-destructive proxy for the concentration of heavy metals in sediments. Moreover, the excessively high concentration of ferromagnetic minerals in surface sediments when compared to base levels should not be only attributed to the local geology (Lu *et al.*, 2016).

Pearson's correlation among the magnetic susceptibility, concentration of metals, and percentages of mud, carbonates and TOC makes it possible to point out the different factors that influence the magnetic properties of sediments. Tables 3, 4, and 5 show that the correlations among the variables differed considerably depending on the sampled location.

Table 3. Pearson's correlation matrix among the low-frequency magnetic susceptibility (χ_{lf}); Pollution Load Index (PLI); percentages of mud, carbonates (%CaCO₃) and total organic carbon (%TOC); and concentration of metals in the Guaíba River core (G04).

G04	χ_{lf}	PLI	Mud	CaCO ₃	TOC	As	Ba	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Fe	Ti
χ_{lf}	1													
PLI	0,84	1												
Mud	0,58	0,56	1											
CaCO ₃	-0,83	-0,67	0,02	1										
TOC	0,40	0,58	0,63	0,47	1									
As	0,22	0,25	0,08	-0,31	0,11	1								
Ba	0,07	0,08	0,00	0,06	-0,21	0,39	1							
Cr	0,85	0,50	0,52	-0,71	0,71	0,52	0,51	1						
Cu	0,72	0,64	0,22	-0,72	0,85	0,38	0,03	0,68	1					
Ni	0,71	0,61	0,47	-0,67	0,83	0,52	-0,03	0,92	0,87	1				
Pb	0,59	0,37	-0,05	-0,34	0,38	0,53	0,26	0,86	0,57	0,69	1			
Zn	0,85	0,58	0,60	-0,78	0,57	0,42	0,74	0,83	0,77	0,76	0,76	1		
Fe	0,86	0,86	0,77	-0,68	0,23	0,14	0,00	0,62	0,51	0,59	0,54	0,71	1	
Ti	0,77	0,42	0,71	-0,72	0,84	0,24	-0,06	0,74	0,95	0,96	0,53	0,85	0,58	1

Thus, the increase in the magnetic susceptibility in the surface sediments of cores G04 and PT4 as well as the positive correlations among χ_{lf} , metal concentration, and PLI may be indicative of an anthropogenic input of elements related to the various economic activities in the region. In core G04, all the metals showed a positive correlation with χ_{lf} and PLI. Although the correlation between As and Ba was weaker in this profile, the elements Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, Fe, and Ti had strong positive correlations among them (Tab. 3).

Table 4. Pearson's correlation matrix among the low-frequency magnetic susceptibility (χ_{lf}); Pollution Load Index (PLI); percentages of mud, carbonates (%CaCO₃) and total organic carbon (%TOC); and concentration of metals in the Patos Lagoon central region core (PT4).

PT4	χ_{lf}	PLI	Mud	CaCO ₃	TOC	As	Ba	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Fe	Ti
χ_{lf}	1													
PLI	0,60	1												
Mud	0,53	0,51	1											
CaCO ₃	-0,61	-0,15	0,35	1										
TOC	0,28	0,25	0,47	-0,08	1									
As	0,59	0,70	0,23	-0,22	0,29	1								
Ba	0,88	0,50	0,43	-0,69	0,31	0,49	1							
Cr	-0,38	0,13	0,23	0,07	-0,05	-0,02	-0,25	1						
Cu	0,30	0,04	0,17	0,00	0,13	-0,18	-0,23	0,53	1					
Ni	-0,58	0,01	0,36	0,22	-0,08	-0,14	-0,45	0,95	0,53	1				
Pb	0,71	0,65	0,67	-0,58	0,27	0,44	0,33	0,41	0,26	0,30	1			
Zn	-0,44	0,14	0,36	0,11	0,01	-0,20	-0,39	0,61	0,35	0,73	0,10	1		
Fe	0,46	0,64	0,67	-0,49	0,23	0,37	0,54	0,07	0,16	0,00	0,59	0,28	1	
Ti	0,85	0,76	0,72	-0,61	0,15	0,61	0,80	-0,14	-0,09	-0,32	0,74	-0,07	0,78	1

Table 5. Pearson's correlation matrix among the low-frequency magnetic susceptibility (χ_{lf}); Pollution Load Index (PLI); percentages of mud, carbonates (%CaCO₃) and total organic carbon (%TOC); and concentration of metals in the Patos Lagoon southern region core (PT7).

PT7	χ_{lf}	PLI	Mud	CaCO ₃	TOC	As	Ba	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Fe	Ti
χ_{lf}	1													
PLI	0,27	1												
Mud	-0,07	-0,42	1											
CaCO ₃	-0,14	0,01	-0,40	1										
TOC	0,23	0,02	0,15	0,03	1									
As	0,32	-0,31	0,29	-0,07	0,32	1								
Ba	0,46	-0,47	0,33	-0,21	0,12	0,39	1							
Cr	-0,06	0,16	-0,13	-0,05	0,17	0,47	0,62	1						
Cu	-0,19	0,09	-0,32	-0,08	0,00	0,07	-0,23	-0,24	1					
Ni	0,47	-0,03	0,30	-0,17	0,11	0,42	0,29	0,81	0,10	1				
Pb	0,34	-0,38	0,29	-0,28	0,19	0,24	0,31	0,64	0,26	0,77	1			
Zn	-0,20	0,29	-0,30	0,10	0,07	0,43	0,33	0,53	0,65	0,65	0,54	1		
Fe	0,14	-0,02	-0,11	-0,18	-0,24	0,11	0,37	-0,09	0,08	0,07	0,32	-0,10	1	
Ti	0,31	-0,03	0,35	-0,30	0,03	0,23	0,57	-0,21	-0,10	0,51	0,44	-0,26	0,62	1

The relationship between χ_{lf} and the metals suggests that magnetic minerals act as pollutant carriers through adsorption (Rose & Bianchi-Mosquera, 1993) in addition to the structural incorporation of heavy metals into minerals (Cornell & Schwertmann, 2003). Furthermore, the strong correlation between magnetic susceptibility and PLI ($r = 0.84$) in core G04 demonstrates the potential of this method as a first approach to estimate heavy-metal contamination associated with anthropogenic activities.

According to Suresh *et al.* (2011), if the correlation coefficient between metals is high, it means they have common sources, mutual dependence, and similar behavior during their transport. The lack of correlation between some metals suggests that their origin and distribution were not controlled by a single factor. In this study, the positive correlations among Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, Fe, and Ti indicated that they were associated by having an interdependent source or selection process. In addition, the positive correlation between the mud content and TOC ($r = 0.63$) in the Guaíba River implies that the metals were present at higher concentrations in the fine fraction of the sediment that had greater amounts of organic matter.

Bueno *et al.* (2019) concluded that the Guaíba River area shows a progressive deterioration in the quality of sediments after 1980, reaching the poorest environmental conditions in the late 1990s, characterized by moderate pollution levels among all the analyzed metals. This interpretation was based on indices of geo-accumulation and enrichment factors for several metals.

Nevertheless, despite the clear association between χ_{lf} and the majority of metals contained in sediments, it is necessary to consider that lithological factors can also cause variations in the magnetic susceptibility. Thus, the input of magnetic materials from volcanic rocks into sediments should be considered in a suitable way, taking into account that an increase in the magnetic susceptibility does not always result only from an input of metals that originate from human activities (Lu *et al.*, 2008; Sudarningsih *et al.*, 2017).

Figures 7 and 8 show that cores G04 and PT4 underwent recent Fe and Ti enrichment mainly in the last 30 cm of the profiles (green and blue shaded areas). These elements are naturally found at high concentrations in the soils from humid climates, not directly influenced by anthropogenic activity (Förstner & Wittman, 1979). According to Roisenberg & Viero (2000), Fe and Ti are commonly found in the Serra Geral Formation rocks composing minerals such as magnetite (Fe_3O_4) and ilmenite (FeTiO_3).

Variations in the properties of magnetic minerals can be strongly driven by many processes such as weathering, erosion history, and changes in land use in the watershed (Oldfield *et al.*, 1979; Walling *et al.*, 1979). Thus, our results show that the recent Fe and Ti enrichment in cores G04 and PT4 represents a clear response to the increase in the agricultural activity in the Meridional Plateau. The occupation of the Meridional Plateau, which started in the late 19th century with the arrival of thousands of German and Italian immigrants, was intensified in the 1970s as the process of modernizing agriculture began in the region. The increase in technology applied to agricultural production occurred with the introduction of intensive practices such as the mechanization of soybean cultivation, which increased deforestation and consequently intensified erosion processes (Mantelli, 2006).

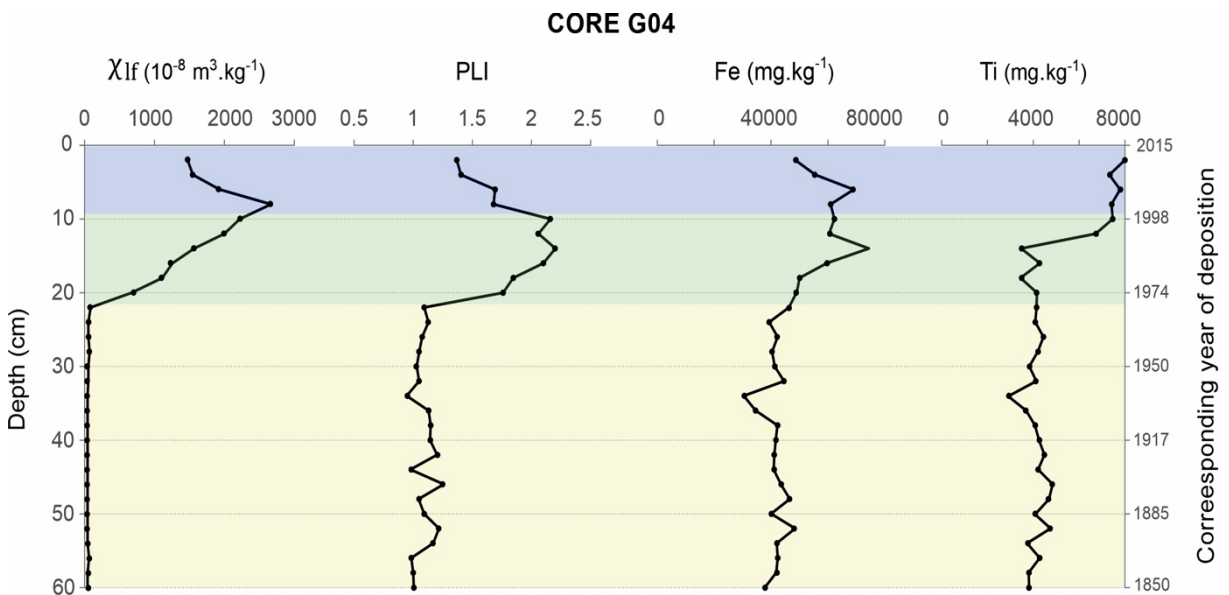


Figure 7. Comparison among the vertical profiles of low-frequency magnetic susceptibility (χ_{lf}), Pollution Load Index (PLI), and concentrations of Fe and Ti from the Guaíba River core (G04).

Lithological anomalies are noticeable in the vertical profiles from cores G04 and PT4 from around 20 cm deep towards the surface (Fig. 7 and 8, blue shaded areas). According to the ^{210}Pb dating method, this depth interval corresponds to the beginning of the 1970s in core G04, which is associated with the start of mechanized agriculture in the Meridional Plateau. In core PT4, this range matches the beginning of the 1980s, probably in response to the growth of that activity and consequent increased erosion. At this depth interval, a progressive increase in χ_{lf} , PLI, and Fe and Ti concentrations started to take place. Naturally, this interdependence was expected since Fe and Ti oxides constitute or are associated with ferromagnetic minerals (e.g. magnetite and titanomagnetite), inducing a magnetic susceptibility increase in sediments (Yoshida, 2003).

In addition, it should be considered that these elements are important pollutant carriers in aquatic environments due to their association with clay, which is directly related to the adsorption of metals. This relationship occurs due to clay's high capacity of cation exchange – defined as the degree to which the sediment can adsorb and exchange cations –, increasing the concentration of heavy metals in this type of setting (Lake, 1987). This overall association can be confirmed by the strong correlation among PLI and the contents of mud, Fe, and Ti in cores G04 and PT4.

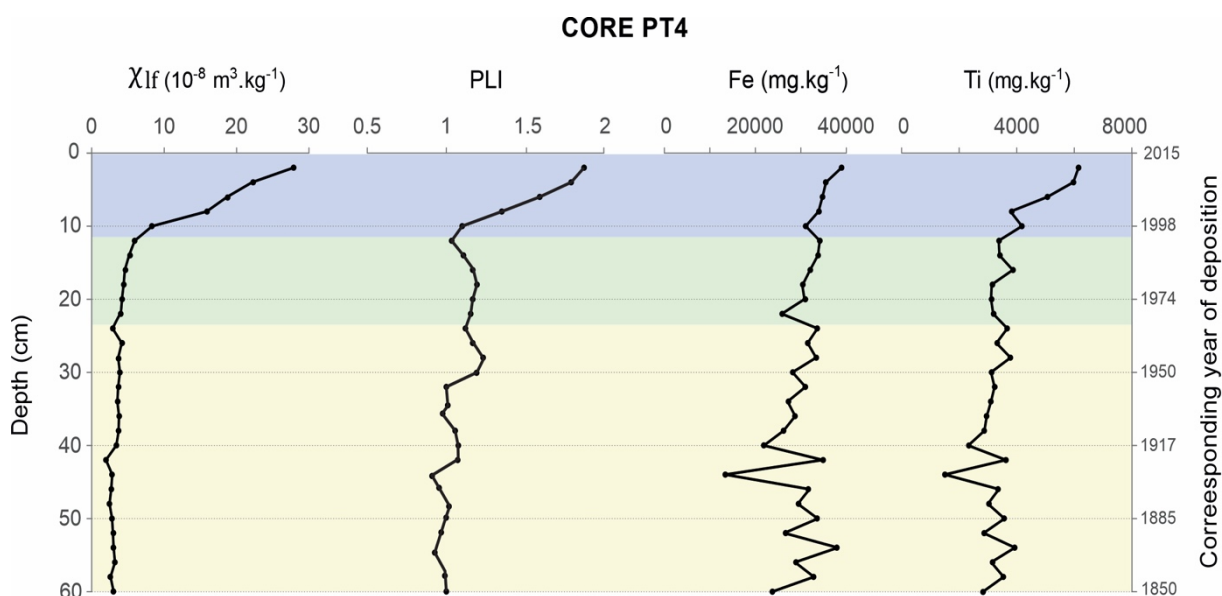


Figure 8. Comparison among the vertical profiles of low-frequency magnetic susceptibility (χ_{lf}), Pollution Load Index (PLI), and concentrations of Fe and Ti from the Patos Lagoon central region core (PT4).

In the natural process of deposition, sediments with a lower level of contamination generally cover the older layers enriched with metals. However, dredging activities, civil construction, or even natural events that induce bottom remobilization (e.g. during high river discharge conditions) can again expose the deeper layers of sediments, making metals potentially available to be incorporated into recent strata.

Given this setting, another factor that could potentially interfere in the magnetic response of the sediments from the study area is the Guaíba River largest tributary, the Jacuí River (Fig. 1). Historically, this riverbed is one of the largest sand mining areas in the State of Rio Grande do Sul, a growing activity as urbanization increases in the city of Porto Alegre (DNPM, 2017). The increase in mining in the last decades has consequently led to an increase in the availability of suspended sediments, whose fine fractions have greater potential to adsorb metals. Subsequently, the deposition of those sediments takes place in the Guaíba River (Fig. 7, green shaded area).

However, the top sediments from core G04 showed a simultaneous reduction in χ_{lf} , PLI, and the concentrations of metals, especially in Fe and Ti (Fig. 7, blue shaded area). This result might be a response to the mechanisms that currently regulate the practice of sand mining in the Jacuí River region, minimizing the uncontrolled sediment remobilization. As an example of these mechanisms, there is the CONAMA No. 237/1997 Resolution (CONAMA, 1997), which establishes in Art. 2, § 1 that mineral extraction becomes an activity subject to Environmental Licensing. Moreover, it defines the conditions, restrictions, and environmental control measures that must be obeyed by the entrepreneur. More recently, a precautionary measure was issued by the Public Ministry of the State of Rio Grande do Sul in 2013, terminating the issuing of new extraction licenses or renewing the existing ones. From this date on, the extraction has been reduced and restricted to some areas of the Jacuí River up to the sampling period of this study.

Furthermore, according to the Rational Development, Recovery, and Environmental Management of the Guaíba River Basin program (Pró-Guaíba, 2019), several environmental measures were imposed after 1995. In the first phase of this program, actions were implemented with the goal of improving the environmental conditions of the Guaíba River basin. The one that stands out aimed to fight industrial pollution, starting with the identification of polluting companies, followed by an increase in inspection and the adoption of strict criteria for environmental licensing.

The measures included the registration of the 500 most potentially polluting companies. Out of this total, 343 industries together were responsible for 89% of all the gross organic load, 64% of the nickel load, 88% of the chromium load, and 93% of the metallurgical gross load, discharged into rivers by means of industrial effluents. After the application of this set of actions, a tighter control on the discharge of industrial effluents started to take place. As a successful consequence, this program increased the volume of treated sewage from 5 to 25% in the city of Porto Alegre (Pró-Guaíba, 2019), significantly reducing the emissions of untreated wastewater into the Guaíba River, which in general are mainly composed of Cr, Cu, Ni, Pb, and Zn (Apeageyi *et al.*, 2011; Carrero *et al.*, 2013; Wawer *et al.*, 2015).

On the other hand, core PT4 behaved in an opposite manner compared to core G04, showing a considerable increase in χ_{lf} , PLI, and the concentrations of Fe and Ti in the upper portion of the profile (Fig. 8, blue shaded area). This behavior indicates that the materials associated with sand dredging and emission of urban effluents did not directly impact the PT4 area. However, regarding agriculture, our

results showed that it causes impacts from the Guaíba River (G04) to the Patos Lagoon central regions (PT4), an activity that has been expanding over the last decades demonstrated by an increase of 133% in production between 1995 and 2014 (Heuser, 2016). Moreover, our results showed that the concentrations of As, Ba, and Pb as well as of the natural elements Fe and Ti had the highest correlations with χ_{lf} in core PT4. The mud content was also positively correlated with all the studied metals in addition to both PLI and χ_{lf} . This suggests that the metals As, Ba, Pb, Fe, and Ti were adsorbed on the surface of the magnetic minerals present in the mud fraction.

The intensive agriculture growth is also followed by the use of chemical fertilizers and pesticides to control insects in crops, featuring several metals but especially As and Pb (Alves *et al.*, 2016). Thus, our results indicate that the pollution caused by fertilizers and pesticides used in agricultural activities in the study area has the potential to affect the quality of Patos Lagoon sediments.

In the southern region of Patos Lagoon, the Ti and Fe concentrations did not significantly increase in the recent sediments of core PT7 despite showing little variation over time (Fig. 9). According to the vertical profiles of these elements, there was no meaningful lithological discontinuity in the sediments deposited at this site except for some periods of increase in χ_{lf} , PLI, and the metal concentrations (Fig. 9, blue shaded areas).

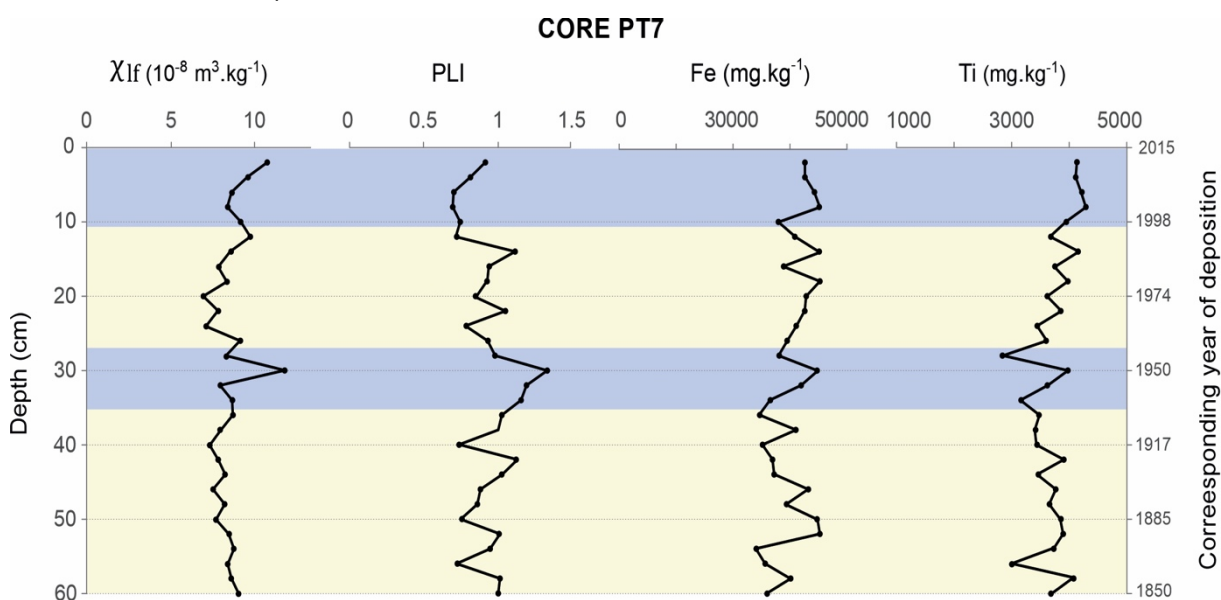


Figure 9. Comparison among the vertical profiles of low-frequency magnetic susceptibility (χ_{lf}), Pollution Load Index (PLI), and concentrations of Fe and Ti from the Patos Lagoon southern region core (PT7).

Although As, Ba, Ni, Pb, Fe, and Ti had positive correlations with χ_{lf} in this region, they were moderate or weak (Table 5), with surface concentrations close to background levels (Fig. 9). This scenario is reinforced by the low correlations coefficients between both PLI and χ_{lf} and the studied metals. In addition, the PLI values were substantially near the baseline levels, without compromising the quality of recent sediments (Fig. 9).

Therefore, χ_{lf} variations in the Patos Lagoon southern region can be attributed to erosion and the different transport in the watersheds of the Guaíba and Camaquã rivers and the São Gonçalo Channel, suppliers of sediments and magnetic materials to this area. Possibly, changes in the input of diamagnetic elements such as carbonates, quartz, and feldspars may occasionally reduce the magnetic susceptibility in periods when the contribution from the rivers that drain the Sul Rio-Grandense Shield prevails. According to Bueno et al. (2019) and based on different pollution indicators, the same location as drilling site PT7 had natural or uncontaminated conditions, with little anthropogenic influence.

6. Conclusion

The magnetic susceptibility was higher in the Guaíba River sediments due to the contribution of particles from volcanic rocks (average χ_{lf} of $576 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$). In the other regions of Patos Lagoon, sediments from intrusive, metamorphic, and sedimentary rocks showed a lower Fe proportion and a higher content of diamagnetic materials such as quartz and feldspar. Consequently, the average χ_{lf} values in the central ($6.05 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$) and southern ($8.5 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$) areas of the lagoon were lower than in the Guaíba River. The integrated analysis of the sampled cores demonstrated the influence of regional lithologies on the magnetic response of sediments.

A mixture between single-(SD) and multiple-domain (MD) magnetic minerals occurred in the Guaíba River (core G04), which were associated with lithic fragments from the Meridional Plateau volcanic rocks and with the Paraná Basin sandstone rocks, respectively. In the central region of Patos Lagoon (core PT4), thicker MD particles predominated due to the influence of the Camaquã River drainage. On the other hand, there was a reduction in the size of the magnetic particles from this profile upper strata, indicating a recent contribution of basalt fragments. In the southern region (core PT7), the smallest magnetic minerals composed exclusively by SD particles were found as a response to the larger distance from source areas.

Cores G04 and PT4 indicated enrichment of magnetic particles and heavy metals in their surface sediments, demonstrated by the increase in the magnetic susceptibility and Pollution Load Index (PLI). In addition, there were positive correlations among magnetic susceptibility, TOC, and the contents of metal and mud, facilitating the adsorption of heavy metals. On the other hand, the southern region showed no evidence of magnetic anomalies or recent enrichment of metals, indicating that this site is not currently contaminated.

The correlation coefficient analysis revealed that heavy metals in the analyzed sediments were accumulated from anthropogenic sources in the study area (such as agriculture, untreated sewage discharge, and industrial waste). However, greater environmental regulation and pollution mitigation measures for the Guaíba River have shown improvements in the quality of its recent sediments.

Our study proves that magnetic susceptibility can be used as a first approach in the evaluation of heavy metal contamination, demonstrated by its considerably strong correlation with PLI in the analyzed sites. These findings confirm the applicability of magnetic susceptibility as a simple, fast and non-destructive proxy for the investigation of metal pollution associated with several economic activities.

Acknowledgments

We are grateful to the Programa de Pós-Graduação em Geociências (PPGGEO/UFRGS), Programa de Formação de Recursos Humanos da Universidade Petrobrás (PRH-PB 215), and Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES - Edital PNPd 2010) for funding the oceanographic cruise in Patos Lagoon. J.F. Savian thanks the Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (grant 457802/2014-6) and Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS) (grant 2329-2551/14-1) for the financial support.

7. References

- Ali, H., Khan, E. & Sajad, M.A. 2013. Phytoremediation of heavy metals. Concepts and applications. *Chemosphere* 91, 869-881.
- Alloway, B.J., 2013. Heavy Metals in Soils, Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability, *Heavy metals in Soils*. Springer, Netherlands. 614 p.
- Alves, L.R., Dos Reis, A.R. & Gratão, P.L. 2016. Heavy metals in agricultural soils: from plants to our daily life. *Científica*, 44(3): 346–361
- Andrade Neto, J.S., Rigon L.T., Toldo E.E. Jr. & Schettini C.A.F. (2012) Descarga sólida em suspensão do sistema fluvial do Guaíba, RS, e sua variabilidade temporal. *Pesquisas em Geociências*, 39(2):161–171.
- Andrade, L.C. 2019. Lago Guaíba: uma análise histórico-cultural da poluição hídrica em Porto Alegre, RS, Brasil. *Eng Sanit Ambient*, 24(2): 229-237.

- Appleby, P.G. & Oldfield, F. 1978. The calculation of lead-210 dates assuming constant rate of supply ^{210}Pb to sediment. *Catena*, 5: 1-8.
- Apeageyi, E., Bank, M.S. & Spengler, J.D. 2011. Distribution of heavy metals in road dust along an urban–rural gradient in Massachusetts. *Atmos. Environ.* 45, 2310–2323.
- Baisch, P. 1994. Lesoligo-elements metalliques du systeme fluvio-lagunaire de du Patos, flux et devenir (Brésil). Bordeaux, 345p. Tese de Doutorado em Geologia Marinha. Universidade de Bordeaux I.
- Bueno, C., Figueira, R., Ivanoff, M.D., Toldo Junior, E.E., Laura Fornaro, L. & Felipe García-Rodríguez, F.G., 2019. A multi proxy assessment of long- term anthropogenic impacts in Patos Lagoon, southern Brazil. *Journal of Sedimentary Environments*, 4 (3): 276-290.
- Carrero, J.A., Arrizabalaga, I., Bustamante, J., Goienaga, N., Arana, G. & Madariaga, J.M., 2013. Diagnosing the traffic impact on roadside soils through a multianalytical data analysis of the concentration profiles of traffic related elements. *Sci. Total Environ.* 458-460, 427–434.
- CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução no 237 de 19 de dezembro de 1997. Diário Oficial da União, Brasília, 22 de dezembro de 2005, p.59-60.
- Cornell, R. M., & U. Schwertmann (2003), *The Iron Oxides: Structure, Properties, Reactions, Occurrences and Uses*, Wiley, New York, 703p.
- Costa, A.C.S., Bigham, J.M., Rhoton, F.E. & Traina, S.J. Quantification and characterization of maghemite in soils derived from volcanic rocks in southern Brazil. *Clays Clay Miner.*, 47:466-473, 1999.
- Dang, Z., Liu, C., Haigh, M.J., 2002. Mobility of heavy metals associated with the natural weathering of coal mine soils. *Environ. Pollut.* 118, 419–426.
- Dearing, J.A., Dann, R.J.L., Hay, K., Lees, J.A., Loveland, P.J., Maher, B.A. & O’Grady, K. 1996. Frequency-dependent susceptibility measurements of environmental materials. *Geophys J Int* 124:228–240.
- Dearing, J. 1999. *Environmental magnetic susceptibility: Using the Bartington MS2 System*. 2.ed. Kenilworth, Chi Publishing, 54p.
- Delaney, P. J. V. 1965. *Fisiografia e geologia da superfície da planície costeira do Rio Grande do Sul*. Publicação Especial da Escola de Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 6:1-195.
- DNPM. Departamento Nacional de Produção Mineral. 2017. Anuário Mineral Estadual – Rio Grande do Sul. 30p. Disponível em: http://www.anm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-estadual/rio-grande-do-sul/amest-2015_rs.
- Dong, C., Zhang, W., Ma, H., Feng, H., Luc, H., Dong, Y. & Yua, L., 2014. A magnetic record of heavy metal pollution in the Yangtze River subaqueous delta. *Sci. Total Environ.* 476, 368–377.

- Dunlop, D. J., & Özdemir. 1997. *Rock Magnetism, Fundamentals and Frontiers*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, U. K. 656p.
- Ernesto, M., Pacca, I. G., Hiodo, F. Y., & Nardy, A. J. R. 1990. Palaeomagnetism of the Mesozoic Serra Geral Formation, southern Brazil. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 64(2-4): 153-175.
- Evans, M.E., Heller, F., 2003. *Environmental Magnetism: Principles and Applications of Enviromagnetics*. Academic Press, New York. 299 p.
- Förstner, U., Wittman G. T. W. 1979. *Metal pollution in the aquatic environment*. Berlin: Springer Verlag. 486 p.
- Folk, R.L. & Ward, W.C. 1957. Brazos river bar: A study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, 27: 3-27.
- Gascón Díez, E., Corella, J.P., Adatte, T., Thevenon, F., Loizeau, J.-L., 2017. High-resolution reconstruction of the 20th century history of trace metals, major elements, and organic matter in sediments in a contaminated area of Lake Geneva, Switzerland. *Appl. Geochem.* 78, 1-11.
- Guan, H., Zhu, C., Zhu, T., Wu, L. & Li, Y., 2016. Grain size, magnetic susceptibility and geochemical characteristics of the loess in the Chaohu lake basin: implications for the origin, palaeoclimatic change and provenance. *J. Asian Earth Sci.* 117, 170–183.
- Grison, H., Petrovský, E., Jordanova, N. & Kapička, A., 2011. Strongly magnetic soil developed on a non-magnetic rock basement: a case study from NW Bulgaria. *Stud. Geophys. Geod.* 55, 697–716.
- Grison, H., Petrovský, E., Stejskalova, S. & Kapička, A., 2015. Magnetic and geochemical characterization of Andosols developed on basalts in the Massif Central, France. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 16 (5):1348–1363.
- Guo, G.S., Li, Y.T., 2017. Comparative of magnetism parameters and heavy metals content of street dust pollution in Wuhan. *J Environ Sci-China.* 37 (3): 868–877
- Heuser. Fundação de Economia e Estatística Siegfried Emanuel Heuser. Exportações do agronegócio. 2016. Porto Alegre. Disponível em: <<http://www.fee.rs.gov.br/indicadores/agronegocio/exportacoes/serie-historica-2/>>. Acesso em: 18 Janeiro 2020.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2010. CENSO DEMOGRÁFICO 2010. Características gerais da população, religião e pessoas com deficiência. Rio de Janeiro. Disponível em: <<ftp://ftp.ibge.gov.br>>. Acesso em: mar. 2020.
- Ivanoff, M.D., Toldo, E.E., Figueira, R.C.L. & Ferreira, P.A.L (2020). Use of ²¹⁰Pb and ¹³⁷Cs in the assessment of recent sedimentation in Patos Lagoon, southern Brazil. *Geo-Mar Lett* <https://doi.org/10.1007/s00367-019-00633-8>
- Kjerfve, B., edited by. 1986. “Comparative Oceanography of Coastal Lagoons.” In *Estuarine Variability*, edited by D. A., Wolfe. New York: Academic Press, pp. 63–81.

- Kjerfve, B. Coastal lagoons processes. In: KJERFVE, B. (ed.), Coastal lagoons processes. Amsterdam: Elsevier, 1994. p. 1-8.
- Kim, W., Doh, S.J., Yu, Y., & Lee, Y.I. 2013. Magnetic evaluation of sediment provenance in the northern East China Sea using fuzzy c-means cluster analysis. *Mar. Geol.* 337, 9–19.
- Khan, S., Hesham, A.E.L., Qiao, M., Rehman, S. & He, J.Z., 2010. Effects of Cd and Pb on soil microbial community structure and activities. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 17, 288–296.
- Liu, Q., Roberts, A. P., Larrasoana, J. C., Banerjee, S. K., Guyodo, Y., Tauxe, L., & Oldfield, F. 2012. Environmental magnetism: principles and applications. *Reviews of Geophysics*, 50 (RG4002).
- Liu, G., Liu, W., Cai, Z. & Zheng, M. 2013. Concentrations, profiles, and emission factors of unintentionally produced persistent organic pollutants in fly ash from coking processes. *J. Hazard. Mater.* 261, 421-426.
- Lu, S.G. 2000. Lithological factors affecting magnetic susceptibility of subtropical soils, Zhejiang Province, China. *Catena*, 40:359-373.
- Lu, S.G.; Xue, Q.F.; Zhu, L. & Yu, J.Y. 2008. Mineral magnetic properties of weathering sequence of soils derived from basalt in Eastern China. *Catena*, 73: 23-33.
- Lu, S., Yu, X. & Chen, Y., 2016. Magnetic properties, microstructure and mineralogical phases of technogenic magnetic particles (TMPs) in urban soils: their source identification and environmental implications. *Sci. Total Environ.* 543, 239-247.
- Loring, D.H. & Rantala, R.T.T., 1992. Manual for the geochemical analyses of marine sediments and suspended particulate matter. *Earth Science Reviews* 32, 238-282.
- Lake D.J. 1987. Heavy metals in wastewater an sludge treatment process. v.2: treatment and disposal. Florida, CRC, 92-124.
- Menegat, R., Porto, M.L., Carraro, C.C. & Fernades, L.A.D. Atlas Ambiental de Porto Alegre. 1998. Ed. Universidade / UFRGS. Capítulo 3: 36p.
- Mantelli, J.O. 2006. Processo de Ocupação no Noroeste do Rio Grande do Sul e a Evolução Agrária. *Geografia*, 31(2): 269-278.
- Motta, P.E.F., Carvalho Filho, A., Ker, J.C., Pereira, N.R., Carvalho JR., W. & Blancaneaux, P. 2002. Relações solo-superfície geomórfica e evolução da paisagem em uma área do Planalto Central Brasileiro. *Pesq. Agropec. Bras.*, 37:869-878.
- Mullins, B.A. 1977. Magnetic susceptibility of the soil and its significance in soil science. *Journal of Soil Science*, v.28, p.223-246.
- Maher, B.A. 1986. Characterization of soils by mineral magnetic measurements. *Phys. Earth Plan Inter.*, 42: 76-92.

- Magiera, T., Strzyszcz, Z., Kapička, A., & Petrovský, E. 2006. Discrimination of lithogenic and anthropogenic influences on topsoil magnetic susceptibility in Central Europe. *Geoderma* 130, 299–311.
- Magiera, T., Strzyszcz, Z., & Rachwał, M., 2007. Mapping particulate pollution loads using soil magnetometry in urban forests in the upper Silesia Industrial Region, Poland. *Forest. Ecol. Manag.* 248 (1–2): 36–42.
- Magiera, T., Jabłońska, M., Strzyszcz, Z., & Rachwał, M., 2011. Morphological and mineralogical forms of technogenic magnetic particles in industrial dusts. *Atmos. Environ.* 45, 4281–4290.
- Martins, I.R., Villwock, J.L., Martins, L.R. & Bemvenuti, C.E. 1989. The Lagoa dos Patos Estuarine Ecosystem (RS, Brazil). *Pesquisas*, 22: 5-44.
- Oldfield, F., T. A. Rummery, R. Thompson, & D. E. Walling (1979), Identification of suspended sediment sources by means of magnetic measurements: Some preliminary results, *Water Resour. Res.*, 15, 211–218.
- Pró-Guaíba. Programa para o Desenvolvimento Racional, Recuperação e Gerenciamento Ambiental da Bacia Hidrográfica do Guaíba. 2019. Disponível em: <<http://www.proguaiba.rs.gov.br/modulo1.htm>> Acessado em 13/12/2019.
- Pratama, A., Bijaksana, S., Abdurrachman, M. & Santoso, N., 2018. Rock magnetic, petrography, and geochemistry studies of lava at the Ijen Volcanic Complex (IVC), Banyuwangi, East Java, Indonesia. *Geosciences* 8, 183.
- Philipp R.P. & Machado R. 2001. Suítes graníticas do Batólito de Pelotas no Rio Grande do Sul: petrografia, tectônica e aspectos petrogenéticos. *Rev Bras Geoc* 31: 257-266.
- Ravisankar, R., Harikrishnan, N., Chandrasekaran, A., Gandhi, M.S. & Alagarsamy, R., 2018. Data on heavy metal and magnetic relationships in coastal sediments from South East Coast of Tamilnadu, India. *Data Brief* 16, 392–400.
- Roisenberg, A. & Viero, A.P. 2000. O vulcanismo Mesozóico da Bacia do Paraná no Rio Grande do Sul. p.355-374. In: Holz, M. & De Ros, L.F. (Eds.). *Geologia do Rio grande do Sul*. Edição CIGO/UFRGS. 444p.
- Rigon, L.T. 2009. O fluxo de carga sólida em suspensão do Rio Guaíba. Porto Alegre, 76p. Monografia de Conclusão de Curso, Curso de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Rose, A. W. & Bianchi-Mosquera, G. C. (1993), Adsorption of Cu, Pb, Zn, Co, Ni and Ag on goethite and hematite: A control on metal mobilization from red beds into stratiform copper deposits, *Econ. Geol.*, 88, 1226–1236.
- Rosenbaum, J. G., & Reynolds R. L. 2004. Basis for paleoenvironmental interpretation of magnetic properties of sediment from Upper Klamath Lake (Oregon): Effects of weathering and mineralogical sorting, *J. Paleolimnol.*, 31, 253–265.
- Sudarningsih, S., Bijaksana, S., Ramdani, R., Hafidz, A., Pratama, A., Widodo, W., Iskandar, I., Dahrin, D., Fajar, S.J. & Santoso, N.A., 2017. Variations in the

concentration of magnetic minerals and heavy metals in suspended sediments from Citarum River and its tributaries, West Java, Indonesia. *Geosciences* 7, 66.

Suresh, G., Ramasamy, V., Meenakshisundaram, V., Venkatachalapathy, R. & Ponnusamy, V., 2011. Influence of mineralogical and heavy metal composition on natural radionuclide contents in the river sediments. *Appl. Radiat. Isot.* 69, 1466–1474.

Yoshida, M. & Kallali, H. 2003. Environmental Magnetic Study of Surface Soil/Sediment in Northern Tunisia Field Screening for Potentially Toxic Elements Contamination. Proceedings of the 7th International Symposium on Recent Advance in Exploration Geophysics in Kyoto (RAEG2003) Kyoto University.

Shepard, F.P. & Moore, D.G., 1960. Bays of central Texas coast. In: F.P. Shepard, F.B. Phleger and T.H. Van Andel (Editors), *Recent Sediments of Northwest Gulf of Mexico*. Am. Assoc. Pet. Geol., Tulsa, pp.117-152.

Szuskiewicz, M., Łukasik, A., Magiera, T. & Mendakiewicz, M., 2016. Combination of geopedo and technogenic magnetic and geochemical signals in soil profiles e diversification and its interpretation: a new approach. *Environ. Pollut.* 214, 464–477.

Smith, N. P. 1994. Water, salt and heat balance of coastal lagoons. In: Kjerfve, B. (ed.), *Coastal Lagoons Processes*. Elsevier Oceanography Series (60), p. 69-102.

Strahler, A.N. & Strahler, A.H. 1987. *Modern Physical Geography*. John Willey and Sons, New York. 488 p.

Toldo Jr., E.E., Dillenburg, S.R., Corrêa, I.C.S. & Almeida, L.E.S.B. 2000. Holocene Sedimentation in Lagoa dos Patos Lagoon, Rio Grande do Sul, Brazil. *Journal of Coastal Research*, 16(3): 816-822.

Tomazelli, L.J., Dillenburg, S.R. & Villwock, J.A. 2000. Late Quaternary geological history of Rio Grande do Sul coastal plain, southern Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, 30(3): 470-472.

Tomlinson, D.L., Wilson, J.G., Harris, C.R. & Jeffrey, D.W., 1980. Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index. *Helgoländer Meeresunters* 33, 566-575.

Thompson, R. & Oldfield, F., 1986. *Environmental Magnetism*. Allen & Unwin, London (227 pp).

Verosub, K.L. & Roberts, A.P., 1995. Environmental magnetism: past, presents, and future. *J. Geophys. Res.* 100 (B2), 2175–2192.

Yu, L., 1989. *Environmental Applications of Mineral Magnetic Measurements: towards the Quantitative Approach*. The University of Liverpool.

Yalcin, F., Nyamsari, D.G., Paksu, E. & Yalcin, M.G., 2016. Statistical assessment of heavy metal distribution and contamination of beach sands of Antalya-Turkey: an approach to the multivariate analysis techniques. *Filomat* 30 (4): 945–952.

Yunginger, R., Bijaksana, S., Dahrin, D., Zulaikah, S., Hafidz, A., Kirana, K.H., Sudarningsih, S., Mariyanto, M. & Fajar, S.J. 2018. Lithogenic and anthropogenic

components in surface sediments from Lake Limboto as shown by magnetic mineral characteristics, trace metals, and REE geochemistry. *Geosciences* 8, 116.

Zhang, C.h., Qiao, Q., Piper, J.D.A. & Huang, B. 2011. Assessment of heavy metal pollution from a Fe-smelting plant in urban river sediments using environmental magnetic and geochemical methods. *Environ. Pollut.* 159, 3057–3070.

Zong, Y.T., Xiao, Q. & Lu, S.G. 2017. Magnetic signature and source identification of heavy metal contamination in urban soils of steel industrial city, Northeast China. *J. Soils Sediments* 17 (1): 190–203.

Walling, D. E., M. R. Peart, F. Oldfield, & R. Thompson. 1979. Suspended sediment sources identified by magnetic measurements. *Nature*, 281, 110–113.

Wang, Y., Wang, S. & Liu, M. 2017. Magnetic properties indicate sediment provenance and distribution patterns in the Bohai and Yellow Seas, China. *Cont. Shelf Res.* 140, 84–95.

Wawer, M., Magiera, T., Ojha, G., Appel, E., Kusza, G., Hu, S. & Basavaiah, N., 2015. Traffic-related pollutants in roadside soils of different countries in Europe and Asia. *Water Air Soil Pollut.* 226, 216.

Capítulo 4 – Padrões isotópicos e proveniência sedimentar do sistema hidrográfico da Lagoa dos Patos através do método Sm-Nd

(Artigo submetido ao periódico *Pesquisas em Geociências*)



Pesquisas em Geociências

[CAPA](#) [SOBRE](#) [PÁGINA DO USUÁRIO](#) [PESQUISA](#) [ATUAL](#) [ANTERIORES](#) [NOTÍCIAS](#)

Capa > Usuário > Autor > Submissões Ativas

Submissões Ativas

[ATIVO](#) [ARQUIVO](#)

ID	MM-DD ENVIADO	SEÇÃO	AUTORES	TÍTULO	SITUAÇÃO
103123	18/05/2020	ART	IVANOFF	PADRÕES ISOTÓPICOS E PROVENIÊNCIA SEDIMENTAR DO SISTEMA...	Aguardando designação

Iniciar nova submissão

CLIQUE AQUI para iniciar os cinco passos do processo de submissão.

Apontamentos

[TODOS](#) [NOVO](#) [PUBLICADO](#) [IGNORADO](#)

DATA DE INCLUSÃO	HITS	URL	ARTIGO	TÍTULO	SITUAÇÃO	AÇÃO
Não há apontamentos.						

[Publicado](#) [Ignorado](#) [Excluir](#) [Selecionar todos](#)

Autor

Submissões

- Ativo (1)
- Arquivo (0)
- Nova submissão

Conteúdo Da Revista

Pesquisa

Escopo da Busca

Todos

[Pesquisar](#)

Procurar

- Por Edição
- Por Autor
- Por título
- Outras revistas

Idioma

Selecione o idioma

Português (Brasil) [Submeter](#)

Padrões isotópicos e proveniência sedimentar do sistema hidrográfico da Lagoa dos Patos através do método Sm-Nd

Michel Doeppre IVANOFF¹, Elírio Ernestino TOLDO JR.¹, Carla Cristine PORCHER², Rommulo Vieira CONCEIÇÃO², Guilherme Annes MARTINEZ², Rubens Cesar Lopes FIGUEIRA³ & Anelise Losangela BERTOTTI⁴

(1) Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Avenida Bento Gonçalves, 9.500, CEP 91509-900, Porto Alegre, RS, Brasil. (mdi.ivanoff@gmail.com, toldo@ufrgs.br, gui_2006rs@hotmail.com).

(2) Laboratório de Geologia Isotópica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Avenida Bento Gonçalves, 9.500, CEP 91509-900, Porto Alegre, RS, Brasil. (carla.porcher@ufrgs.br, rommulo.conceicao@ufrgs.br).

(3) Departamento de Oceanografia Física, Química e Geológica, Universidade de São Paulo. Praça do Oceanográfico, 191, CEP 05508-120, Cidade Universitária, São Paulo, SP, Brasil (rfigueira@usp.br).

(4) Departamento de Geologia da Universidade Federal de Pernambuco. Avenida da Arquitetura, Cidade Universitária CEP 50740550, Recife, PE, Brasil. (aneber79@gmail.com)

Resumo. Neste trabalho realizamos análises isotópicas de Sm-Nd em sedimentos de três testemunhos de sondagem extraídos da Lagoa dos Patos, Sul do Brasil e, também, em amostras de sedimentos em suspensão coletadas nos Rios Jacuí, Camaquã e Jaguarão que atualmente constituem as principais fontes de carga líquida e sólida para o interior lagunar. Além disso, foi verificada a assinatura isotópica em amostra de sedimento lamoso coletado na Praia do Cassino, adjacente a desembocadura lagunar. O objeto principal deste estudo é a identificação das rochas fontes com drenagens que convergem para a Lagoa dos Patos e suprem a laguna com carga sedimentar. Os resultados obtidos indicam variação na distribuição espacial dos padrões isotópicos de Sm-Nd entre as bacias hidrográficas e, também, em escala temporal ao longo da coluna dos testemunhos. A região Norte da Lagoa dos Patos, sob influência direta do sistema hidrográfico Jacuí-Guaíba apresentou homogeneização nas medidas isotópicas dos sedimentos ao longo do perfil, possivelmente associada com a maior uniformidade litológica das rochas fontes. Por outro lado, as áreas centro e Sul da laguna, possuem variações significativas das rochas fontes ao longo da coluna sedimentar uma vez que as assinaturas isotópicas variaram ao longo do perfil. Além disso, os parâmetros $\epsilon_{Nd}(0)$ apresentaram valores mais negativos e idades T_{DM} mais antigas de Norte a Sul, indicando forte influência da drenagem do sistema hidrográfico Jacuí-Guaíba, ao Norte e influência dos rios Camaquã e Jaguarão ao Sul. A bacia do Jacuí possui as idades T_{DM} mais jovens e parâmetro $\epsilon_{Nd}(0)$ menos negativos devido a drenagem das litologias das rochas vulcânicas e sedimentares da Bacia do Paraná. A Bacia Hidrográfica do Rio Camaquã por drenar as rochas do embasamento cristalino apresenta idades T_{DM} mais antigas e valores de $\epsilon_{Nd}(0)$ mais negativos. A amostra de lama da Praia do Cassino apresenta características isotópicas semelhantes às drenagens da bacia do Rio Jacuí.

Palavras Chave: Sedimentação lagunar, traçador geoquímico, proveniência sedimentar, isótopos Sm-Nd.

Abstract. In this work, we performed Sm-Nd isotopic analyzes on sediments from three drilling cores extracted from Patos Lagoon, southern Brazil, as well as on suspended sediment samples from the Jacuí, Camaquã, and Jaguarão rivers. Currently, those rivers constitute the main sources of dissolved and solid loads into the inner lagoon. In addition, we also verified the isotopic signature of a muddy sediment sample collected at Cassino Beach, adjacent to the mouth of the lagoon. The main objective of these study is the identification of the source rocks associated with drainage systems that converge into Patos Lagoon and supply it with sedimentary load. Our results indicate a variation in the spatial distribution of the Sm-Nd isotopic patterns among the hydrographic basins, also observed at a temporal scale along the core columns. The northern region of Patos Lagoon, which is under the direct influence of the Jacuí-Guaíba hydrographic system, presented homogeneous isotopic measurements along the profile according to core PT2, possibly associated with the greater lithological uniformity of its source rocks. On the other hand, the central and southern areas of the lagoon showed significant variations in the source rocks along the sedimentary column, indicated by changes in the isotopic signatures along the profiles. Furthermore, the $\epsilon_{Nd}(0)$ values were more negative and the T_{DM} ages were more ancient from north to south, suggesting a strong influence of the drainage of the Jacuí-Guaíba hydrographic system in the north and of the Camaquã and Jaguarão rivers in the south. The Jacuí River Basin showed the youngest T_{DM} ages and the least negative $\epsilon_{Nd}(0)$ values due to the drainage of lithologies from volcanic and sedimentary rocks from the Paraná

Basin. The Camaquã River Basin had older T_{DM} ages and more negative $\epsilon_{Nd}(0)$ values as it drains the rocks of the crystalline basement. The muddy sediment sample from Cassino Beach presented isotopic characteristics similar to the samples influenced by the Jacuí River Basin drainage.

Keywords. Lagoon sedimentation, geochemical tracer, sedimentary provenance, Sm-Nd isotopes.

1. Introdução

A compreensão da dinâmica temporal e espacial das áreas-fontes de sedimentos, bem como a localização geográfica, o clima, o relevo e a composição litológica dessas áreas compõem atributos aferidos através das técnicas de proveniência sedimentar. Além disso, é possível determinar as principais rotas de distribuição dos sedimentos e estimar a distância e o tempo de transporte, estabelecendo a complexa história desde a origem até o sítio de deposição. Os estudos sobre a proveniência e a deposição sedimentar, em ambientes lagunares, são ferramentas que auxiliam no planejamento da ocupação dos espaços adjacentes, permitindo utilizar o solo de maneira mais racional, evitando o descontrole sobre processos erosivos e o assoreamento.

Estudos de proveniência sedimentar são tradicionalmente amparados em análises de paleocorrentes e dados derivados de forma microscópica como composição e quantificação mineralógica. Entretanto, muitas vezes essas técnicas podem não ser conclusivas quando aplicadas a sedimentos sem indicadores claros de fluxos ou submetidos a extensos processos diagenéticos (Nelson & DePaolo, 1988). Neste caso, quando a composição detrítica não é diagnóstica, é possível fazer inferências sobre os indicadores de proveniência usando variações isotópicas, a exemplo do sistema de decaimento do elemento ^{147}Sm para ^{143}Nd .

Os elementos Samário e Neodímio pertencem ao grupo denominado Elementos Terras Raras (ETRs), considerados relativamente imóveis e insolúveis, portanto, resistentes a alteração diagenética (McLennan, 1989). Ainda assim, é importante ressaltar que, embora não muito frequente, as concentrações de ETRs são passíveis de fracionamento dependendo do tipo de transporte (por exemplo, eólico, fluvial, induzido por gravidade), além de classificação e selecionamento por intemperismo mecânico. (Nesbitt & Markovics, 1997; Compton *et al.*, 2003; Garcon *et al.*, 2013).

O modelo isotópico Sm-Nd possibilita aferir rastreabilidade quanto a origem de um depósito sedimentar utilizando como referência a idade modelo T_{DM} (DM = Depleted Mantle). O modelo, proposto por DePaolo (1981), supõe que o manto é continuamente empobrecido em Nd e enriquecido em Sm, acarretando maior produção de ^{143}Nd por decaimento, e, através deste modelo, obtêm-se uma

ferramenta valiosa na identificação da idade de extração do magma formador de uma determinada suíte ígnea a partir do manto depletado.

Como os processos de erosão, transporte e deposição não afetam o sistema Sm-Nd, as razões medidas e parâmetros calculados em rochas sedimentares refletem com fidelidade as características das rochas-fonte dos detritos, sendo uma excelente ferramenta para o estudo de proveniência sedimentar (McLennan, 1989). Porém, as Bacias Sedimentares podem conter o registro de diferentes áreas fontes e com diferentes idades, nesse caso, os sedimentos irão apresentar razões isotópicas intermediárias, e as idades modelos vão representar a mistura das diversas fontes, o que ainda pode ser interpretado como idade máxima de sedimentação.

Além das idades T_{DM} o parâmetro petrogenético ϵ_{Nd} também é utilizado para o estudo de origem sedimentar em diferentes ambientes geológicos. Valores ϵ_{Nd} positivos geralmente estão associados a rochas fontes oriundas de fusão mantélica, enquanto ϵ_{Nd} negativos refletem rochas provenientes de retrabalhamento ou de fusão mantélica com contaminação crustal (DePaolo & Wasserburg, 1976).

Nesse sentido, o presente trabalho propõe a aplicação do sistema Sm-Nd para caracterizar a assinatura isotópica dos sedimentos depositados na Lagoa dos Patos e na Plataforma Continental adjacente ao canal de ligação ao Oceano. Adicionalmente, serão avaliados os sedimentos em suspensão drenados pelos rios que deságuam no interior lagunar comparando os resultados medidos neste estudo com a assinatura isotópica das rochas que compõe as bacias de drenagem com o propósito de definir as principais áreas fontes e determinar sua influência na proveniência sedimentar.

2. Área de estudo

A Lagoa de Patos, objeto principal deste estudo, representa o maior sistema lagunar da América do Sul e a maior laguna estrangulada do mundo (Kjerfve, 1986), apresentando área superficial de 10.227 km² e profundidade média de 5m (Castelão & Moller, 2006). Localizada na porção meridional do Brasil, entre as coordenadas 30° - 32°S e 50° - 52°W, apresenta um eixo principal que se estende por mais de 180 km em direção NE-SW, sendo conectada ao Oceano Atlântico por um único canal de ligação (Fig. 1).

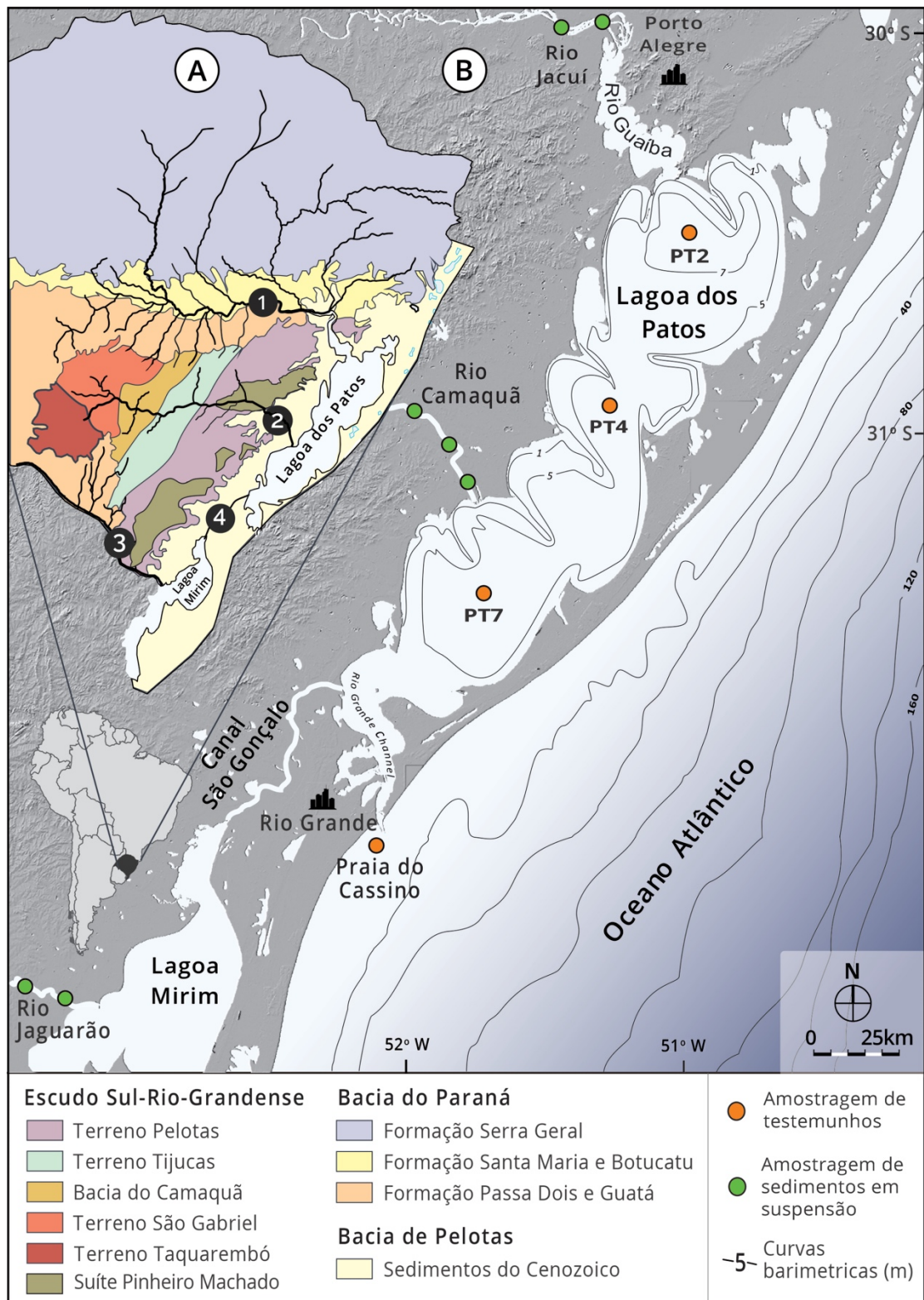


Figura 1. Área de estudo. A) Mapa das principais litologias regionais e rios que convergem para a Lagoa dos Patos, sendo (1) Rio Jacuí, (2) Rio Camaquã, (3) Rio Jaguarão e (4) Canal São Gonçalo. B) Mapa da área de estudo com destaque à Lagoa dos Patos incluindo os pontos de amostragem de sedimentos.

A Planície Costeira que engloba a área estudada foi formada durante eventos transgressivo-regressivos provocados por oscilações eustáticas do nível do mar durante o Quaternário. Como consequência dessas variações foram formados

quatro sistemas deposicionais Laguna-Barreira, designados do mais antigo para o mais recente como sistemas Laguna-Barreira I, II, III de idades pleistocênicas e o sistema Laguna-Barreira IV com idade holocênica, sendo o isolamento do sistema Lagoa dos Patos iniciado pela formação da barreira III durante o Pleistoceno tardio há aproximadamente 120.000 anos (Tomazelli *et al.*, 2000).

Os sedimentos que compõe o fundo raso, ao longo do lado oeste, são pobremente selecionados com tamanhos entre areia fina e cascalho, enquanto na margem Leste as areias apresentam tamanho predominantemente fino e são muito bem selecionadas (Martins *et al.* 1989). Os sedimentos do piso lagunar possuem menos de 4% de areia e consistem, principalmente, de silte e silte argiloso na metade Norte, enquanto a metade Sul é caracterizada por uma argila siltosa. As lamas depositadas no piso lagunar ocorrem em profundidades abaixo do nível base de erosão por ação das ondas, o qual raramente excede a 4 m (Toldo Jr. *et al.*, 2000).

O aporte sedimentar para o interior lagunar provém predominantemente da ação fluvial em que se destaca, no setor Norte, o sistema Jacuí-Guaíba, que segundo Vaz *et al.* (2006) representa a maior Bacia Hidrográfica tributária da Lagoa dos Patos com vazão média de $1483 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Baisch (1994) e Rigon (2009) realizaram estimativas indiretas da descarga sólida em suspensão provenientes do Rio Guaíba e os valores representam um aporte médio anual entre 1 a $4 \times 10^6 \text{ t} \cdot \text{ano}^{-1}$.

Os rios afluentes da Lagoa dos Patos pertencem à Bacia Atlântica e drenam uma área total de mais de 200.000 Km^2 dividindo-se em dois grandes complexos formados por diversas sub-bacias. O maior destes é o complexo formado pelos rios Jacuí-Guaíba e afluentes, que deságuam ao Norte, possuindo área de drenagem de aproximadamente 134.889 km^2 , além do Rio Camaquã, que deságua no setor Centro-Sul e possui extensão de área drenada de aproximadamente 15.432 Km^2 . O outro é o complexo da Lagoa Mirim, Rio Jaguarão e demais afluentes que se conectam a Lagoa dos Patos pelo Canal São Gonçalo formando uma área de drenagem de 51.194 Km^2 (Vieira & Rangel, 1988).

Os afluentes do Rio Jacuí, em especial nos cursos superiores das bacias hidrográficas, escoam sobre o Planalto Meridional composto pelas rochas vulcânicas da Bacia do Paraná (Formação Serra Geral). Conforme Gastal *et al.* (2005) estas rochas possuem parâmetros médios de $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ entre -6.4 a -9.4 e idades modelo T_{DM} entre $1,2$ a $1,6 \text{ Ga}$.

Os afluentes da margem esquerda do Rio Jacuí, em seus trechos médios e inferiores, escoam sobre a Supersequência Neotriássica (ou Gondwana II), em

especial sobre a Formação Santa Maria e Botucatu (Fig. 1). A Formação Santa Maria apresenta idades T_{DM} entre 1,19 a 1,33 Ga e parâmetros médios de $\epsilon_{Nd}(0)$ entre -7,6 a -9,1 (Silva *et al.*, 2006), e conforme Canile (2015), a formação Botucatu apresenta idades T_{DM} entre 1,46 a 1,49 Ga e parâmetros médios de $\epsilon_{Nd}(0)$ entre -11,8 a -12,6. Na margem direita do Rio Jacuí afloram as rochas sedimentares da Supersequência Gondwana I, com exposição dos grupos Passa Dois e Guatá que, segundo Canile (2015), apresentam valores médios de $\epsilon_{Nd}(0)$ entre -8,8 e -11,5 e idades T_{DM} entre 1,16 a 1,32 Ga.

A segunda fonte de potencial relevância no transporte sedimentar para o interior lagunar provém do Rio Camaquã, que ao escoar sobre a área do Escudo Sul-Rio-Grandense (Fig. 1), transporta sedimentos de diversas unidades litológicas a qual se destaca, no curso superior, o Terreno São Gabriel que consiste em um terreno juvenil, neoproterozóico, apresentando idades modelo T_{DM} que variam entre 0,4 e 1,35 Ga e valores de $\epsilon_{Nd}(0)$ entre -0,7 e +6,6 (Babinski *et al.*, 1996).

A jusante deste trecho do Rio Camaquã aflora a Bacia do Camaquã que, segundo Borba *et al.* (2003), os valores de $\epsilon_{Nd}(0)$ estão entre -11,9 e -14,7 e as idades T_{DM} entre 1,37 e 1,46 Ga. No seu curso médio o Rio Camaquã drena a área referente ao Terreno Tijucas, onde encontra-se o complexo Porongos o qual recobre os Gnaisses Encantadas com idades T_{DM} de 1,73 a 2,71 Ga e $\epsilon_{Nd}(0)$ entre -13,7 e -32,2 (Soliani Jr. *et al.*, 2000).

Por fim, no curso inferior, o Rio Camaquã escoar sobre o Terreno Pelotas, sendo que, área de drenagem contempla quatro complexos litológicos: A Suíte Don Feliciano (T_{DM} entre 1,18 a 1,37 Ga / $\epsilon_{Nd}(0)$ entre -9,89 e -14,2), a Suíte Pinheiro Machado (T_{DM} de 1,41 a 2,09 Ga / $\epsilon_{Nd}(0)$ entre -10,8 e -15,3), a Suíte Viamão (T_{DM} de 1,04 a 1,68 Ga / $\epsilon_{Nd}(0)$ entre -12,8 e -15,3) e a Suíte Intrusiva Encruzilhada com valores de $\epsilon_{Nd}(0)$ entre -18,73 e -23,19 e idades T_{DM} entre 1,75 a 2,08 Ga (Philipp *et al.*, 2003).

3. Amostragem e Metodologia

A análise isotópica dos sedimentos de fundo da Lagoa dos Patos foi realizada através da obtenção de três testemunhos de sondagem (Fig. 1). O perfil PT2, ao Norte, está em uma área com contribuição fluvial direta do sistema fluvial Jacuí-Guaíba; o PT4 está em uma porção intermediária em relação as fontes fluviais e o PT7, ao Sul, na proximidade do Rio Camaquã e Canal São Gonçalo, os principais

tributários que deságuam no setor Sul da Lagoa dos Patos (Fig. 1). Além disso, foi obtida amostra sedimentar na Plataforma Continental Interna (Praia do Cassino) visando avaliar o somatório das assinaturas isotópicas do sistema hidrográfico Lagoa dos Patos na proximidade da desembocadura.

A amostragem de sedimentos em suspensão nos rios avaliados foi obtida através de coleta d'água em garrafa *Nansen*, sendo posteriormente realizado o processo de filtração em bomba de vácuo com membranas de acetato de celulose. Para evitar o fracionamento por seleção granulométrica, entre o sedimento de fundo da Lagoa dos Patos e o sedimento em suspensão dos rios, optou-se por analisar apenas a fração que passou por filtro com diâmetro de 0,064 mm, ou seja, silte e argila, uma vez que a classe areia é pouco representativa nas amostras sedimentares extraídas dos testemunhos.

Os procedimentos para a aplicação do sistema isotópico Sm-Nd nas amostras sedimentares foram realizados no Laboratório de Geologia Isotópica (LGI) do CPGq/UFRGS, sendo a digestão (ou abertura) das amostras efetuada através da adição de 10mL de peróxido de hidrogênio (H_2O_2) para eliminar qualquer traço de matéria orgânica. Posteriormente foram adicionadas 2mL de ácido nítrico (HNO_3) e 5mL ácido fluorídrico (HF) concentrados, em frascos de Savilex, com secagem em chapa quente. Foram adicionados 0,1mL de cada um no traçador (spike) RS-1 ($^{149}Sm/^{150}Nd$) nas amostras.

As amostras secas foram diluídas em 5mL de ácido clorídrico (HCl), secando-se novamente. Após este procedimento, adicionou-se 1mL de HCl 2,5N ao Savilex, sendo a solução transferida para um tubo de ensaio onde foram adicionados mais 2mL de HCl 2,5N, Em seguida o tubo de ensaio foi submetido a centrifugação por 15 minutos em centrífuga Excelsa Baby I modelo 206.

A separação das alíquotas de Sm e Nd, a partir do tubo de ensaio contendo os ETR, foi efetuada em colunas de resina aniônica LN-B50-A de 100 a 200 μm . As razões isotópicas foram determinadas através de espectrômetro de massa VG SECTOR 54, com sistema multi-coletor e feixe de íons de intensidade da ordem de 1 volt ou 10-11A. As análises de Sm-Nd foram calibradas a partir do padrão La Jolla Nd, cujo valor da razão $^{143}Nd/^{144}Nd$ é de 0,511856.

4. Resultados

Os resultados da aplicação do método isotópico Sm-Nd nos sedimentos em suspensão dos rios Jacuí, Camaquã e Jaguarão, bem como nos sedimentos

contidos nos testemunhos extraídos na Lagoa dos Patos e na Praia do Cassino estão ilustrados na tabela 1.

Os valores obtidos no perfil PT2 demonstram razões $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ entre 0,512240 e 0,512261 com parâmetro $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ de menor variação entre os testemunhos avaliados, oscilando entre -7,40 a -7,80. As idades T_{DM} variaram entre 1,17 e 1,22 Ga apresentando tendência de idades mais juvenis do topo em direção à base do testemunho.

Tabela 1. Dados isotópicos de Sm-Nd das amostras sedimentares extraídas dos rios Jacuí, Camaquã, Jaguarão e dos sedimentos extraídos da Lagoa dos Patos e Praia do Cassino. As idades T_{DM} foram calculadas a partir do modelo de DePaolo (1981).

Amostra	Sm (ppm)	Nd (ppm)	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$\epsilon_{\text{Nd}}(0)$	T_{DM} (Ga)
PT2 - topo	6,27	32,75	0,115762	0,512252	-7,50	1,22
PT2 - 60 cm	5,62	29,92	0,113735	0,512240	-7,80	1,21
PT2 - 120 cm	1,51	28,18	0,112245	0,512261	-7,40	1,17
PT4 - topo	6,20	33,31	0,112523	0,512248	-7,60	1,23
PT4 - 60 cm	5,99	31,24	0,115909	0,512122	-9,80	1,39
PT4 - 120 cm	5,18	27,52	0,113835	0,512096	-10,2	1,45
PT4 - 360 cm	4,83	25,14	0,116156	0,512228	-8,30	1,23
PT7 - topo	5,68	31,17	0,110334	0,512269	-7,20	1,14
PT7 - 60 cm	7,08	37,74	0,113414	0,512212	-8,30	1,25
PT7 - 120 cm	8,02	42,28	0,114737	0,512167	-9,20	1,33
PT7 - 250 cm	10,96	43,95	0,150854	0,511981	-11,7	1,66
Camaquã 1	13,20	75,74	0,105338	0,511967	-13,3	1,50
Camaquã 2	12,70	72,58	0,105746	0,511976	-12,9	1,49
Camaquã 3	12,70	72,58	0,105746	0,511976	-12,9	1,49
Camaquã 4	14,64	83,27	0,106258	0,511969	-13,0	1,51
Jaguarão 1	14,85	88,26	0,101697	0,512092	-10,7	1,28
Jaguarão 2	12,48	73,12	0,103184	0,512094	-10,6	1,30
Jacuí 1	3,2	14,38	0,135341	0,512192	-8,70	1,35
Jacuí 2	2,24	12,34	0,128474	0,512152	-9,80	1,45
Jacuí 3	1,98	10,57	0,113686	0,512165	-9,49	1,43
Cassino	6,08	33,17	0,110943	0,512239	-7,78	1,18

Na região central da Lagoa dos Patos, avaliada através perfil PT4, a razão $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ varia entre 0,512197 a 0,512248. O parâmetro $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ oscila entre -7,60 a -10,2 com tendência de valores mais negativos na posição central do testemunho.

As idades T_{DM} apresentam diferenças mais acentuadas em relação ao PT2, oscilando entre 1,23 e 1,39 Ga.

No perfil PT7 as razões $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ variam entre 0,512167 e 0,512269 com valores de $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ entre -7,20 a -11,7, sendo as assinaturas mais negativas do topo em direção à base do perfil. As idades T_{DM} variam entre 1,14 e 1,66 Ga apresentando idades mais juvenis da base em direção ao topo do testemunho.

Os sedimentos em suspensão coletados no Rio Jacuí apresentam valores relativos à razão $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ entre 0,512192 a 0,512152 com resultados correspondentes a valores de $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ entre -8,7 e -9,8 e idades T_{DM} de 1,35 e 1,45 Ga. Por outro lado, o Rio Camaquã, com razão $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ de 0,511956 a 0,512098, possui as idades T_{DM} mais antigas comparadas os demais rios avaliados com valores entre 1,32 a 1,51 Ga e parâmetro $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ entre -10,5 a -13,3. No Rio Jaguarão a razão $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ pouco variou entre as amostras, apresentando valores entre 0,512092 a 0,512094. Estes resultados correspondem a valores muito homogêneos de $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$, entre -10,6 a -10,7, e idades T_{DM} entre 1,28 e 1,30 Ga.

5. Discussão dos resultados

As litologias que compõe as fontes de sedimentos na área de estudo são drenadas por uma vasta rede fluvial, e neste sentido, assumimos que os processos exógenos irão resultar em partículas com uma composição representativa média das diferentes rochas fontes erodidas ao longo do percurso. Assim sendo, a Lagoa dos Patos, quando atuante na condição de depocentro destes sedimentos, forma um ambiente complexo, mas do ponto de vista da proveniência, reflete uma fração significativa das principais divisões geológicas da porção Sul do Brasil.

Neste sentido, a análise isotópica realizada nos sedimentos da região Norte da Lagoa dos Patos, através do testemunho PT2, demonstrou pouca variabilidade litológica ao longo da coluna sedimentar, uma vez que o parâmetro ϵ_{Nd} apresentou valor médio de $-7,6 \pm 0,2$ e idade T_{DM} média de $1,20 \pm 0,03$ Ga (Tab. 1).

As assinaturas isotópicas do testemunho, quando comparadas as assinaturas das rochas fontes, apontam predomínio na contribuição sedimentar das rochas vulcânicas da Formação Serra Geral e das rochas sedimentares das Formação Santa Maria (Fig. 2). O diagrama mostra que as rochas da Bacia do Paraná, apresentam valores isotópicos semelhantes as amostras do perfil PT2, ainda que ocorra influência de fontes mais juvenis, possivelmente o Terreno São Gabriel, pertencente ao Escudo Cristalino, drenado pelos afluentes da margem direita do Rio

Jacuí. Adicionalmente, o desvio padrão baixo entre os parâmetros T_{DM} e ϵ_{Nd} sugere que a contribuição sedimentar é praticamente homogênea ao longo do tempo.

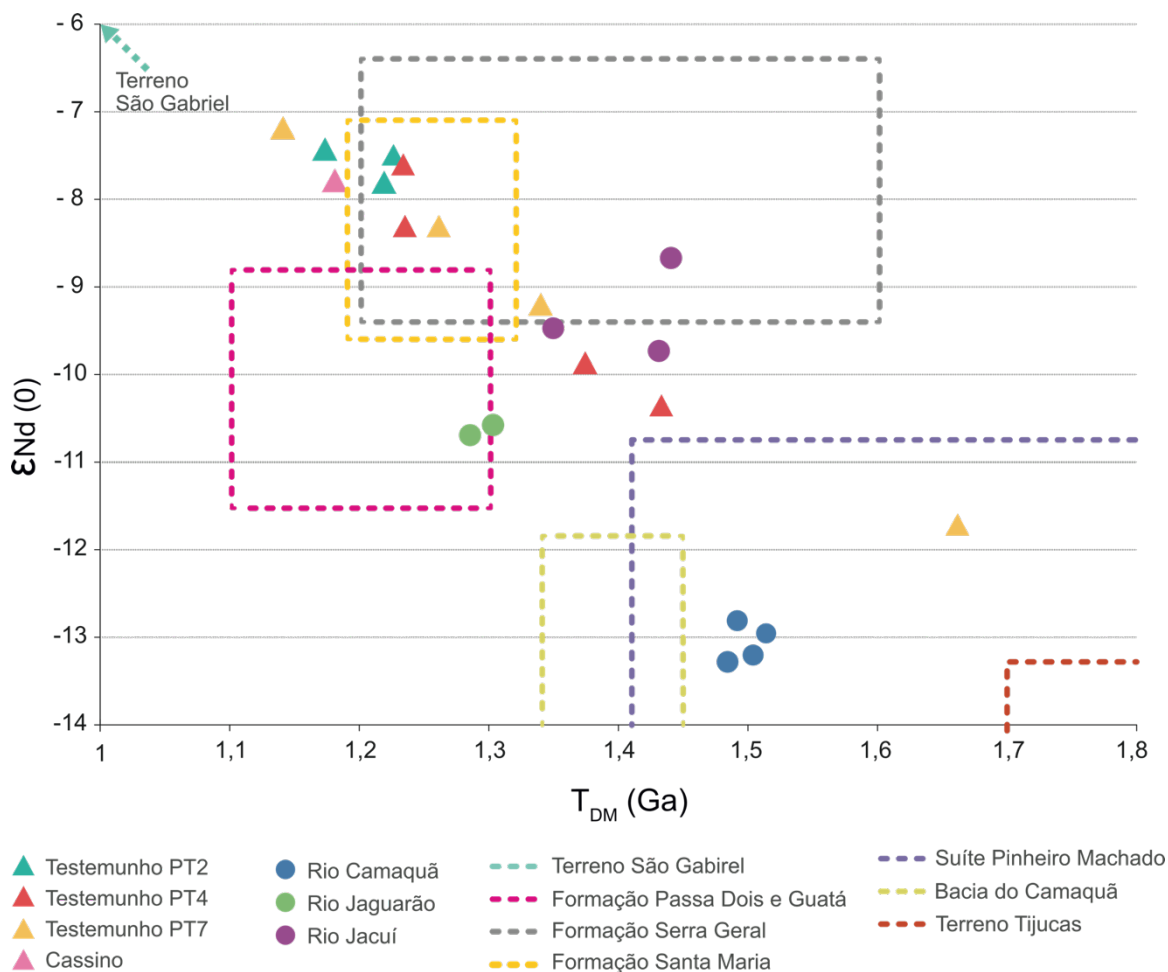


Figura 2. Idades modelo T_{DM} versus parâmetro ϵ_{Nd} (0) das amostras sedimentares extraídas na Lagoa dos Patos, na Praia do Cassino e nos rios que desembocam na Lagoa dos Patos com as prováveis áreas fontes. Extraído de: Formação Serra Geral (Barreto, 2016); Formação Santa Maria (Silva *et al.*, 2006); Bacia do Camaquã (Borba *et al.*, 2003); Terreno São Gabriel (Babinski *et al.*, 1996); Formação Botucatu (Canile, 2015); Terreno Tijucas (Saalmann *et al.*, 2005); Suíte Pinheiro Machado (Philipp *et al.*, 2003).

Esses resultados estão de acordo com a proporção da área drenada pela rede hidrográfica do Rio Jacuí. Conforme Delaney (1965), os derrames basálticos da Formação Serra Geral correspondem a 35% da área drenada pelos rios que deságuam na Lagoa dos Patos, enquanto as formações sedimentares paleozoicas da Bacia do Paraná, representam 20% da área de escoamento. Adicionalmente, o maior volume hídrico das redes fluviais, a declividade e as características litológicas do Planalto Meridional, são fatores que colaboram para a maior produção de sedimentos em relação aos rios que escoam sobre o Escudo Cristalino.

Por outro lado, os dados isotópicos dos sedimentos em suspensão coletados no trecho inferior do Rio Jacuí se mostraram distintos em relação às amostras

avaliadas no testemunho PT2 (Tab. 1). As amostras desse perfil apresentaram ϵ_{Nd} mais negativos (média de $-9,33 \pm 0,6$) e idades T_{DM} mais antigas (média de $1,41 \pm 0,05$ Ga). Os resultados sugerem a contribuição de partículas em suspensão no Rio Jacuí provenientes das rochas do Escudo Cristalino, que possuem características isotópicas semelhantes a estes valores (Fig. 2, Tab. 2). Tais sedimentos, drenados pelos afluentes da margem direita, possivelmente não encontram condições hidrodinâmicas de deposição na Lagoa dos Patos e seguem o fluxo em direção ao oceano, e, ou, depositam no interior do Rio Guaíba antes do ponto amostrado.

Tabela 2 - Síntese das assinaturas isotópicas referente as principais litologias, drenadas pelos rios que desembocam na Lagoa dos Patos (compilado da literatura).

Litologia	ϵ_{Nd} (0)	T_{DM} (Ga)	Referência
Terreno Tijucas	-13,7 a -32,2	1,73 a 2,71	Soliani Jr. <i>et al.</i> (2000)
Bacia do Camaquã	-11,9 a -14,7	1,37 a 1,46	Borba <i>et al.</i> (2003)
Terreno São Gabriel	+6 a -0,7	0,4 a 1,35	Babinski <i>et al.</i> (1996)
Formação Serra Geral	-6,4 a -9,4	1,20 a 1,60	Gastal <i>et al.</i> (2005)
Formação Santa Maria	-7,6 a -9,1	1,19 a 1,32	Silva <i>et al.</i> (2006)
Formação Botucatu	-11,8 a -12,6	1,46 a 1,49	Canile (2015)
Formação Passa Dois e Guatá	-8,8 a -11,5	1,16 a 1,32	Canile (2015)
Suíte Pinheiro Machado	-10,8 a 15,3	1,41 a 2,09	Philipp <i>et al.</i> (2003)

A área central da Lagoa dos Patos, avaliada pelo perfil PT4, os dados isotópicos de Sm-Nd são menos radiogênicos em relação ao Norte, com parâmetro ϵ_{Nd} médio de $-9 \pm 1,2$ e idades T_{DM} de $1,32 \pm 11$. Os resultados demonstram que ocorrem alterações nas fontes sedimentares ao longo do tempo, pois a posição central do testemunho contém assinaturas isotópicas que diferem em relação aos valores encontrados da base e topo (Tab. 1, Fig. 2).

O intervalo de sedimentação correspondente às posições do topo e da base ocorrem contribuições de fontes mais juvenis e mantélicas, evidenciando valores ϵ_{Nd} menos negativos (entre -7,6 e -8,3) e idades T_{DM} sensivelmente mais jovens (Tab. 1). Por outro lado, as camadas intermediárias amostradas demonstram alterações dessa tendência devido a deposição de sedimentos com idades T_{DM} mais antigas com componentes crustais, em que se pode destacar a amostra PT4-120 cm com parâmetro ϵ_{Nd} -10,2 e idade T_{DM} de 1,45 Ga.

Interpretações possíveis para esta condição englobam a contribuição de litologias contidas nas áreas de erosão localizadas ao longo do curso do Rio

Camaquã, incluindo a reciclagem de unidades sedimentares pretéritas, como a Bacia do Camaquã e, ou, exposição de rochas do Terrenos Pelotas, a exemplo da Suíte Pinheiro Machado (Fig. 2). Juntos, esses setores litológicos apresentam idades mais antigas e parâmetros ϵ_{Nd} mais negativos (Tab. 2), provavelmente contribuindo na sedimentação nesse intervalo de tempo.

A datação realizada por ^{14}C cm em bivalve espécie *Erodona mactroides* (articulada e em posição de vida) na camada sedimentar em que estava contida a amostra PT4-120, indica que a idade de sedimentação desse intervalo ocorreu aproximadamente em 3.572 ± 29 anos A.P., o que corresponde a transição para o período de aridez ocorrido no Holoceno (Marcott *et al.*, 2013).

Esse evento determinou uma deterioração climática evidenciada por perda significativa da cobertura vegetal e mudanças nas características hidrográficas do Sul do Brasil (Stevaux, 2000). Considerando a retração na cobertura vegetal do Bioma Pampa, as chuvas fortes e intermitentes e a maior declividade inerente ao curso superior da Bacia do Rio Camaquã, é procedente que litologias a montante determinem papel relevante na produção de sedimentos nesse intervalo de tempo.

Por outro lado, a sedimentação recente do testemunho, verificada na amostra PT4-topo, possui ϵ_{Nd} menos negativo e T_{DM} mais juvenil, sendo indicativo da influência das litologias sedimentares e vulcânicas da Bacia do Paraná drenadas pelo Rio Jacuí e afluentes. A influência da Formação Serra Geral se reflete principalmente na forma de assinaturas isotópicas mais radiogênicas, típicas de rochas de contribuição basáltica, com os menores valores médios dos parâmetros ϵ_{Nd} e T_{DM} , quando comparados as litologias cratônicas da região.

A alternância de proveniência sedimentar na posição central do piso lagunar é condizente com as condições hidrodinâmicas locais, sendo importante ressaltar que ocorrem frequentes reversões no fluxo de correntes e ondas em consequência da atuação dos ventos. Esta característica é determinante na circulação interna da Lagoa dos Patos devido a dimensão e orientação do eixo longitudinal (Nordeste-Sudoeste) coincidir com a direção predominante dos ventos (Fernandes *et al.*, 2002; Castelão & Möller Jr., 2003).

O vento de Nordeste, atuando sobre a lâmina d'água, gera um fluxo de águas na direção Sul, ocasionando um gradiente de pressão em direção ao oceano. Por outro lado, o vento de Sudoeste, atuando continuamente, gera um fluxo de água na direção Norte (Möller, 2001), e neste sentido, a alternância destas condições determinarão reversões na proporção de sedimentos provenientes dos rios

Camaquã ou Jacuí que depositam na posição amostrada pelo testemunho PT4 (Fig. 3).

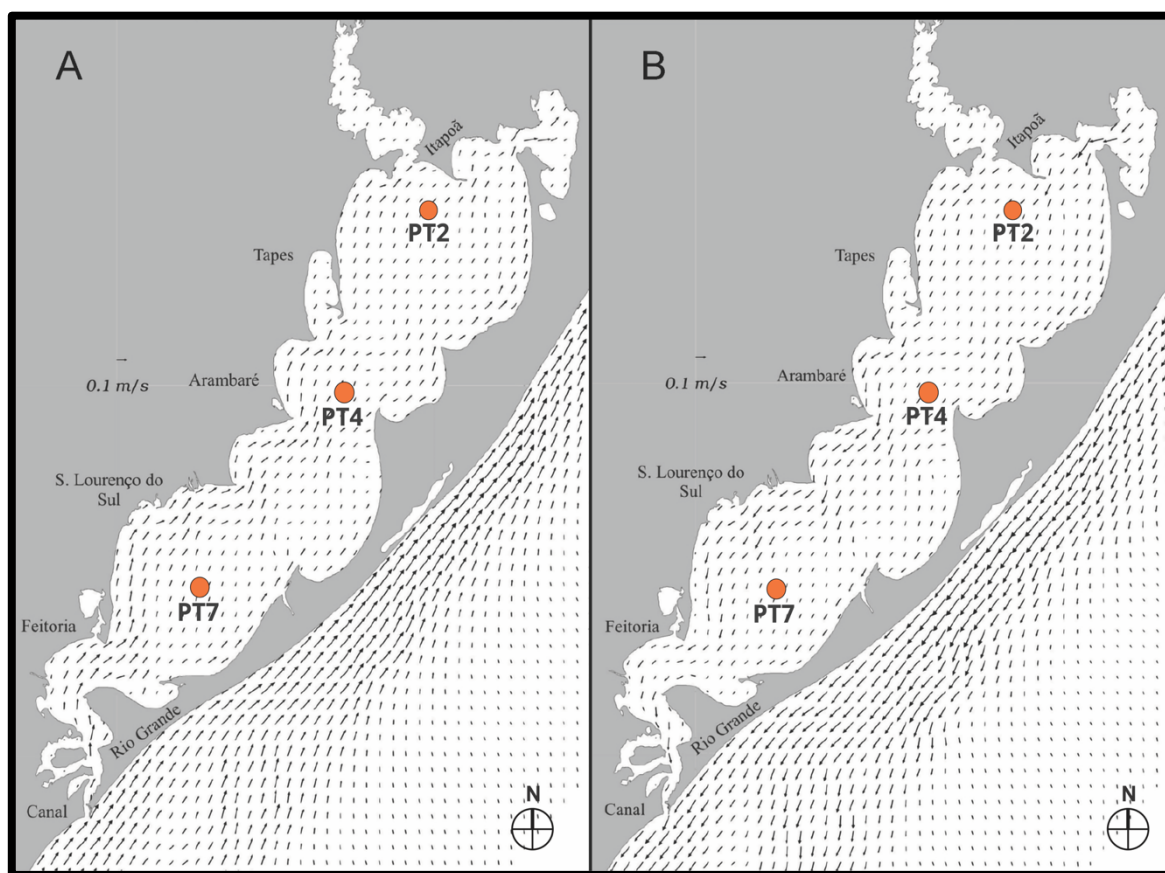


Figura 3. A) Simulação de correntes geradas após 5 dias pelo vento com direção Nordeste. B) Simulação de correntes geradas após 5 dias pelo vento com direção Sudoeste. Modificado de Castelão & Möller Jr. (2003).

Os parâmetros isotópicos Sm-Nd nas amostras coletadas do testemunho PT7 apresentaram a maior variação entre todos os pontos estudados, sendo o parâmetro médio ϵ_{Nd} $-9,1 \pm 1,9$ e as idades T_{DM} de $1,35 \pm 0,22$ Ga. Na porção superior do testemunho ocorrem as idades T_{DM} mais jovens e parâmetros ϵ_{Nd} menos negativos comparados aos extratos inferiores do perfil. Essa característica sugere que durante o período mais recente a deposição foi influenciada por material detrítico proveniente das rochas juvenis do Terreno São Gabriel expostas à erosão fornecendo partículas transportadas pelo Rio Camaquã até o local de deposição.

Além disso, o componente sedimentar provavelmente recebe contribuição de frações finas relacionadas às fontes distais mais jovens, proveniente das drenagens da Bacia do Paraná, que apresentam dados compatíveis com este intervalo. Ambos os compartimentos mencionados estão atualmente associados com a prática da agricultura que, devido ao aumento crescente da atividade na região, promove o desflorestamento e o conseqüente aumento na produção de sedimentos.

Por outro lado, a amostra retirada na base do perfil (PT7-250cm) apresentou idade T_{DM} anormalmente antiga (1,66 Ga), indicando diferenças na composição de rochas fontes quando comparada aos valores superficiais que oscilam entre 1,1 a 1,3 Ga. A idade de deposição na base do perfil, estimada por datação de bivalve espécie *Clausinella gayi* (em posição de vida) pelo método ^{14}C , corresponde a 3.461 ± 26 anos A.P. Este período é correlato ao período de aridez do Holoceno, o que determinaria condições análogas ao centro da Lagoa dos Patos em que ocorreu maior deposição proveniente do Escudo Cristalino. É provável que, neste intervalo de tempo, a deposição sedimentar contava com maior contribuição do Rio Camaquã, especificamente erodindo a Suíte Pinheiro Machado que apresenta componentes crustais mais antigos compatíveis a esse intervalo datado por ^{14}C .

Como observado anteriormente no Rio Jacuí, o Rio Camaquã apresenta assinatura isotópica do sedimento em suspensão distinta do material depositado no piso lagunar adjacente, sendo possível verificar essa correlação nos perfis PT4 e PT7 (Tab. 1, Fig. 2). Os valores de ϵ_{Nd} no sedimento em suspensão são os mais negativos (média $-13 \pm 0,1$), e as idades T_{DM} mais antigas (média $1,5 \pm 0,01$ Ga) dentre todas amostras avaliadas neste estudo.

Os resultados demonstram influência do embasamento cristalino nessa drenagem através da adição de componentes mais antigos e menos radiogênicos de origem crustal. Porém, quando ingressam na Lagoa dos Patos os sedimentos suspensos sofrem mistura com a carga transportada pelas drenagens do Norte, alterando a assinatura isotópica antes da deposição no piso lagunar. Por outro lado, o Rio Jaguarão apresenta dados isotópicos condizentes às litologias sedimentares do Grupo Passa Dois e Guatá, predominantes em sua margem esquerda (Tab. 1, Fig. 2) com pouca variação em suas assinaturas.

A Plataforma Continental interna (Praia do Cassino), próxima a desembocadura da Lagoa dos Patos, representa o exutório de toda rede de drenagem investigada neste estudo, o que pressupõe uma zona de intensa mistura envolvendo múltiplas fontes e, conseqüentemente, grande heterogeneidade do ponto de vista da proveniência.

Ainda assim, é possível constatar que a assinatura isotópica dos sedimentos lamosos nesse local (ϵ_{Nd} -7,78 e idade T_{DM} de 1,18 Ga) se mostraram muito similares aos valores encontrados no testemunho extraído na região Norte da Lagoa dos Patos (PT2), que por sua vez, apresentaram predomínio de sedimentos provenientes do sistema Jacuí-Guaíba (Tab. 1, Fig. 2).

Segundo Mahiques *et al.* (2008), a Margem Continental Sul-brasileira, apresenta cobertura sedimentar lamosa transportada pela drenagem do Rio de la Plata, sendo os valores médios de ϵ_{Nd} próximos a -9,3. Entretanto, os resultados deste estudo possibilitam avaliar com melhor detalhamento a assinatura isotópica na plataforma interna, adjacente a desembocadura lagunar, demonstrando a influência de sedimentos provenientes das litologias regionais, erodidas do setor Sul do Brasil (ϵ_{Nd} -7,78). Esta evidência é reforçada pelo trabalho de Abreu & Calliari (2005), que caracterizaram a sedimentação desse local como composta por sedimentos síltico-argilosos, denominados por fácies Patos, provenientes da Lagoa dos Patos e depositados por floculação na desembocadura.

Embora ocorra, evidentemente, contribuição das demais litologias drenadas que convergem para a Lagoa dos Patos, o predomínio da assinatura do sistema Jacuí-Guaíba pode ser explicado pela área de drenagem superior em relação às demais. Segundo Vaz *et al.* (2006), a descarga do Rio Jacuí é predominante na Lagoa dos Patos, compondo aproximadamente 62% da média anual, o que determinaria o maior volume de sedimentos transportados ao oceano. Além disso, as características litológicas do Planalto Meridional, por onde escoam grande parte das drenagens ao Norte, favorecem a produção de sedimentos finos com maior potencial de serem transportados até o Oceano (Martins *et al.*, 1989).

6. Conclusão

Os resultados apresentados neste trabalho constituem a primeira análise regional das assinaturas isotópicas de Sm-Nd na carga sedimentar que converge para a Lagoa dos Patos a partir das diferentes rochas fontes situadas no entorno do sistema lagunar. No que se refere as idades T_{DM} e parâmetros ϵ_{Nd} foi possível aferir indicador de rastreabilidade nos sedimentos tanto nos rios quanto no piso lagunar e na Praia do Cassino, adjacente ao canal lagunar.

A região Norte da Lagoa dos Patos apresentou reduzida variação nas litologias que suprem o piso lagunar, caracterizando esta área como uma região de contribuição sedimentar constante ao longo do tempo. O Rio Jacuí drena as principais rochas que depositam sedimentos ao Norte da Lagoa dos Patos, sendo estes compostos principalmente por partículas erodidas das formações Serra Geral e Santa Maria. O sedimento suspenso no Rio Jacuí apresenta influência das litologias pertencentes ao Escudo Cristalino, porém estes sedimentos, em sua

maioria, seguem o fluxo em direção ao oceano devido a condições desfavoráveis de deposição nos setores estudados.

A área central da Lagoa dos Patos apresenta reversão na contribuição sedimentar sendo possível correlacionar este processo com as correntes geradas pelos ventos que, dependendo das direções, podem transportar a pluma de suspensão dos sedimentos do Rio Camaquã ou do Rio Jacuí até este local. Na área Sul é evidente a deposição de sedimentos erodidos do Escudo Cristalino através da influência do Rio Camaquã, ainda que no sentido da base ao topo do perfil estudado, os resultados sugerem deposição gradativa de sedimentos provenientes do Rio Jacuí.

A desembocadura da Lagoa dos Patos exporta uma carga de sedimentos representativa do somatório das drenagens que convergem para o interior lagunar, mas quando depositados na praia do Cassino, definem uma assinatura isotópica com maior semelhança às drenagens provenientes do Rio Jacuí. Esta característica, no setor adjacente a desembocadura, contraria a tendência do predomínio da assinatura isotópica do Rio de la Plata na plataforma interna Sul-rio-grandense.

7. Bibliografia

Abreu, J.G.N. & Calliari, L.J. 2005. Paleocanais na Plataforma Continental Interna do Rio Grande do Sul: Evidências de uma drenagem fluvial pretérita. *Revista Brasileira de Geofísica*, 23(2): 123-132.

Babinski, M., Chemale Jr., F., Hartmann, L.A., Van Schmus, W.R. & Silva, L.C. 1996. Juvenile accretion at 750–700 Ma in southern Brazil. *Geology* 24: 439-442.

Babinski, M., Chemale Jr. F., Van Schmus, W.R. & Silva, L.C. 1997. U-Pb and Sm-Nd geochronology of the Neoproterozoic granitic-gneissic Dom Feliciano Belt, southern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 10: 263-274.

Baisch, P. 1994. Lesoligo-elements metalliques du systeme fluvio-lagunaire de du Patos, flux et devenir (Brésil). Bordeaux, 345p. Tese de Doutorado em Geologia Marinha. Universidade de Bordeaux I.

Barreto, C.J.S, Lafon, J.M., De Lima, E. F. & Sommer, C. A. 2016. Geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic insight into the low-Ti basalts from southern Paraná Igneous Province, Brazil: the role of crustal contamination. *International Geology Review*, 58: 1-26.

Borba, A. W., Mizusaki, A.M.P., Silva, D.R. A., & Kawashita, K. 2003. Razões Isotópicas $^{87}\text{Rb} / ^{86}\text{Rr}$, $^{87}\text{Rr} / ^{86}\text{Sr}$ e $^{143}\text{Nd} / ^{144}\text{Nd}$ como Traçadores de Proveniência de Rochas Sedimentares Siliciclásticas: Exemplos no Grupo Camaquã (Paleozóico inferior, RS, Brasil). *Pesquisas em Geociências*, 30(2): 39-50.

Canile, F.M. 2015. Geologia isotópica em zircões detríticos (U-Pb, Hf e O) e em rocha total (Sm-Nd e Pb-Pb) das rochas da Bacia do Paraná em Santa Catarina. São Paulo, 321p. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

Castelão, R. M. & Möller Jr., O. O. 2003. Sobre a circulação tridimensional forçada por ventos na Lagoa dos Patos. *Atlântica*, 25(2): 91-106.

Castelão, R. & O. Moller Jr, O.O. 2006. A modeling study of Patos lagoon (Brazil) flow response to idealized wind and river discharge: dynamical analysis. *Brazilian Journal of Oceanography*, 54 (1): 1-17.

Compton, J.S., White, R.A. & Smith, M. 2003. Rare earth element behaviour in soils and salt pan sediments of a semi-arid granitic terrain in the Western Cape, South Africa. *Chem. Geol.*, 201: 239-255.

Delaney, P.J.V. 1965. Fisiografia e Geologia da a superfície da Planície Costeira do Rio Grande do Sul. *Publ. Esp. da Esc. Geologia UFRGS*, 6: 1-195.

DePaolo, D.J. & Wasserburg, G.J. 1976. Inferences about magma sources and mantle structure from variations of $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$. *Geophys. Res. Lett.*, 3:743-746

DePaolo, D.J. 1981. Neodymium isotopes in the Colorado Front Range and crust mantle evolution in the Proterozoic. *Nature*, 291: 193-196.

Fernandes, E.H.L., Dyer, K.R., Möller Jr., O.O. & Niencheski, L.F.H. 2002. The patos lagoon hydrodynamics during an el nino event (1998). *Continental Shelf Research*, 22 (11-13): 1699– 1713.

Frantz, J.C., Botelho, N.F., Pimentel, M.M., Potrel, A., Koester, E. & Teixeira, R.S. 1999. Relações isotópicas Rb-Sr e Sm-Nd e idades do magmatismo granítico brasileiro da região leste do Cinturão Dom Feliciano no Rio Grande do Sul: Evidências de retrabalhamento de crosta continental paleoproterozoica. *Revista Brasileira de Geociências*, 29 (2): 227-232.

Garcon, M., Chauvel, C., France-Lanord, C., Huyghe, P. & Lavé, J., 2013. Continental sedimentary processes decouple Nd and Hf isotopes. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 121: 177-195.

Gastal, M.C.P., Lafon, J.M., Hartmann, L.A. & Koester, E. 2005. Sm–Nd isotopic investigation of Neoproterozoic and Cretaceous igneous rocks from southern Brazil: A study of magmatic processes *Lithos*, 82: 345–377.

Kjerfve B (1986) *Comparative Oceanography of Coastal Lagoons*. New York, Academic Press, 509p.

Mahiques, M. M., Tassinari, C. G. T., Marcolini, S., Violante, R A., Figueira, R.C.L., Silveira, I.C.A., Burone, L. & Mello e Sousa, S.H. 2008. Nd and Pb isotope signatures on the Southeastern South American upper margin: Implications for sediment transport and source rocks. *Marine Geology*, 250: 51-63.

- Marcott, S.A., Shakun, J. D. Clark, P.U. & Mix, A.C. 2013. A Reconstruction of Regional and Global Temperature for the Past 11,300 Years. *Science*, 339: 1198-1201.
- Martins, I.R., Villwock, J.L., Martins, L.R. & Bemvenuti, C.E. 1989. The Lagoa dos Patos Estuarine Ecosystem (RS, Brazil). *Pesquisas*, 22: 5-44.
- McLennan, S.M., 1989. Rare earth elements in sedimentary rocks: influence of provenance and sedimentary processes. In: Lipin, B.R., McKay, G.A. (Eds.), *Geochemistry and Mineralogy of Rare Earth Elements*. *Rev. Mineral.* 21: 169-200.
- Möller Jr., O.O., Castaing, P., Salomon, J. & Lazure P. 2001. The influence of local and non-local forcing effects on the subtidal circulation of Patos Lagoon. *Estuaries*, 24: 297-311.
- Nelson, B.K. & D.J. DePaolo. 1988. Comparison of isotopic and petrographic provenance indicators in sediments from Tertiary continental basins of New Mexico. *Journal of Sedimentary Petrology*, 58: 348-357.
- Nesbitt, H.W. & Markovics, G. 1997. Weathering of granodioritic crust, long-term storage of elements in weathering profiles, and petrogenesis of siliciclastic sediments. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 61: 1653-1670.
- Niencheski, L.F.H. & Jahnke, R.A. 2002. Benthic Respiration and Inorganic Nutrient Fluxes in the Estuarine Region of Patos Lagoon (Brazil). *Aquatic Geochemistry*, 8: 135-152.
- Philipp, R.P., Machado, R. & Chemale Jr., F. 2003. Reavaliação e Novos Dados Geocronológicos (Ar/Ar, Rb/Sr e Sm/Nd) do Batólito Pelotas no Rio Grande do Sul: Implicações Petrogenéticas e Idade de Reativação das Zonas de Cisalhamento. *Geol. USP Sér. Cient.*, 3: 71-84.
- Rigon, L.T. 2009. O fluxo de carga sólida em suspensão do Rio Guaíba. Porto Alegre, 76p. Monografia de Conclusão de Curso, Curso de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Roisenberg, A. & A.P. Viero, 2000. O Vulcanismo Mesozoico da Bacia do Paraná no Rio Grande do Sul. In: Holz, M., L.F. De Ros (Eds.). *Geologia do Rio Grande do Sul*, Centro de Investigação do Gondwana/Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p. 355-374.
- Saalmann, K., Hartmann, L.A., Remus, M.V.D., Koester, E. & Conceição, R.V., 2005. Sm-Nd isotope geochemistry of metamorphic volcano-sedimentary successions in the São Gabriel Block, southernmost Brazil: evidence for the existence of juvenile Neoproterozoic oceanic crust to the east of the Rio de la Plata craton. *Precambrian Research*, 136: 159-175.
- Scherer, C.M.S., U.F. Faccini & E.L. Lavina, 2000. Arcabouço Estratigráfico do Mesozoico da Bacia do Paraná. In: Holz, M. & L.F. DeRos (Eds.). *Geologia do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre. Centro de Investigação do Gondwana/Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p. 335-354.

Silva, D.R.A., Mizusaki, A.M.P., Anjos, S.M.C., Koester, E. & Borba, A.W. 2006. Provenance of fine-grained sedimentary rocks derived from Rb-Sr and Sm-Nd analyses: the example of the Santa Maria Formation (Triassic, Paraná Basin, Southern Brazil). *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis*, 13(2): 135-149.

Soliani Jr., E.; Kawashita, K. & Baitelli, R. (2000) A Geologia isotópica do Escudo Sul-rio-grandense, parte I: método isotópicos e valor interpretativo. In: Holz, M.; De Ros, L.F. (Eds.) *Geologia do Rio Grande do Sul*. CIGO-UFRGS, p. 161-174.

Stevaux, J. C. 2000. Climatic events during the Late Pleistocene and Holocene in the upper Parana River: correlation with NE Argentina and South-Central Brazil. *Quaternary International*, 72(1): 73-85.

Toldo Jr., E.E., Dillenburg, S.R., Corrêa, I.C.S. & Almeida, L.E.S.B. 2000. Holocene Sedimentation in Lagoa dos Patos Lagoon, Rio Grande do Sul, Brazil. *Journal of Coastal Research*, 16(3): 816-822.

Tomazelli, L.J., Dillenburg, S.R. & Villwock, J.A. 2000. Late Quaternary geological history of Rio Grande do Sul coastal plain, southern Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, 30(3): 470-472.

Vaz, A. C.; Möller Jr., O. O. & Almeida, T. L. D. 2006. Análise quantitativa da descarga dos rios afluentes da Lagoa dos Patos. *Atlântida*, 28(1): 13-23.

Vieira, E.F. & Rangel, S.R.S. 1988. Planície costeira do Rio Grande do Sul: Geografia física, vegetação e dinâmica sócio-demográfica. Porto Alegre: Sagra, 256p.

Zerfass, H., Lavina, E.L., Schultz, C.L., Garcia, A.J.V., Faccini, U.F. & Chemale Jr., F. 2003. Sequence stratigraphy of continental Triassic strata of southernmost Brazil: a contribution to South-western Gondwana palaeogeography and palaeoclimate. *Sedimentary Geology*, 161: 85-105.

Zerfass, H., F. Chemale Jr. & E.L. Lavina, 2005. Tectonic control of the Triassic Santa Maria Supersequence of the Paraná Basin, southernmost Brazil, and its correlation to the Waterberg Basin, Namibia. *Gondwana Research*, 8: 163-176.

Capítulo 5 – Considerações Finais

(Síntese Integradora e Referências Bibliográficas)

10. SÍNTESE INTEGRADORA

Visando contribuir para a compreensão dos processos deposicionais na Lagoa dos Patos e reconhecer os condicionantes que definem a origem, a quantidade e a qualidade dos sedimentos que depositam no seu interior esta tese desenvolveu dados inéditos, sendo os resultados dessa pesquisa apresentados na forma de artigos científicos, os quais seguiram a sequência descrita nesta síntese.

O primeiro artigo denominado *Use of ^{210}Pb and ^{137}Cs in the assessment of recent sedimentation in Patos Lagoon, southern Brazil*, publicado no periódico *Geo-Marine Letters*, interpretou as taxas de sedimentação na Lagoa dos Patos e os principais condicionantes que governam a variabilidade nos diversos locais amostrados por testemunhos sedimentares. Para chegar aos resultados publicados foram utilizadas ferramentas consagradas mundialmente que consistem em análises isotópicas integradas pelos elementos ^{210}Pb e ^{137}Cs . O modelo de datação e a taxa de sedimentação obtida pelo radionuclídeo ^{137}Cs apresentou resultados muito semelhantes aos obtidos por ^{210}Pb , o que possibilitou utilizá-lo com um *proxy* para validação dos valores de taxa de sedimentação, melhorando a confiabilidade dos dados.

Este trabalho possibilitou reconhecer em quais áreas depositam os maiores volumes de sedimentos, além da influência climática e fluvial em cada setor. Os parâmetros climáticos, mineralógicos e o relevo no Rio Grande do Sul propiciam condições favoráveis a intemperização e erosão das rochas fornecendo expressivos volumes de sedimentos que são transportados para o interior lagunar.

Nesse sentido, comprovou-se que o norte da Lagoa dos Patos ocorre a maior taxa de sedimentação em relação as demais áreas avaliadas devido ao transporte de sedimentos provenientes do Rio Guaíba, que por sua vez, estende sua influência, nos sedimentos atuais, até a posição centro-norte onde foi amostrado o testemunho PT4. Próximo ao Rio Camaquã ocorre o menor volume de sedimentos depositados nos estratos recentes em função da maturidade deste rio que transporta menor carga de sedimentos quando comparado às drenagens tributárias do Rio Guaíba.

Porém, quando observada a deposição de sedimentos ao longo da coluna sedimentar - em situações de elevada precipitação - a exemplo do fenômeno atmosférico-oceânico El Niño, nas proximidades das redes fluviais ocorrem aumentos significativos nas taxas de sedimentação. Neste caso, os locais mais próximos ao Rio Guaíba e ao Rio Camaquã (PT2 e PT8) durante o fenômeno El Niño, são os locais em ocorrem as maiores taxas de sedimentação, sendo que, em

situações extremas os resultados demonstram aumento na deposição no piso lagunar de até 262%.

Os resultados desse artigo reforçam a necessidade de aumentar o controle sobre o desmatamento vinculado à agricultura, pois a prática dessa atividade, em detrimento dos recursos naturais, potencializa os processos erosivos e a produção de sedimentos intensificando a deposição e o assoreamento no piso lagunar.

O segundo artigo intitulado *Magnetic parameters of holocenic sediments from Patos Lagoon and Guaíba River as indicators of heavy metal pollution*, integrado a esta tese, apresentou como objetivo verificar a qualidade dos sedimentos que depositam no piso da Lagoa dos Patos. Uma preocupação importante acrescentada neste trabalho foi avaliar simultaneamente o setor Meridional do Rio Guaíba e assim monitorar a qualidade do sedimento do maior tributário da Lagoa dos Patos antes de entrar na laguna e sofrer o efeito de diluição.

Nesse caso, foi utilizada a combinação de duas técnicas consagradas que integra avaliação de susceptibilidade magnética e análises químicas que medem a concentração de metais pesados. A susceptibilidade, além de fornecer um *proxy* confiável, não destrutivo e de baixo custo para estimar enriquecimento de metais em sedimentos, fornece elementos de rastreabilidade litológica das partículas depositadas.

Este trabalho demonstrou que a expansão da agricultura nas últimas décadas apresenta potencial para modificar os parâmetros deposicionais, tanto no Rio Guaíba quanto na Lagoa dos Patos. O aumento da erosão sobre os basaltos da Formação Serra Geral tem gradativamente aumentando o teor de Ferro e Titânio nos sedimentos depositados nestes corpos d'água.

Sedimentos finos são potenciais carreadores de poluentes adsorvidos por meio de troca catiônica, comprometendo a qualidade ambiental quando associados a metais no ambiente. Nesse sentido, a pesquisa constatou que ocorre forte correlação no fundo lamoso do Rio Guaíba e da Lagoa dos Patos entre os metais tóxicos, além dos elementos Fe e Ti. Adicionalmente, os resultados relativos ao índice PLI indicaram que já ocorre sinais de poluição, mas, ainda que os níveis não sejam de extrema degradação, merecem atenção especial.

No Rio Guaíba as mudanças promovidas nas últimas décadas, como o maior controle de despejo de efluentes industriais e urbanos, bem como o maior controle sobre os processos de dragagem, apresentaram resultados promissores na redução do PLI e da concentração de metais no Rio Guaíba. A pesquisa prova, através de

destes indicadores, melhorias nas condições ambientais ao sul do Rio Guaíba, local que representa um grande potencial de monitoramento da poluição em direção à Lagoa dos Patos. Por fim, este trabalho constitui um arquivo importante dos níveis de metais contidos nos sedimentos do sistema Guaíba-Patos, sendo um importante registro de monitoramento, evolução ou background para trabalhos de pesquisas que objetivarem análises químicas futuramente.

O terceiro e último artigo que compõe esta tese intitulado *Padrões isotópicos e proveniência sedimentar do sistema hidrográfico da Lagoa dos Patos através do método Sm-Nd*, procurou desenvolver uma primeira análise isotópica dos elementos Sm-Nd transportados a partir das drenagens que desembocam na Lagoa dos Patos, além de reconhecer a assinatura isotópica dos sedimentos depositados tanto no leito lagunar quanto na Plataforma Continental adjacente ao canal de Rio Grande.

A motivação que envolve o desenvolvimento desta pesquisa reside no fato que os sedimentos mais recentes depositados no Sul do Rio Guaíba e área central da Lagoa dos Patos apresentaram mudanças de composição química e na resposta magnética, sugerindo anomalias litológicas que foram interpretadas como modificações na Bacia de Drenagem. Diante disso, a preocupação principal foi determinar a proveniência dos sedimentos recentes coletados no topo de testemunhos sedimentares e compara-los com extratos mais antigos.

Os resultados mostram que o Norte da Lagoa dos Patos tem predomínio de sedimentação proveniente das rochas vulcânicas e sedimentares da Bacia do Paraná ao longo de todo o perfil. Não ocorre mudanças significativas nesse local, ainda que proporcionalmente as análises magnéticas e químicas já revelam, nos extratos superiores do Rio Guaíba, aumento de fragmentos líticos do basalto, que neste trabalho foi vinculado ao aumento de processos erosivos provocados pela agricultura. A análise isotópica Sm-Nd não reconhece exatamente a proporção de partículas provenientes do basalto ou arenito, porém o uso de outros *proxies*, como o magnetismo ambiental e análise químicas, apresentaram vantagens adicionais nesta interpretação.

Os setores Centro e Sul da Lagoa dos Patos podem revelar alterações na deposição sedimentar em termos de quantidade e proveniência, sendo governada por diversos aspectos relativos a mudanças climáticas de curto período (El Niño) e longo período. As datações por ^{14}C realizadas nos testemunhos PT4 e PT7 apresentaram idades inseridas no intervalo climático semiárido do Holoceno coincidindo, em ambos perfis, com aumento na proporção de sedimentos de

assinaturas compatíveis com o Escudo Cristalino que pode ter associação com a retração da cobertura vegetal e aumento concomitante dos processos erosivos.

Portanto, os objetivos propostos nesta tese foram concluídos de forma satisfatória, entretanto como todo trabalho científico com prazo de término determinado, possibilita recomendações para trabalhos futuros. Neste sentido, seria de grande relevância continuar as pesquisas com análises químicas nos principais afluentes do Rio Guaíba para detectar possíveis fontes de poluição em cada bacia, criando um monitoramento integrado das regiões econômicas com potenciais impactos no ambiente. Esse controle se torna vital nos afluentes da Lagoa dos Patos considerando a importância estratégica deste recurso natural com vistas a manutenção da biodiversidade.

11. BIBLIOGRAFIA

Ahn, Y.S., Nakamura, F. & Chun, K. W. 2010. Recent history of sediment dynamics in Lake Toro and applicability of ^{210}Pb dating in a highly disturbed catchment in northern Japan. *Geomorphology* 114: 284-293.

Allinson, M.A., Kineke, G. C., Gordon, E.S. & Goñi, M.A. 2000. Development and reworking of a seasonal flood deposit on the inner continental shelf off the Atchafalaya River. *Continental Shelf Research*, 20: 2267-2294.

Alperin, M.J., Suayah, I.B., Benninger, L.K. & Martens, C.S. 2002. Modern organic carbon burial fluxes, recent sedimentation rates, and particle mixing rates from the upper continental slope near Cape Hatteras, North Carolina (USA). *Deep-Sea Research II* 49: 4645 - 4665.

Appleby, P.G. & Oldfield, F. 1978. The calculation of lead-210 dates assuming constant rate of supply ^{210}Pb to sediment. *Catena* 5: 1-8.

Appleby, P.G., Richardson, N.E. & Nolan, P.J. 1991. ^{241}Am dating of lake sediments. *Hydrobiologia*, 214: 35-42.

Beasly, E.L. 1987. Change in diatom assemblage of Rehoboth Bay, Delaware and the environmental implications. M.S. Thesis, Univ. Delaware, 209 p.

Bellucci, L.G., Frignani, M., Cochran, J.K., Albertazzi, S., Zaggia, L., Cecconi, G. & Hopkins, H. 2007. ^{210}Pb and ^{137}Cs as chronometers for salt marsh accretion in the Venice Lagoon e links to flooding frequency and climate change. *Journal of Environmental Radioactivity*, 97: 85-102.

Ben Othman, D., Polvé, M. & Allègre, C. 1984. Nd-Sr isotopic composition of granulites and constraints of the evolution of the lower continental crust. *Nature* 307: 510-515.

Bertotti, A.L. 2005. Metodologia Samário/Neodímio: Uma Abordagem Analítica Simplificada e Alguns Exemplos Aplicativos. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 105p.

Bertram, C.J. & Elderfield H. 1993. The geochemical balance of the rare earth elements and neodymium isotopes in the oceans. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 57(9):1957- 1986.

Bitjukova, L.; R. Scholger & M. Birke. 1999. Magnetic susceptibility as indicator of environmental pollution of soils in Tallinn. *Phys. Chem. Earth*, 24(9):829-835.

Blatt, H., Middleton, G. & Murray, R. 1972. Origin of sedimentary rocks. Prentice Hall, Inc. New Jersey. 634p.

Boothroyd, J.C., Friedrich, N. E. & McGinn, S. R. 1985. Geology of Microtidal Coastal Lagoons: Rhode Island. *Marine Geology* 63: 35-76.

Butler, R.F. Paleomagnetism: magnetic domains to geologic terranes, Electronic Edition, Arizona, 1998. 238p. <http://www.geo.arizona.edu/Paleomag/1998>.

Calmet, D. & Fernandez, J.M. 1990. Caesium distribution in northwest Mediterranean seawater, suspended particles and sediments. *Cont. Shelf Res.*, 10: 895-913.

Canet, A. & Jacquemin, R., 1990. Methods for measuring radium isotopes: Gamma spectrometry. International Atomic Energy Agency. The Environmental Behaviour of Radium. Vienna, v.1, c. 3-4 (Technical Report Series, 310).

Carson, B., Ashley, G.M., Lennon, G.P., Weisman R.N., Nadeau, J.E., Jo Hall, M., Faas, R.W., Zeff, M. L., Grizzle, R. E., Schuepfer, F. E., Young, C. L., Meglis', A. J., Carney, K. F. & Ralph Gabriel, 1988. Hydrodynamics and Sedimentation in a Back Barrier Lagoon-Salt Marsh System, Great Sound, New Jersey A Summary. *Marine Geology* 82: 123-132.

Chung, Y. & Chang, W.C. 1995. Pb-210 fluxes and sedimentation rates on the lower continental slope between Taiwan and the South Okinawa Trough. *Continental Shelf Research*, 15: 149-164.

Cochran, J.K., Frignani, M., Salamanca, M., Bellucci, L.G. & Guerzoni, S., 1998. Lead-210 as a tracer of atmospheric input of heavy metals in the northern Venice Lagoon. *Marine Chemistry* 62: 15-29.

Dearing, J. A., and R. J. Flower. 1982. The magnetic susceptibility of sedimenting material trapped in Lough Neagh, Northern Ireland, and its erosional significance, *Limnol. Oceanogr.*, 27: 969-975.

DePaolo, D.J. & Wasserburg G.J. 1976. Inferences about magma sources and mantle structure from variations of $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$. *Geophysics Research Letters* 3: 743-746.

DePaolo, D.J. & Wasserburg G.J. 1979. Sm/Nd age of the Stillwater Complex and the mantle curve for neodymium. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 43: 999-1008.

- DePaolo, D.J. 1988. Neodimium Isotope Geochemistry - An Introduction. Springer-Verlag, 490p.
- Diaz, A.F., Studzinsky, C.D., & Mechoso, C.R. 1998. Relationships between Precipitation Anomalies in Uruguay and Southern Brazil and Sea Surface Temperature in the Pacific and Atlantic Oceans. *Journal of Climate*, 11(2): 251-271.
- Dickin, A.P. 1995. Radiogenic Isotope Geology. Cambridge University Press, 490p.
- Dillenburg, S.R. & Burnett, W.C. 1995. Taxas de Sedimentação da Laguna de Tramandaí, no Estado do Rio Grande do Sul, Determinadas Através do Método do Pb-210. In: V Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário. Anais do V Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário. Niterói - RJ. v1. p. 224-229.
- Donoghue, J.E. 1987. Rapid sediment infilling of a delta-estuary complex, Apalachicola Bay, Florida. *Eos, Trans. Am. Geophys. Union*, 68: 17-74.
- Dunlop, D. J., and Ö. Özdemir. 1997. Rock Magnetism, Fundamentals and Frontiers, Cambridge Univ. Press, Cambridge, U. K.
- Eakins, J.D. & Morrison, R.T. 1978. New procedure for the determination of Lead-210 in lake and marine sediments. *J. Appl Radiat. Isot.* 29: 531-536.
- Eckelman, W.R., Broecker, W.S.E. & Kulp, J.L. 1960. Half-life of 210Pb. *Physical Review Letters*, 118: 698-701.
- Evans, J.E., Johnson, T.C. & Alexander Jr. E.C. 1981. Sedimentation Rates and Depositional Processes in Lake Superior From 210Pb Geochronology. *J. Great Lakes Res.* 7(3): 299-310.
- Evans, M. & Heller, F. 2003. Environmental magnetism: principles and applications of enviromagnetics (Vol. 86). Academic press, New York.
- Fairbridge, R.W. 1980. The estuary: its definition and geodynamic cycle. In: E. Olausson and I. Cato (Editors), *Chemistry and Biogeochemistry of Estuaries*. Wiley, New York, p.1-35.
- Faure, G. & Mensing, T.M. 2005. *Isotopes: Principles and Applications*. John Wiley Sons. 897 p.
- Figueira, R.C.L. & Cunha, I.I.L. 1993. A contaminação dos oceanos por radionuclídeos antropogênicos. *Quím. Nova*, 21(1): 73-77.
- Figueira, R.C.L., Silva, R.N., Figueiredo, A.M.G. & Cunha, I.I.L. 1997. Instrumental analysis by gamma spectrometry of low level caesium-137 in marine samples. *Proceedings of an International Conference (Goiânia, Brasil)*, 329-337.
- Figueira, R.C.L. 2000. Inventário de radionuclídeos artificiais em água do mar e sedimentos da costa sul do Brasil. Tese de doutorado. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo. 169 p.

- Folk, R.L. & Ward, W.C. 1957. Brazos river bar: A study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, 27: 3-27.
- Förstner, U. & Wittmann, G.T.W., 1981. *Metal Pollution in the Aquatic Environment*. New York, Springer Verlag, 486 p.
- Fukumoto, M.M. 2007. Determinação da história deposicional recente do Alto Estuário Santista, com base nos teores de metais e na suscetibilidade magnética dos sedimentos. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. Instituto Oceanográfico. São Paulo, SP. 134 p.
- Gascón Díez, E., Corella, J.P., Adatte, T., Thevenon, F., Loizeau, J.-L., 2017. High-resolution reconstruction of the 20th century history of trace metals, major elements, and organic matter in sediments in a contaminated area of Lake Geneva, Switzerland. *Appl. Geochem.* 78, 1-11.
- Goldberg, E.D. & Koide M. 1962. Geochronological studies of deep-sea sediments by the ionium-thorium method. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 26: 417-450.
- Goldberg, E.D. 1963. Geochronology with ^{210}Pb . In: *International Symposium on Radioactive Dating*. Vienna, p. 121-131.
- Grimm, A.M. & Silva Dias, P.L. 1995. Analysis of tropical-extratropical interactions with influence functions of a barotropic model. *Journal of Atmospheric Sciences*, 52(20): 3538-3555.
- Grimm, A.M., Ferraz, S.E.T., & Gomes, J. 1998. Precipitation anomalies in Southern Brazil associated with El Niño and La Niña events. *Journal of Climate*, 11: 2863-2880.
- Grimm, A.M., Barros, V.R. & Doyle, M.E. 2000. Climate variability in southern South America associated with El Niño and La Niña events. *Journal of Climate*, 13: 35-52.
- Grousset, F.E., Biscaye, P.E., Zindler, A., Prospero, J. & Chester, R. 1988. Neodymium isotopes as tracers in marine sediments and aerosols: North Atlantic. *Earth and Planetary Science Letters*, 87: 367-378.
- Guan, H., Zhu, C., Zhu, T., Wu, L., Li, Y., 2016. Grain size, magnetic susceptibility and geochemical characteristics of the loess in the Chaohu lake basin: implications for the origin, palaeoclimatic change and provenance. *J. Asian Earth Sci.* 117, 170-183.
- Guo, G.S., Li, Y.T., 2017. Comparative of magnetism parameters and heavy metals content of street dust pollution in Wuhan. *J Environ Sci-China*. 37 (3), 868-877
- Hanesch, M., Scholger, R. 2002. Mapping of heavy metal loadings in soils by means of magnetic susceptibility measurements. *Environmental Geology*, 42: 857-870.
- Hasenack, H. & Ferraro, L.W. 1989. Considerações sobre o clima da região de Tramandaí, RS. *Pesquisas em Geociências*, 22: 53-70.

Herz, R. 1977. Circulação de águas de superfície na Lagoa dos Patos. Tese de Doutorado, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas. Universidade de São Paulo, 266 p.

Heller, F., Z. Strzyszcz, and T. Magiera. 1998. Magnetic record of industrial pollution in forest soils of Upper Silesia, Poland, *J. Geophys. Res.*, 103, 17,767–17,774,

Hornig, C. S., and C. A. Huh (2011), Magnetic properties as tracers for source-to-sink dispersal of sediments: A case study in the Taiwan Strait, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 309: 141-152.

Hornig, C. S., and A. P. Roberts. 2006. Authigenic or detrital origin of pyrrhotite in sediments: Resolving a paleomagnetic conundrum, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 241: 750-762.

Hoffmann, V., M. Knab, and E. Appel (1999), Magnetic susceptibility mapping of roadside pollution, *J. Geochem. Explor.*, 66: 313-326.

Huh, C. & Su, C., 1999. Sedimentation dynamics in the East China Sea elucidated from ^{210}Pb , ^{137}Cs and $^{239, 240}\text{Pu}$. *Marine Geology*, 160: 183-196.

IBGE. Pesquisa de informações básicas municipais: Perfil dos municípios brasileiros. Rio de Janeiro: IBGE, 2008. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/perfilmunic/2008/munic2008.pdf> Acesso em: 12 novembro 2019.

Innocent, C., Fagel, N. & Hillaire-Marcel, C. 2000. Sm-Nd isotope systematics in deep-sea sediments: clay-size versus coarser fractions. *Marine Geology*, 168: 79-87.

Ising, G. (1943), On the Magnetic Properties of Varved Clay: Line of Investigation: Measurements on a Varve Series from Viby in Southern Sweden, 37 pp., Almqvist and Wiksell, Stockholm.

Ivanoff, M.D., Toldo Jr, E.E., Figueira, R.C.L. & Ferreira, P.A.L. 2017. Geocronologia com ^{210}Pb na avaliação das taxas de sedimentação e da dinâmica deposicional na Lagoa Itapeva, sul do Brasil. *Pesquisas em Geociências*, 44(3):489–500

Ivanovich, M. & Harmon, R.S. 1992. Uranium-series disequilibrium: applications to earth, marine, and environmental sciences. 2^o ed., Oxford Clarendon Press, Oxford, New York, 910p.

Jacobsen, S.B. & Wasserburg G.J. 1980. Sm-Nd isotopic evolution of chondrites. *Earth and Planetary Science Letters*, 50:139-155.

Jacobsen, S.B. & Wasserburg G.J. 1984. Sm-Nd isotopic evolution of chondrite. *Earth and Planetary Science Letters*, 66:191-213.

Kansanen, P.H.T., Jaakkola, S., Kulmala, R. & Suutarinen. 1991. Sedimentation and distribution of gamma-emitting radionuclides in bottom sediments of Southern lake Pajanne, Finland, after the Chernobyl accident. *Hidrobiologia*, 222:121-140.

Kapicka, A.; E. Petrovsky; S. Ustjak & K. Machackova. 1999. Proxy mapping of fly-ash pollution of soils around a coal-burning power plant: a case study in the Czech Republic. *J. Geochem. Explor.*, 66:291-297.

Kapička A., Jordanova N., Petrovský E. and Ustjak S., 2001. Effect of different soil conditions on magnetic parameters of power-plant fly ashes. *J. Appl. Geophys.*, 48, 93-102.

Kathren, R.L. 1984. Radioactivity in the environment: sources, distribution and surveillance. Nova lorque: Harwood Academic Publishers, 397 p.

Kawashita, K. & Torquato J.R. 1998. Método Samário-Neodímio. *Revista de Geologia*, 11: 53-85.

Kim, W., Doh, S.J., Yu, Y., Lee, Y.I., 2013. Magnetic evaluation of sediment provenance in the northern East China Sea using fuzzy c-means cluster analysis. *Mar. Geol.* 337: 9-19.

Kirchner, G. 2011. ^{210}Pb as a tool for establishing sediment chronologies: examples of potentials and limitations of conventional dating models. *Journal of Environmental Radioactivity*, 102: 490-494.

Kjerfve, B. 1986. "Comparative Oceanography of Coastal Lagoons". In *Estuarine Variability*, edited by D. A., Wolfe. New York: Academic Press, pp. 63-81.

Koide, M. & Goldberg, E.D. 1961. Pb-210 in natural waters. *Science*, 134: 98-99.

Koide, M., Soutar, A. & Goldberg, E.D. 1972. Marine geochemistry with ^{210}Pb . *Earth and Planetary Science Letters*, 14: 442-446.

Koide, M., Bruland, K.W.E. & Goldberg, E.D. 1973. Th-228/Th-232 and Pb-210 geochronologies in marine and lake sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 37: 1171-1187.

Krishnaswamy, S., Lal, D., Martin, J.M. & Meybeck, M., 1971. Geochronology of lake sediments. *Earth and Planetary Science Letters*, 11: 407-414.

Koczy, F. 1958. Natural radium as a tracer in the ocean. In: *Procedures of 2nd United Nation International Conference of Peaceful Uses of Atomic Energy*. Genebra, 1958, v. 18: 351 - 357.

Lacerda, L.D., bidone, E.D. Guimarães, A.F. & Pfeiffer, W.C. 1994. Mercury Concentration in Fish from the Itacaiunas-Paraopebas River System, Carajás region, Amazon. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 3: 66-72.

Lesueur, P., Jouanneau, J.M., Boust, D., Tastet, J.P. & Weber, O. 2001. Sedimentation rates and fluxes in the continental shelf mud fields in the Bay of Biscay (France). *Continental Shelf Research* 21: 1383 - 1401.

Li, X., Wai, O.W.H., Li, Y.S., Coles, B.J., Ramsey, H. & Thornton, I. 2000. Heavy metal distribution in the sediment profiles of the Pearl River estuary, South China. *Appl. Geochem.*, 15: 567-581.

- Liu, Q., Roberts, A.P., Larrasoana, J.C., Banerjee, S.K., Guyodo, Y., Tauxe, L., & Oldfield, F. 2012. Environmental magnetism: principles and applications. *Reviews of Geophysics*, 50: 4-6.
- Lima, G.M.P., Vilas Boas, G.S., Costa, A.B. & Argollo, R.M. 2011. Taxas de sedimentação recentes provenientes dos métodos Cs137 e Pb210 e estimativa de preenchimento do estuário Jacuípe, Bahia, Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, 41(1): 44-55.
- Ligero, R.A., Ramos-Lerate, I., Barrera, M. & Casas-Ruiz, M. 2001. Relationships between sea-bed radionuclide activities and some sedimentological variables. *J. Environ. Radioac.*, 57: 7-19.
- Ligero, R. A., M. Barrera; M. Casas-Ruiz, D. Sales & F. López- Aguayo. 2002. Dating of marine sediments and time evolution of heavy metal concentrations in the Bay of Cádiz, Spain. *Environm. Pollut*, 118: 97-108.
- Lisitzin, A.P. 1972. Sedimentation in the world ocean. *Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Special Publication 17*: 218 p.
- Loring, D.H. & Rantala, R.T.T. 1992. Manual for the geochemical analyses of marine sediments and suspended particulate matter. *Earth Science Reviews* 32, 238-282.
- Lowrie W. 2004. *Fundamentals of Geophysics, Second Edition*. Swiss Federal Institute of Technology, Zurich. Cambridge University Press. p. 288-298.
- Lu, X. & Matsumoto, E. 2005. Recent sedimentation rates derived from 210Pb and 137Cs methods in Ise Bay, Japan. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 65: 83-93.
- Lugmair, G.W. & Scheinin N.B. 1975. Sm-Nd systematics of the Stanneru meteorite. *Meteorites LO (abstract)* 447-448.
- Lugmair, G.W., Marti K., Kurtz J.P., Scheinin N.B. 1976. History and genesis of lunar troctolito 76535 or: How old is old? *Proc. 7th Lunar Planet Science Conference. Geochimica et Cosmochimica Acta* 2009-2033.
- Maher, B. A. 1988. Magnetic properties of some synthetic sub- micron magnetites, *Geophys. J.*, 94: 83-96.
- Maher, B. A., R. Thompson, and L. P. Zhou. 1994. Spatial and temporal reconstructions of changes in the Asian palaeomonsoon: A new mineral magnetic approach, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 125: 46-471.
- Maher, B. A. (1998), Magnetic properties of modern soils and loessic paleosols: Implications for paleoclimate, *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 137: 25-54,
- Mahiques, M.M., Tassinari, C.C.G., Marcolini, S., Violante, R.A., Figueira R.C.L., Silveira, I.C.A., Burone, L. & Mello e Sousa, S.H. 2008. Nd and Pb isotope signatures on the Southeastern South American upper margin: Implications for sediment transport and source rocks. *Marine Geology*, 250: 51–63.

- Martins, I.R., Villwock, J.A., Martins, L.R. & Benvenuti, C.E. 1989. The Lagoa dos Patos Estuarine Ecosystem. *Pesquisas em Geociências*, 2: 5-44.
- Medeiros, P.R.P. 1992. Estudo do Sistema Lagunar-Estuarino de Tramandaí-Imbé: Física e Química da Água. Porto Alegre, 112p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Ecologia/UFRGS.
- McLennan, S.M., Taylor, S.R., McCulloch, M.T. & Maynard, J.B. 1990. Geochemical and Nd-Sr isotopic composition of deep-sea turbidites: crustal evolution and plate tectonic associations. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54: 2015-2050.
- Milliman, J.D. & Meade, R.H. 1983 World-wide delivery of river sediment to the oceans. *Journal of Geology*, 91: 1-21.
- Monna, F., Mathieu, D., Marques Jr., A. N., Lancelot, J. & Bernat, M., 1996. A comparison of PERALS to alpha spectrometry and beta counting: a measure of the sedimentation rate in a coastal basin. *Analytica Chimica Acta* 330: 107- 115.
- Mozeto, A.A. 2004. Sedimentos e Particulados Lacustres: Amostragens e Análises Biogeoquímicas. In: Bicudo, C. E. de M. e D. de C. Bicudo. (orgs.). *Amostragem em Limnologia*. São Carlos: RIMA, p. 329 - 351.
- Nichols, M. 1986. Storage efficiency in estuaries. In: *Proc. Int. Symp. Soc. River Sedimentation*, 3rd (Jackson, Miss.), pp. 273-289.
- Nichols, M. 1989. Sediment Accumulation Rates and Relative Sea-Level Rise in Lagoons. *Marine Geology*, 88: 201-219.
- Notsu, K., Mabuchi H., Yoshioka O., Matsuda J. & Ozima M. 1973. Evidence of the extinct nuclide ^{146}Sm in "Juvinas" achondrite. *Earth and Planetary Science Letters* 19:29-36.
- Noureddine, A., Menacer, M., Boudjenoun, R., Benkrid, M., Boulahdid, M., Kadi-Hanifi, M., Lee, S. H. & Povinec, P.P. 2006. ^{137}Cs in seawater and sediment along the Algerian coast. *Radioac. Environ.*, 8: 156-164.
- Oertel, G.F., Kearney, M.S., Leatherman, S.P. & Woo, H.J., 1989. Anatomy of a barrier platform: outer barrier lagoon, southern Delmarva Peninsula, Virginia. In: L.G. Ward and G.M. Ashley (Editors), *Physical Processes and Sedimentology of Siliciclastic-Dominated Lagoonal Systems*. *Marine Geology*, 88: 303-318.
- Oguri, K., Matsumoto, E., Yamada, M., Saito, Y. & Iseki, K., 2003. Sediment accumulation rates and budgets of depositing particles of the East China Sea. *Deep-Sea Research II*, 50: 513-528.
- Oktay, S.D., Santschi, P.H., Moran, J.E.E. & Sharma, P. 2000. The ^{129}I bomb pulse recorded in Mississippi River Delta sediments: Results from isotopes of I, Pu, Cs, Pb and C. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64: 989-999.
- Oldfield, F. & Appleby, P.G. 1984. Empirical testing of ^{210}Pb -dating models for lake sediments. Hayworth, E.Y., Lund, J.W.G. (Eds.), *Lake Sediments and Environmental History*. Leicester University Press, Leicester, 93-124.

- Olsen, C.R. 1978. Sedimentation rates. In: R. Fairbridge (Editor), *Encyclopedia of Sedimentology*. Dowden, Hutchinson and Ross, Stroudsburg, Pa., p.687-692.
- Owen, R. B. & Lee, R. 2004. Human impacts on organic matter sedimentation in a proximal shelf setting, Hong Kong. *Continental Shelf Research* 24: 583-602.
- Pennington, W., Cambray, R.S. & Fisher, E.M. 1973. Observations on lake sediment using fallout Cs-137 as a tracer. *Nature*, 242: 324-326.
- Pisciottano, G.A., Diaz, G.G., & Mechoso, C.R. 1994. El Niño-Southern Oscillation impact on rainfall in Uruguay. *Journal of Climate*, 7: 1268-1302.
- Sanders, C.J., Santos, I.R., Patchineelam, S.R., Schaefer, C. & Silva-Filho, E.V. 2010. Recent ¹³⁷Cs deposition in sediments of Admiralty Bay, Antarctica. *J. Environ. Radioac.*, 101: 421-424.
- Santos, I.R., Burnett, W.C. & Godoy, J.M. 2008. Radionuclides as tracers of coastal processes in Brazil: Review, synthesis, and perspectives. *Brazilian Journal of Oceanography*, 56: 115-131.
- Schwarzbald, A. & Schäfer, A. 1984. Gênese e morfologia das Lagoas Costeiras do Rio Grande do Sul. *Amazoniana*, 4(1): 87-104.
- Shepard, F.P. & Moore, D.G. 1960. Bays of central Texas coast. In: F.P. Shepard, F.B. Phleger and T.H. Van Andel (Editors), *Recent Sediments of Northwest Gulf of Mexico*. Am. Assoc. Pet. Geol., Tulsa, p.117-152.
- Syvitski, J.P.M., Burrell, D.C. & Skei, J. M., 1987. *Fjords, Processes and Products*. Springer, New York, 379 pp.
- Stevenson, J.C., Ward, L.G. & Kearney, M.S., 1986. Vertical accretion in marshes with varying rates of sea level rise. In: D.A. Wolfe (Editor), *Estuarine Variability*. Academic Press, New York, pp.241-260.
- Strahler, A.N. & Strahler, A.H. 1987. *Modern Physical Geography*. John Willey and Sons, New York. 488 p.
- Rabasa, J., (ed.), *Quaternary of South America and Antarctic Peninsula*. Rotterdam: A.A. Balkema Publishers, 4, 11p.
- Rao, V.B. & Hada, K. 1990. Characteristics of rainfall over Brazil: annual variations and connections with the Southern Oscillation. *Theoretical and Applied Climatology*, 42(2): 81–91.
- Ravisankar, R., Harikrishnan, N., Chandrasekaran, A., Gandhi, M.S., Alagarsamy, R., 2018. Data on heavy metal and magnetic relationships in coastal sediments from South East Coast of Tamilnadu, India. *Data Brief* 16, 392–400.
- Robbins, J.A. & Edginton, D.N. 1975. Determination of recent sedimentation rates in Lake Michigan using Pb-210 and Cs-137. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 39: 285-304.

Robbins, J. A. 1978. Geochemical and geophysical applications of radioactive lead. In: Nriagu, J. O. (ed.). *The Biogeochemistry of Lead in the Environment*. Amsterdam: Elsevier, p. 285-393.

Robert, C., Degiovanni, C., Jaubert, R., Leroy, V., Reyss, J. L., Saliège, J. F., Thouveny, N. & Vernal, A. 2006. Variability of sedimentation and environment in the Berre coastal lagoon (SE France) since the first millenium: Natural and anthropogenic forcings. *Journal of Geochemical Exploration*, 88: 440-444.

Ryan, J.J. & Goodell, H.G. 1972. Marine geology and estuarine history of Mobile Bay, Alabama. In: B.W. Nelson (Editor), *Environmental Framework of Coastal Plain Estuaries*. Geol. Soc. Am. Mem., 133: 517-554.

Ruxton, B.P. & McDougall, I. 1967. Denudation Rates in Northeast Papua from Potassium-Argon Dating of Lavas. *Amer. Jour. Sci.*, 265: 545-561.

Salomé, A. L., and L. Meynadier (2004), Magnetic properties of rivers, sands and rocks from Martinique Islands: Tracers of weathering? *Phys. Chem. Earth*, 29, 933-945.

Sandgren, P., and I. Snowball (2002), Application of mineral magnetic techniques to paleolimnology, in *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments: Physical and Geochemical Methods*, vol. 2, edited by W. M. Last and J. P. Smol, pp. 217–237, Kluwer Acad., Dordrecht, Netherlands.

Scholger, R. 1998. Heavy metal pollution monitoring by magnetic susceptibility measurements applied to sediments of the river Mur (Styria, Austria). *Eur. J. Environ. Eng. Geophys.* 3, 25-37.

Singer, M. J., K. L. Verosub, P. Fine, and J. TenPas (1996), A conceptual model for the enhancement of magnetic susceptibility in soils, *Quat. Int.*, 34-36, 243-248.

Spasov, S., F. Heller, R. Kretzschmar, M. E. Evans, L. P. Yue, and D. K. Nourgaliev (2003), Detrital and pedogenic magnetic mineral phases in the loess/palaeosol sequence at Lingtai (Central Chinese Loess Plateau), *Phys. Earth Planet. Inter.*, 140, 255-275.

Strzyszczyk, Z.; T. Magiera & F. Heller. 1996. The influence of industrial immissions on the magnetic susceptibility of soils in Upper Silesia. *Studia Geoph. Geod.*, 40:276-286.

Tauxe, L., C. Constable, L. Stokking, and C. Badgley. 1990. Use of anisotropy to determine the origin of the characteristic remanence in Siwalik red beds of northern Pakistan, *J. Geophys. Res.*, 95, 4391-4404.

Teixeira, W., Toledo, M.C.M. De, Fairchild, T.R., Taioli, F. (Orgs.). 2000. *Decifrando a Terra*. São Paulo: Oficina de Textos, 568 p.

Tessler, M.G. 2001. *Taxas de Sedimentação Holocênica da Plataforma Continental Sul do Estado de São Paulo*. Tese de doutorado. Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo. 163 p.

Toldo Jr., E.E. 1994. Sedimentação, Predição do Padrão de Ondas, e Dinâmica Sedimentar da Antepraia e Zona de Surfe do Sistema Lagunar. Tese de Doutorado em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 183 p.

Toldo Jr., E.E., Dillenburg, S.R., Corrêa, I.C.S. & Almeida, L.E.S.B. 2000. Holocene Sedimentation in Lagoa dos Patos Lagoon, Rio Grande do Sul, Brazil. *Journal of Coastal Research*, 16(3): 816-822.

Toldo JR, E.E., Dillenburg, S.R., Corrêa, I.C.S., Almeida, L.E.S.B., Weschenfelder, J. & Gruber, N.L.S. 2006. Sedimentação de Longo e Curto Período na Lagoa dos Patos, Sul do Brasil. *Revista Pesquisas em Geociências*, 36 (2): 79-86.

Tomazelli, L.J. & Villwock. J.A. 2000. O Cenozoico do Rio Grande do Sul: Geologia da Planície Costeira. Holtz, M. & DeRos, L.F. (editores). *Geologia do Rio Grande do Sul*. Edição GICO/UFRGS. 444p.

Thompson, R. (1973), *Palaeolimnology and palaeomagnetism*, *Nature*, 242, 182–184, doi:10.1038/242182a0.

Thompson, R., R. W. Battarbee, P. E. O'Sullivan, and F. Oldfield (1975), *Magnetic susceptibility of lake sediments*, *Limnol. Oceanogr.*, 20, 687–698, doi:10.4319/lo.1975.20.5.0687.

Thompson, R., J. Bloemendal, J. A. Dearing, F. Oldfield, T. A. Rummery, J. A. Stober, and G. M. Turner (1980), *Environmental applications of magnetic measurements*, *Science*, 207, 481–486, doi:10.1126/science.207.4430.481.

Thompson, R., Oldfield, F., 1986. *Environmental Magnetism*. Allen & Unwin, London. 227 pp.

UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on The Effects of Atomic Radiation). 2000. *Sources and effect of ionizing radiation*. New York: United Nations, 50p.

USEPA (United States Environmental Protection Agency), 1996. Method 3052. *Microwave assisted acid digestion of siliceous and organically based matrices*. Revision 0.

Villwock, J.A. 1984. *Geology of the coastal province of Rio Grande do Sul, southern Brazil: a synthesis*. *Pesquisas*, 16: 5-49.

Villwock, J.A., Tomazelli, L.J., Loss, E.L., Dehnhardt, E.A., Horn Fo., N.O., Bachi, F.A. & Dehnhardt, B.A. 1986. *Geology of the Rio Grande do Sul Coastal Province*. In: RABASSA J (Ed.). *Quaternary of South America and Antarctic Peninsula*, 4: 79-97.

Yunginger, R., Bijaksana, S., Dahrin, D., Zulaikah, S., Hafidz, A., Kirana, K.H., Sudarningsih, S., Mariyanto, M., Fajar, S.J. 2018. *Lithogenic and anthropogenic components in surface sediments from Lake Limboto as shown by magnetic mineral characteristics, trace metals, and REE geochemistry*. *Geosciences* 8, 116.

Zhang, C.h., Qiao, Q., Piper, J.D.A., Huang, B. 2011. Assessment of heavy metal pollution from a Fe-smelting plant in urban river sediments using environmental magnetic and geochemical methods. *Environ. Pollut.* 159, 3057–3070.

Zhou, L. P., F. Oldfield, A. G. Wintle, S. G. Robinson, and J. T. Wang (1990), Partly pedogenic origin of magnetic variations in Chinese loess, *Nature*, 346, 737–739.


Zong, Y.T., Xiao, Q., Lu, S.G. 2017. Magnetic signature and source identification of heavy metal contamination in urban soils of steel industrial city, Northeast China. *J. Soils Sediments* 17 (1), 190–203.

Wang, Y., Wang, S., Liu, M. 2017. Magnetic properties indicate sediment provenance and distribution patterns in the Bohai and Yellow Seas, China. *Cont. Shelf Res.* 140, 84-95.

Ward, L.G. & Ashley, G.M. 1989. Coastal Lagoonal Systems. *Marine Geology*, 88: 181-185.

White, M.W. 2005. *Geochemistry*. Wiley-Blackwell, USA 637p.

Wilken, R.D., Moreira, I. & Rebello, A. 1986. ²¹⁰Pb and ¹³⁷Cs Fluxes in a Sediment Core from Guanabara Bay, Brazil. *The Science of the Total Environment*, 58: 195-19.

ANEXO I	
Título da Dissertação/Tese:	
“PROVENIÊNCIA, TAXA DE SEDIMENTAÇÃO E PROPRIEDADES MAGNÉTICAS DOS SEDIMENTOS HOLOCÊNICOS DA LAGOA DOS PATOS”	
Área de Concentração: Geologia Marinha	
Autor: Michel Doeppre Ivanoff	
Orientador: Prof. Dr. Elirio Ernestino Toldo Junior	
Examinador: Prof. Dr. Nicolai Mirlean	
Data: 22/06/2020	
Conceito: 5	
PARECER:	
<p>A tese é dedicada a uma questão importante - sedimentação em sistemas de lagoas fechadas. Entre as questões abordadas estão: i) o problema da taxa de sedimentação, ii) fontes de sedimentos e iii) transformação da composição dos sedimentos (poluição) durante o último século.</p> <p>O conteúdo e o título da tese correspondem a área da geologia marinha.</p> <p>A tese está estruturada de acordo com os padrões das teses de doutorado. Com base nos materiais obtidos durante o estudo, o candidato preparou três artigos (um foi publicado em revista internacional de referência).</p> <p>A parte introdutória da tese contém as informações requeridas sobre pesquisas anteriores na área do tema do estudo, sobre os métodos aplicados na pesquisa, bem como sobre a área de pesquisa e o material coletado.</p> <p>Os capítulos da tese contém textos de artigos publicados e enviados para publicação. Os artigos são compilados de acordo com os requisitos para publicações científicas. Os resultados da pesquisa são apresentados de forma confiável. A discussão sobre os resultados obtidos corresponde à competência do candidato dentro da área da tese. As conclusões do trabalho correspondem aos materiais apresentados na tese e são suficientemente substanciadas.</p> <p>O texto da tese contém algumas imprecisões e erros de escrita que podem ser facilmente eliminados no processo de correção do texto, após a defesa.</p> <p>Com base na análise da tese sobre seus méritos, recomendo aprovar (com nota A) o candidato com o título de Doutor na área de geologia marinha.</p>	
Assinatura:	
	Data: 22/062020
Ciente do Orientador:	
Ciente do Aluno:	

ANEXO I	
Título da Dissertação/Tese:	
“PROVENIÊNCIA, TAXA DE SEDIMENTAÇÃO E PROPRIEDADES MAGNÉTICAS DOS SEDIMENTOS HOLOCÊNICOS DA LAGOA DOS PATOS”	
Área de Concentração: Geologia Marinha	
Autor: Michel Doeppre Ivanoff	
Orientador: Prof. Dr. Elirio Ernestino Toldo Junior	
Examinador: Prof. Dr. Lauro Julio Calliari	
Data: 22 de junho de 2020	
Conceito: A	
PARECER:	
<p>O Título reflete a tese, mas não na mesma sequência em que foi apresentada. Entretanto isso é compreensível pois é mais lógico.</p> <p>-A tese está bem estruturada e conduz a uma sequência de raciocínio lógico. O estilo da redação é direto, claro e objetivo. Os erros ortográficos e de concordância são poucos, ou seja acidentais. A Hipótese é bastante longa e introduzida na forma de perguntas. Seria interessante apresentar as mesmas em forma de declarações (statements). Entretanto os questionamentos foram respondidos. A tese introduz aspectos inéditos estudados nos sedimentos da Lagoa dos Patos tanto no aspecto das terras raras como nas propriedades magnéticas dos sedimentos. Apresenta na introdução e ao longo do texto uma boa revisão do estado da arte. O objetivo geral e os específicos foram bem colocados e da forma como estão foram bem enunciados. Nossa consideração mais importante refere-se a discussão da área de proveniência usando as Terras Raras. Uma discussão dos achados importantes podem ser melhor substanciados pela sedimentologia do que já existe e foi publicado, em termos de proveniência (mineralogia de argilas, parâmetros granulométricos e os próprios minerais pesados). Nos referimos mais especificamente a influência do sistema Jacuí na fácies Patos. Concluímos dizendo que a tese caracteriza realmente um doutorado. A apresentação foi ótima e as perguntas muito bem respondidas.</p> <p>Essas são as nossas considerações</p>	
Assinatura:	Data:
Ciente do Orientador:	
Ciente do Aluno:	



Rio Grande, 26 de Junho de 2020.

Ao Prof. Rommulo Vieira Conceição
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Geociências
Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS

Caro Prof. Rommulo,

Venho por meio desta dar meu parecer sobre a tese e defesa de tese de MICHEL DOEPPRE IVANOFF.

O manuscrito da tese é apresentado no formato de artigos científicos, sendo um dos quais já publicados em um jornal internacional de conceito bom. Os outros estão submetidos, e sendo assim, ainda há possibilidade do candidato aproveitar as discussões da defesa para melhorá-los.

O manuscrito da tese está razoavelmente bem escrito, ainda que com espaço para correções aqui e ali e melhorar o estilo em alguns locais. As figuras de maneira geral estão boas. Mas, sem sombra de dúvida, constitui uma tese pelo conteúdo e qualidade. O candidato fez uma apresentação boa, no tempo estipulado, e teve desenvoltura durante a arguição da banca. Expresso isso, considero que o candidato aprovado para obtenção de título de doutor.

Anexo segue uma cópia do manuscrito em formato PDF onde coloco vários dos meus comentários que podem ser utilizados pelo candidato em seus artigos.

Cordialmente

Carlos A.F. Schettini