

Estudi sobre la identificació i degradació de suports plàstics en plànols urbanístics de la ciutat de Barcelona



Informe de resultats de les anàlisis.

José F. García, Diego A. Ahumada, Martí Cervelló



UNIVERSITAT DE
BARCELONA



UNIVERSITAT DE
BARCELONA

Estudi sobre la identificació i degradació de suports plàstics en plànols urbanístics de la ciutat de Barcelona.

RESUM

A l'Arxiu Municipal Contemporani de Barcelona es conserven nombrosos plànols urbanístics elaborats en materials plàstics. Aquest tipus de suports són susceptibles a processos de degradació que comprometen la integritat del patrimoni documental. L'objectiu principal d'aquest estudi és identificar els polímers presents i avaluar el seu estat de conservació, en coordinació amb l'equip de conservació preventiva de l'arxiu.

La metodologia emprada va constar de dues fases de mostreig i es va fonamentar en la utilització de l'espectroscòpia infraroja per transformada de Fourier (ATR i transmitància) com a tècnica instrumental de mesura. La fase inicial va permetre establir els protocols analítics i fer una primera identificació dels materials de suport d'alguns plànols; posteriorment, a la segona fase, es va ampliar el nombre de mostres, assolint un total de 40 plànols analitzats. Aquestes determinacions instrumentals es van comparar amb les realitzades sobre la base de l'aplicació de proves organolèptiques per a cada pla i es van comparar els resultats obtinguts extraient conclusions sobre la viabilitat d'aquestes determinacions.

Els resultats de l'espectroscòpia infraroja van revelar que la majoria de les mostres corresponien a acetat de cel·lulosa (32.5%) i PET (27.5%); a més, es va determinar l'ús de poliamida (17.5%) i nitrat de cel·lulosa (7.5%). Així mateix, es van detectar sis plans multicapa composts per PET i acetat de cel·lulosa. La comparació entre les proves organolèptiques i l'anàlisi instrumental per ATR va demostrar una alta concordança en la identificació dels suports plàstics de PET, mentre que per a la resta els resultats no van ser tan coherents. D'acord amb la bibliografia i algunes patents, és probable que moltes de les mostres corresponguin a làmines multicapa amb acetat de cel·lulosa a les dues superfícies i un nucli de PET, per la qual cosa caldrà continuar l'estudi amb assajos addicionals per confirmar aquests resultats.

Finalment, l'ús d'espectroscòpia FTIR, juntament amb l'anàlisi d'imatge aplicada a l'estudi de la degradació de l'acetat de cel·lulosa, va resultar eficaç per avaluar el gradient de deteriorament present als materials. Les dades espectroscòpiques van confirmar el mecanisme d'hidròlisi previst: disminució progressiva de les bandes de carbonil (1740 cm^{-1}) i C-H (2945 cm^{-1}) associades a grups acetil, augment del senyal O-H (3480 cm^{-1}) relacionat amb l'exposició d'hidroxils, així com l'exposició d'hidroxils 1000 cm^{-1} , reflectint modificacions a l'anell glucosídic.

Taula de contingut

RESUM.....	2
1. ANTECEDENTS.....	4
2. OBJETIUS.	4
3. ESTAT DE L'ART.....	5
3.1 DEGRADACIÓ DE PLÀSTICS EN DOCUMENTS PATRIMONIALS	5
3.2 TÈCNIQUES D'ANÀLISI INSTRUMENTAL DE PLÀSTICS	6
3.3 ANÀLISI ORGANOLÈPTIC DE PLÀSTICS	8
4. EXPERIMENTAL.....	9
4.1 INSTRUMENTACIÓ	9
4.2 MOSTREIG I CODIFICACIÓ	10
4.2.1 Codificació de mostres	10
4.2.2 Primera campanya de mostreig	10
4.2.3 Segona campanya de mostreig	11
4.3 PRESA DE MOSTRA I PROCEDIMENT DE MESURA.	11
4.4 IDENTIFICACIÓ DELS MATERIALS	12
4.5 ANÀLISI ORGANOLÈPTIC	12
4.6 ESTUDI PILOT DE DEGRADACIÓ	12
5. RESULTATS.....	13
5.1 ESTUDIS PRELIMINARS I OPTIMITZACIÓ DEL MODE DE MESURA.....	13
5.2 IDENTIFICACIÓ DELS SOPORTS PLÀSTICS.....	15
5.2.1 Identificació de materials multicapa	15
5.2.2 Identificació de polímers.....	16
5.2.3 Resultats globals de identificació	21
5.3 COMPARACIÓ AMB CON PROVES ORGANOLÈPTIQUES	24
5.4 ESTUDI PILOT DE DEGRADACIÓ I PROPOSTA DE MONITORITZACIÓ.....	27
6. CONCLUSIONS.....	32
7. AGRAÏMENTS.....	33
8. REFERÈNCIES.....	34
ANNEX 1: PROVES ORGANOLÈPTIQUES.....	35
ANNEX 2: ESPECTRES D'INFRAROIG OBTINGUTS	36

Estudi sobre la identificació i degradació de suports plàstics en plànols urbanístics de la ciutat de Barcelona.

José F. García, Diego A. Ahumada y Martí Cervelló

1. ANTECEDENTS

A l'octubre del 2024, l'equip de conservació preventiva de l'Arxiu Municipal Contemporani de Barcelona (Gerència de Serveis Generals, Ajuntament de Barcelona), va contactar amb el nostre grup de recerca en el marc d'un estudi orientat a determinar la composició dels suports plàstics dels plànols urbanístics de Barcelona, establir la capacitat de les proves organolèptiques per a aquesta determinació i realitzar una primera aproximació als mecanismes de degradació d'aquests suports. L'interès va sorgir arran de la identificació de diversos plànols parcel·lars urbanístics, coneguts com a "Martorells" i datats a la dècada de 1960, que mostraven signes de degradació associats al material plàstic sobre el qual van ser confeccionats. Aquests documents formen part del fons planimètric instal·lats als dipòsits de prearxiu, on es fa un seguiment de les condicions ambientals i l'estat de conservació dels plànols custodiats.

Atès que la bibliografia disponible sobre el comportament dels plàstics en documents d'arxiu encara és limitada, es va plantejar la conveniència d'abordar una anàlisi amb tècniques instrumentals al laboratori que permetés caracteritzar els polímers presents en els suports, comparar els resultats amb les identifications organolèptiques i anticipar possibles processos d'alteració.

2. OBJETIUS.

L'objectiu general d'aquest estudi és identificar i caracteritzar els materials plàstics presents en plànols urbanístics conservats a l'Arxiu Municipal Contemporani de Barcelona, per tal de comprendre'n la naturalesa, avaluar la capacitat de les tècniques organolèptiques per determinar-los, obtenir informació sobre el seu estat de conservació i aportar informació per al disseny d'estratègies de conservació preventiva. Per això, es van aplicar tècniques instrumentals d'espectroscòpia infraroja, complementades amb observacions organolèptiques, cosa que va permetre tant establir procediments d'identificació fiables com valorar preliminarment els processos de degradació.

En línia amb aquest propòsit, els objectius específics van ser:

- Determineu el mode òptim d'anàlisi aplicant la tècnica d'espectroscòpia infraroja.
- Determinar la composició d'un conjunt representatiu de suports plàstics de plànols urbanístics de Barcelona.
- Establir la fiabilitat de les anàlisis organolèptiques per a la determinació dels suports plàstics.
- Realitzar una primera aproximació a l'estudi del mecanisme de degradació dels suports i investigar un procediment per fer-ne el seguiment aplicable en entorns sense instrumentació analítica.

Per assolir aquests objectius específics es van realitzar les següents accions:

- Una primera presa de mostres reduïda per avaluar el mode d'anàlisi òptima utilitzant la tècnica instrumental d'espectroscòpia infraroja (ATR i transmitància).
- Una segona presa de mostres àmplia de mostres representatives per a la identificació dels suports i per desenvolupar un estudi preliminar dels processos de degradació.
- La comparació dels resultats obtinguts mitjançant tècniques instrumentals amb les identificacions realitzades a partir de mètodes organolèptics.
- Una primera aproximació a l'establiment d'un mètode de seguiment de la degradació en condicions i amb els recursos disponibles a l'entorn d'un arxiu o taller de conservació-restauració.
- Documentació dels estudis realitzats.
- Discussió conjunta dels resultats obtinguts amb els conservadors de l'Arxiu.

La selecció dels plànols representatius va ser realitzada pels conservadors de l'arxiu i la presa de mostres es va realitzar amb el seu assessorament i supervisió.

3. ESTAT DE L'ART

3.1 Degradació de plàstics en documents patrimonials

Durant el període comprès entre mitjans del segle XIX i el segle XX, es van incorporar diversos materials plàstics com a suports documentals entre els quals destaquen l'acetat de cel·lulosa, el nitrat de cel·lulosa, el Policlorur de Vinil (PVC) i el Tereftalà de Polietilè (PET). Aquests materials, encara que van aportar innovacions en termes de flexibilitat i transparència, presenten una marcada vulnerabilitat davant de processos de degradació fisicoquímica (Urbanová, 2024).

Aquests processos, que inclouen hidròlisi, oxidació i fotodegradació, es manifesten en l'envelliment i la degradació dels plàstics i segueixen dues grans rutes: abiòtica i biòtica, tal com s'il·lustra a la Figura 1 (Andrady, 2022). Les vies abiòtiques inclouen processos com ara la radiació UV, la calor, l'oxidació, el desgast mecànic, la inducció química i la meteorització, que desencadenen fenòmens de despolimerització, escissió de cadena, oxidació, craqueig, fragmentació i carbonilació. Per la seva banda, les vies biòtiques comprenen la biodegradació enzimàtica i microbiana, així com la biodesintegració, que contribueixen a la descomposició progressiva dels polímers fins a etapes com la hidròlisi i la mineralització d'aquests (Andrady, 2022, Lucas 2008).

Les diferents vies i tipus de degradació condicionen les estratègies de conservació. Per exemple, el PVC fotodegradat requereix evitar l'exposició a llum UV per frenar la formació de compostos poliens, mentre que altres plàstics com el poliestirè demanen control de llum i temperatura per evitar fragilització i fragmentació (King, 2024). Per això, una identificació adequada del tipus de polímer i el seu estat és fonamental per dissenyar mesures preventives eficaces.

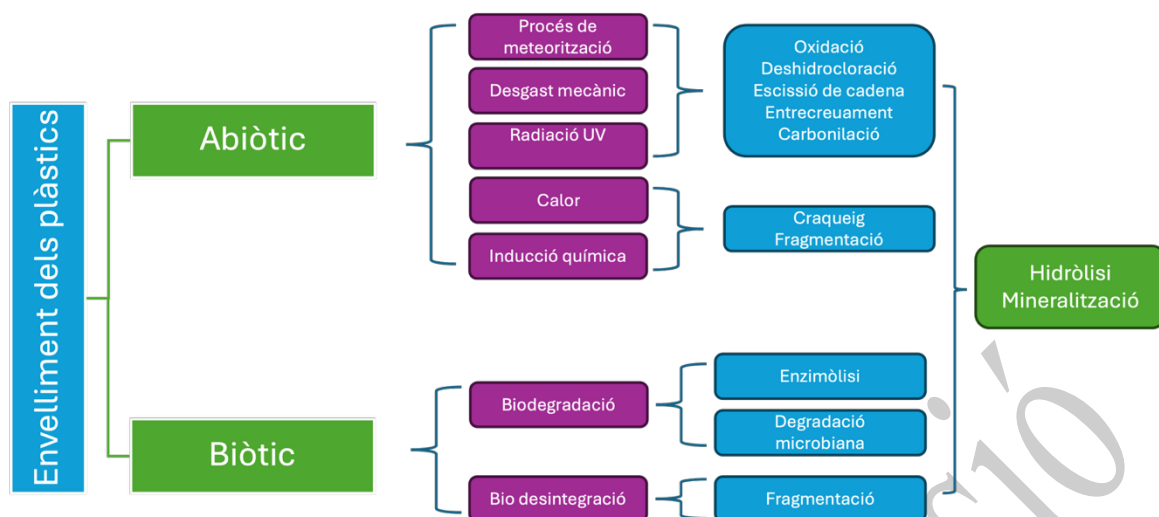


Figura 1. Esquema de les rutes d'envelliment i degradació de plàstics (adaptada de Lu 2023).

Comprendre aquests mecanismes és fonamental no només per diagnosticar i conservar documents patrimonials sobre suports plàstics, sinó també per anticipar l'evolució del seu estat en arxius i col·leccions al llarg del temps. L'efectivitat de les vies de degradació depèn en gran mesura de la naturalesa química del polímer i de les condicions ambientals a què està exposat (Lu, 2023). Per això, el primer pas per abordar-ne la conservació és aconseguir una identificació inequívoca del tipus de plàstic present en cada suport. En aquest context, els mètodes instrumentals, especialment els basats en espectroscòpia, són fonamentals, en proporcionar una anàlisi objectiva i fiable.

3.2 Tècniques d'anàlisi instrumental de plàstics

Per a la caracterització de plàstics i el seu envelliment, hi ha diverses tècniques físiques i químiques emprades que permeten avaluar tant la seva morfologia com la seva composició química i canvis funcionals. La morfologia es pot estudiar mitjançant la microscòpia òptica, de fluorescència, electrònica de rastreig (SEM) i la microscòpia de forces atòmiques (AFM), que permeten l'observació del material des de la textura superficial. La composició química es pot determinar amb tècniques com l'espectroscòpia Raman i l'anàlisi tèrmica, que complementen la informació anterior oferint vistes sobre les modificacions en estructura molecular i estabilitat tèrmica. Tot i això, l'espectroscòpia infraroja per transformada de Fourier (FTIR) sobresurt per la seva capacitat per identificar de manera ràpida, no destructiva i exacta els grups funcionals característics de cada polímer (Derrick, 200, Prati, 2016,).

L'espectroscòpia infraroja per transformada de Fourier es pot aplicar en dos modes: Transmissió (T-FTIR) i Reflectància Total Atenuada (ATR-FTIR). A la primera (T-FTIR), la mostra és travessada per un feix de llum infraroja i les freqüències no absorbides són detectades després d'aquest pas; a la segona (ATR), el feix de llum infraroja incideix sobre una cara on algunes freqüències són igualment absorbides, però, en aquest cas, el detector és al mateix costat pel qual s'irradia la mostra i només es detecta aquella radiació, parcialment absorbida, que es reflecteix en aquesta direcció (Figura 2). Ambdues maneres són no destructives, permeten examinar fragments d'objectes sense preparació especial i poden aplicar-se a superfícies corbes o opaques, si bé la diferència entre tots dos és que en el primer (T-FTIR) la informació obtinguda és la suma de les absorpcions de tots els materials que formen el fragment estudiat; mentre que al segon (ATR-FTIR) només s'obté informació del material superficial.

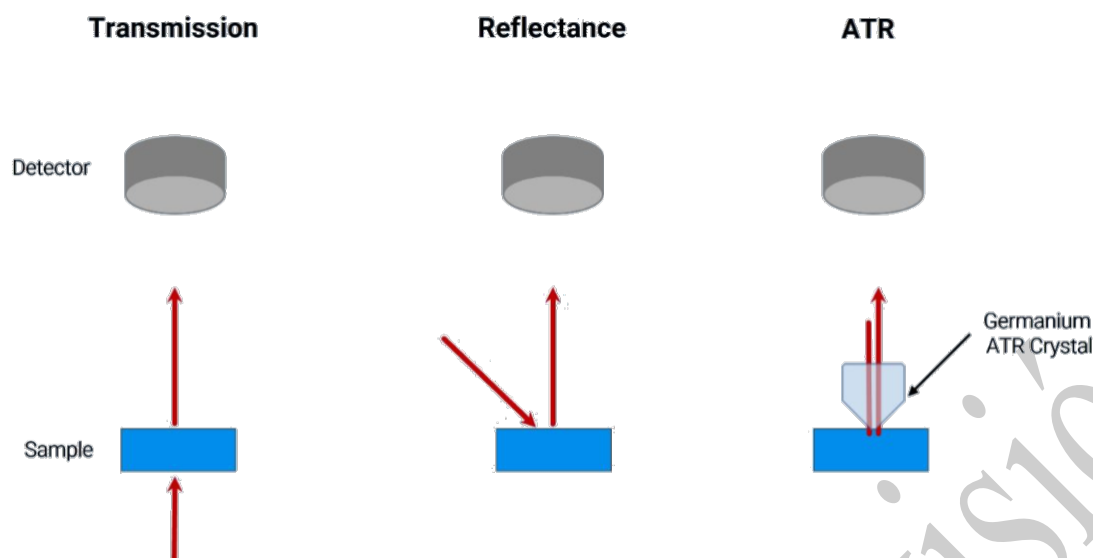


Figura 2. Esquema dels modes T-FTIR y ATR-FTIR emprats en aquest estudi (Adaptat de Bruker, 2025).

Mitjançant espectroscòpia FTIR, el PVC s'identifica per les fortes vibracions d'estirament de l'enllaç C-Cl a 615 cm^{-1} i $\sim 700\text{ cm}^{-1}$, estiraments asimètrics i simètrics de C-H entre $2850\text{--}2950\text{ cm}^{-1}$, deformacions de CH_2 de 965 cm^{-1} (Figura 3). La presència de bandes febles carbonil (C=O) al voltant de $1720\text{--}1740\text{ cm}^{-1}$ és comú a causa de la presència de plastificants de tipus ftalat o productes de degradació oxidativa, però no són característiques intrínseques del PVC pur. El PET es distingeix per dos senyals forts i espaiats a ~ 1240 i $\sim 1100\text{ cm}^{-1}$ a la regió de l'infraroig de longitud d'ona llarga (LWIR), i un pic de carbonil a 1730 cm^{-1} . El poliestirè (PS) presenta estiraments C-H aromàtics per sobre de 3000 cm^{-1} , estiraments C=C de l'anell aromàtic a 1450 i 1490 cm^{-1} , modes d'estirament de l'anell a $\sim 1600\text{ cm}^{-1}$, i un doblet fort a 706 i 760 cm^{-1} per flexions fora del pla. L'acetat de cel·lulosa es caracteritza per un C=O a 1740 cm^{-1} i estiraments C-O a 1032 cm^{-1} , mentre que el nitrat de cel·lulosa mostra un pic a 1721 cm^{-1} que pot indicar degradació. El poliuretà (PU) es pot identificar i diferenciar entre les seves formes èter i èster, amb senyals C=O a $1700\text{--}1710\text{ cm}^{-1}$ (uretans units per H) i $1730\text{--}1735\text{ cm}^{-1}$ (uretans lliures). Les poliolefines com el polietilè (PE) i el polipropilè (PP) mostren patrons d'estirament i flexió específics de CH_2 i CH_3 , i la forma isotàctica del PP s'indica per bandes a 1166 i 996 cm^{-1} . L'ABS (acrilonitril-butadiè-estirè) s'identifica per l'estirament $\text{C}\equiv\text{N}$ a $\sim 2240\text{ cm}^{-1}$ i la banda de butadiè a $\sim 965\text{ cm}^{-1}$ (Chércoles, 2009).

La poliamida (niló) s'identifica mitjançant FTIR per una banda intensa d'estirament N-H a 3300 cm^{-1} , senyals d'estirament asimètric i simètric de CH_2 prop de 2930 i 2860 cm^{-1} , a més d'un estirament de C=O (Amida I) fort al voltant de 1 (Amida II i III) entre 1537 i 1260 cm^{-1} , juntament amb flexions de grups CH_2 i N-H per sota de 700 cm^{-1} (Chércoles, 2009).

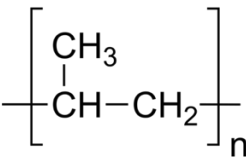
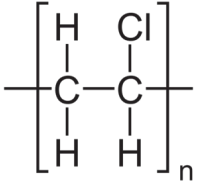
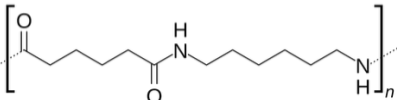
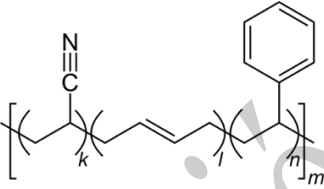
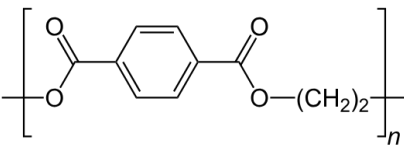
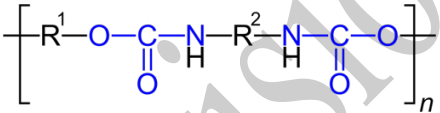
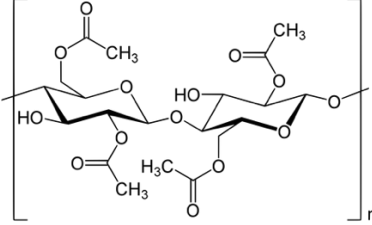
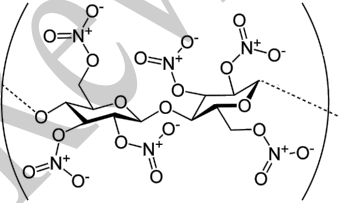
Polímer	Unitat Estructural	Polímeto	Unitat Estructural
Polietilè		Clorur de Polivinil (PVC)	
Poliamida		ABS	
Poliestirè		Poliuretà	
Acetat de cel.lulosa		Nitrat de cel.lulosa	

Figura 3. Estructura plana de les molècules de PVC, PET, PS acetat de cel.lulosa, nitrat de cel.lulosa, PU, PE, PP, ABS, Poliamida (Wikipedia).

3.3 Anàlisi organolèptic de plàstics

Als arxius i tallers de restauració són de gran utilitat els mètodes organolèptics que permeten realitzar avaluacions ràpides dels materials plàstics. Aquestes tècniques es basen en l'avaluació sensorial directa mitjançant inspecció visual i tàtil, complementada de vegades per l'observació de l'olfacte i altres propietats físiques. La seva aplicació és accessible i econòmica, i permet orientar de manera preliminar la identificació de polímer “in situ” (Krieg, 2024, Marques, 2022, Shashoua, 2012).

Aquestes tècniques comprenen l'examen visual de propietats com ara color, transparència, brillantor, així com la determinació tàtil de la textura i flexibilitat del material (Shashoua, 2012). La percepció d'olors característiques, per exemple, l'aroma avinagrada que pot emetre l'acetat de cel.lulosa en procés de degradació pot assenyalar alteracions químiques al suport plàstic. No obstant això, ateses les múltiples formulacions i afegits presents als plàstics, la interpretació d'aquestes observacions pot resultar limitada. Per això, les tècniques organolèptiques, encara que fonamentals a la pràctica diària, solen complementar-se amb anàlisis instrumentals.

A continuació, es presenta una taula resum amb les principals proves organolèptiques emprades per a la identificació de plàstics en contextos patrimonials, juntament amb les seves característiques i limitacions:

Tabla 1. Resum i aplicacions de proves organolèptiques emprades per a la identificació de materials plàstics.
 Fonts: Krieg, 2024, Marques, 2022, Shashoua, 2012

Mètode	Tipus de polímer	Característiques organolèptiques per a la identificació	Comentaris pràctics
Inspecció visual	Acetat de cel.lulosa (CA)	Groquejament, pèrdua de transparència, brillantor, opac	Groquejament característic en degradació
	Nitrat de cel.lulosa (CN)	Superfície rígida, opaca, tendència a l'esquerdament	Sovint associat a fragilitat i risc inflamable
	Polietilè tereftalat (PET)	Transparent, superfície llisa, rígida	Molt reconeixible visualment i tàtil
	Policlorur de vinil (PVC)	Superfície brillant, flexible, pot tenir color variable	Pot presentar enganxositat si està plastificat
Avaluació tàtil	PVC plastificat	Sensació enganxosa, adherència de pols	Indici d'envelliment i alteració
	Polietilè (PE)	Flexible, resistent, sensació cerosa	
Avaluació olfactiva	Acetat de cel.lulosa	Olor avinagrat característic	Indica processos de degradació
Proves físiques	CN, CA	Reaccions amb difenilamina (blau per a CON, blanc per a LA), prova de flama diferent	Confirmació simple i econòmica

4. EXPERIMENTAL

4.1 Instrumentació

Es va utilitzar un espectròmetre d'infraroig per transformada de Fourier (FTIR) PerkinElmer Frontier, equipat amb un accessori de reflexió total atenuada (ATR) amb vidre de diamant de Pike Technologies i detector de sulfat de triglicina deuterada (DTGS). La Figura 4 presenta un registre fotogràfic de l'instrument emprat. Per al mode d'ATR, els espectres es van adquirir en mode absorbància, acumulant 16 scans per mostra, a una resolució espectral de 4 cm^{-1} i al rang de $4000\text{--}525\text{ cm}^{-1}$.

Per als mesuraments en mode Transmissió (T) es va fer servir un porta mostres per posicionar els fragments de plàstic i permetre el pas del feix infraroig a través de les mostres. En aquestes condicions es van adquirir espectres en mode absorbància amb 4 escaneigs, resolució espectral de 2 cm^{-1} i un rang espectral de $4000\text{ a }400\text{ cm}^{-1}$.

El processament i l'anàlisi dels espectres es va fer utilitzant el programari Spectrum, proveït pel fabricant de l'equip.

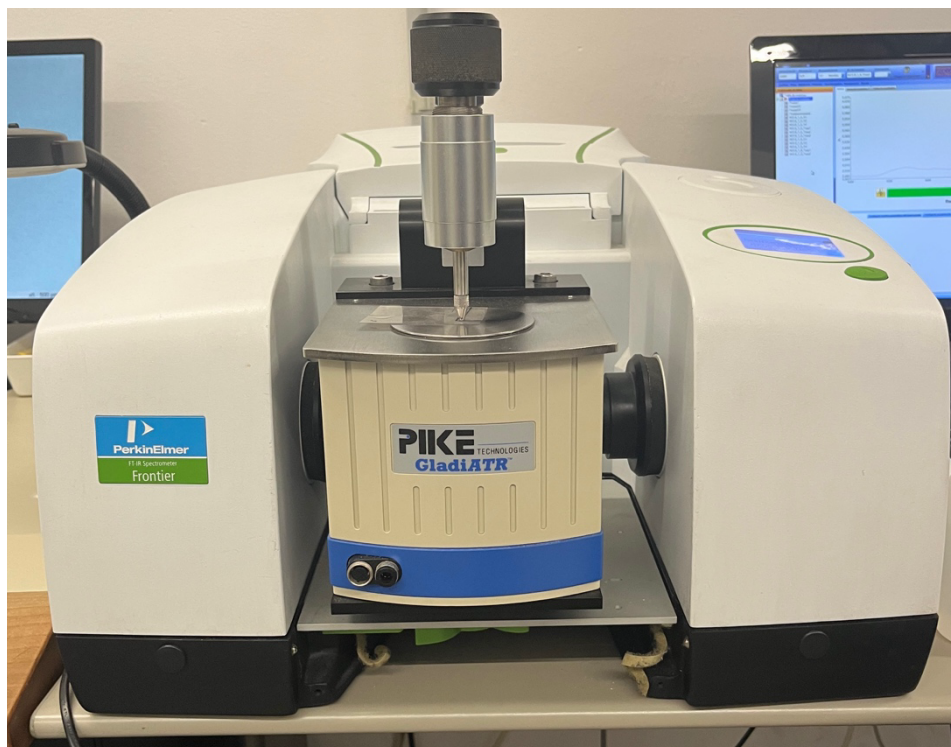


Figura 4. Espectròmetre de infraroig per transformada de Fourier (FTIR) PerkinElmer Frontier, equipat amb un accessori de reflexió total atenuada (ATR) emprat en l'estudi.

4.2 Mostreig i codificació

4.2.1 *Codificació de mostres*

Les mostres analitzades van ser assignades amb identificadors numèrics (ID Arxiu) pel personal del fitxer. Posteriorment, per a la presa d'espectres es va emprar la següent estructura:

[ID Arxiu][Número de mostra][costat de superfície][Número de rèplica].

Per exemple, la denominació 72.8_1_A_R1 correspon a la primera rèplica de la mostra número 1 presa del panell 72.8, analitzada al costat A.

4.2.2 *Primera campanya de mostreig*

La primera campanya va consistir en la selecció limitada de mapes representatius, amb l'objectiu d'establir una anàlisi preliminar dels materials i avaluar la manera òptima (T davant ATR) de la tècnica d'espectroscòpia infraroja. Es van considerar dues sèries documentals principals:

- Sèrie Q162: que inclou mapes produïts pel Servei de Planificació Urbana des del 1925 fins a la dècada de 1990, destacant el dossier Q106 amb mapes cadastrals de Barcelona a diverses escales.
- Col·lecció Z103: documents de Barcelona Holding Olímpica SA (HOLSA) amb prop de 4000 mapes datats entre el 1985 i el 2014, abastant material d'agències com AOMSA, IMPUSA i VOSA.

Es van identificar tres categories principals als mapes seleccionats: producció contemporània (des dels anys 70) còpies de documents antics reproduïdes en suports plàstics moderns, i còpies de preservació sense modificacions manuals. També es van detectar orto-imatges impreses en acetat i fotolitografies derivades d'ortofotografia, observant-se en aquestes darreres signes de degradació més

pronunciats. Es van analitzar un total d'11 mostres en aquesta fase preliminar usant espectroscòpia FTIR amb reflectància total atenuada (ATR-FTIR) i espectroscòpia FTIR en mode transmissió (T-FTIR) d'acord amb les condicions descrites a l'apartat 4.1 i el protocol descrit a 4.3.

4.2.3 *Segona campanya de mostreig*

Es va fer una segona campanya amb 31 mostres addicionals. Cada mostra va ser etiquetada amb el seu identificador arxivístic juntament amb un codi addicional en format "SX", on "X" representa un número assignat pel personal del fitxer per distingir mostres amb identificadors coincidents (per exemple, 69.2_S18). Les mostres seleccionades es van analitzar únicament mitjançant ATR.

4.3 Presa de mostra i Procediment de mesura.

Les mostres van ser extretes utilitzant tisores d'acer, amb dimensions aproximades d'1,5 x 1,5 cm, procedents d'àrees visualment diferenciades, com ara línies de tinta, taques o decoloracions. El mostreig es va fer sota supervisió del personal de l'arxiu. La Figura 5 mostra registres fotogràfics del procés de presa de mostra per a les mostres 72.8 i 67.12.



Figura 5. Registres fotogràfics del procés de presa de mostra per les mostres 72.8 y 67.12.

L'anàlisi per espectroscòpia de reflectància total atenuada (ATR) es va dur a terme directament sobre la superfície de les mostres, sense cap preparació prèvia. Es van realitzar tres mesures a la cara A (en general, sobre la qual es trobava imprès el pla), focalitzant regions visualment diverses. Atesa la naturalesa multi laminar d'algunes mostres, el mateix procediment es va aplicar amb mesures triplicades per la cara oposada, cara B.

L'espectroscòpia infraroja en mode transmissió (T-FTIR) es va realitzar mitjançant el pas de radiació infraroja a través de mostres suficientment primes per permetre la transmissió. Es van adquirir tres rèpliques per mostra, totes amb la mateixa cara situada davant del feix, ja que el fet que a Transmissió la radiació travessi tota la mostra fa equivalent el resultat d'absorció independentment de la cara situada al davant. La Figura 6 il·lustra el procés de mesurament mitjançant ATR i presenta una mostra disposada al portaobjectes per a T-FTIR.

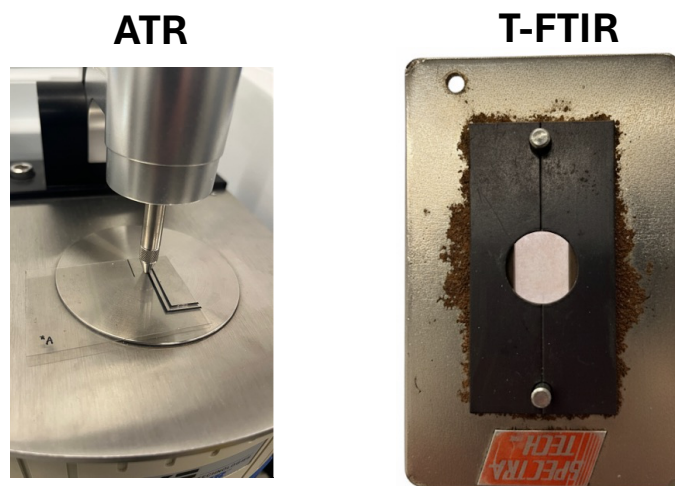


Figura 6. Procés de mesura mitjançant espectroscòpia ATR-FTIR en una mostra, i disposició d'una mostra en el portaobjectes per a la mesura en mode transmissió (T-FTIR).

4.4 Identificació dels materials

La identificació dels materials es va fer mitjançant un procés de múltiples etapes, amb el propòsit de garantir una caracterització adequada. Inicialment, un primer investigador, va dur a terme una assignació preliminar dels senyals espectrals basant-se en la literatura científica sobre els polímers més comuns emprats al llarg del segle XX. Aquesta primera etapa va permetre assignar temptativament els grups funcionals, estiraments i vibracions característics a cada senyal, cosa que va conduir a una identificació provisional del material o materials presents a cada pla.

Posteriorment, en una segona etapa, es va comparar els espectres obtinguts amb una base de dades especialitzada, disponible a la Universitat de Barcelona, i amb el judici d'un expert en espectroscòpia infraroja es va confirmar o refutar la identificació inicial realitzada.

Finalment, en una tercera i última etapa, un investigador independent va fer la confirmació i la verificació final del procés d'assignació dels materials, cosa que permet assegurar una identificació sòlida i verificable dels components.

4.5 Anàlisi organolèptic

En el marc de la metodologia organolèptica aplicada per l'Arxiu Intermedi de Barcelona, el personal tècnic va fer la identificació preliminar dels suports plàstics mitjançant assajos estàndards: olor en escalfar, prova de la flama, prova de Beilstein i prova de solubilitat (Martínez, 2025). Els protocols i els criteris d'interpretació seguits en aquestes proves es descriuen detalladament a l'Annex 1.

4.6 Estudi pilot de degradació

Es va realitzar un estudi pilot de la degradació utilitzant un dels plànols analitzats a la primera fase de mostreig (mostra F1-q). El pla presentava un gradient visible de degradació, amb alteracions més marcades al sector central i menor afectació cap als extrems. Aquest pla no tenia valor documental, per la qual cosa podia ser àmpliament mostrat per a l'estudi.

Per a l'anàlisi, es va seleccionar una secció diagonal del plànol corresponent al carrer Garcilaso (vegeu la Figura 7). El plànol complet va ser documentat fotogràficament, i després es va retallar la regió d'interès. Al llarg d'aquesta secció, es van extreure 16 mostres distribuïdes al llarg del carrer per capturar el gradient de degradació.



Figura 7. A la esquerra, plano original utilitzat en l'estudio pilot de degradació; a la dreta, fragment extret corresponent a la secció diagonal seleccionada per l'anàlisi detallat.

A la imatge es van incloure referències mètriques (regla mil·limètrica) i de color, la qual cosa va permetre realitzar posteriorment una anàlisi quantitativa. Les distàncies entre punts de mostreig es van estimar utilitzant l'escala dimensional registrada a la fotografia. D'altra banda, l'evolució del color, emprat com a indicador visual indirecte de degradació, es va quantificar a partir de les imatges digitals mitjançant el paquet Imager de R, que permet l'extracció objectiva de paràmetres cromàtics per a cada punt mostrejat.

Tots els fragments obtinguts van ser analitzats mitjançant T-FTIR i ATR, segons es descriu a l'apartat 4.1.

5. RESULTATS.

Aquest estudi es divideix en quatre parts. A la primera s'exposen els resultats corresponents a l'establiment del mode d'espectroscòpia d'infraroig òptim per a les mesures. A la segona es presenta la identificació dels diferents suports analitzats. A la tercera part es mostren els resultats obtinguts en la comparació entre els mètodes instrumentals i els mètodes organolèptics de identificació. Finalment, a la quarta part, es presenten els obtinguts a l'estudi de degradació.

5.1 Estudis preliminars i optimització del mode de mesura.

En diversos estudis recollits a la literatura, l'espectroscòpia per reflectància total atenuada (ATR) ha demostrat ser una tècnica adequada per a la caracterització de materials polimèrics. En aquest treball, inicialment, es va partir de condicions descrites per Asensio et al., les quals van ser avaluades i ajustades per optimitzar la resolució i el nombre d'escaneigs, aconseguint finalment millors resultats amb els paràmetres detallats a la secció 4.1.

En alguns casos, a causa del seu avançat estat de degradació, algunes mostres presentaven una gran fragilitat que impedia realitzar les mesures per ATR (atès que en aquesta mesura cal pressionar la

mostra al detector). Per a aquestes mostres, es va avaluar una segona alternativa basada en l'espectroscòpia infraroja en mode transmissió (T-FTIR). Aquesta tècnica ofereix avantatges complementaris a ATR, com la disponibilitat de biblioteques espectrals més extenses i rapidesa en el mesurament, a més de ser adequada per a mostres primes, cosa que és convenient per a certs suports. Tot i això, té l'inconvenient de no poder distingir la presència de multi capes ja integra tot el senyal del material que travessa sense permetre conèixer si corresponen a una barreja o tenen una distribució espacial diferenciada. Les mesures per ATR, per contra, si permeten conèixer de manera diferenciada la composició de cada cara del suport plàstic.

A la Figura 8 es presenten espectres obtinguts en tots dos modes per a tres diferents mostres, on s'observa que els espectres d'ATR mostren senyals ben definits i amb una intensitat diferenciable del soroll, cosa que facilita la identificació dels grups funcionals i la comparació entre les mostres. És important esmentar que diverses de les mostres presenten suports multicapa, cosa que limita a la T-FTIR. Tot i això, per a algunes mostres amb menor degradació o visiblement més translúcides, es va observar que T-FTIR proporcionava resultats satisfactoris. D'altra banda, es pot observar com les tècniques resulten ser complementàries, ja que mentre que ATR té un comportament millor a nombre d'ona inferiors a 2000 cm^{-1} , T-FTIR té espectres més clars a números d'ona entre 4000 cm^{-1} i 2000 cm^{-1} .

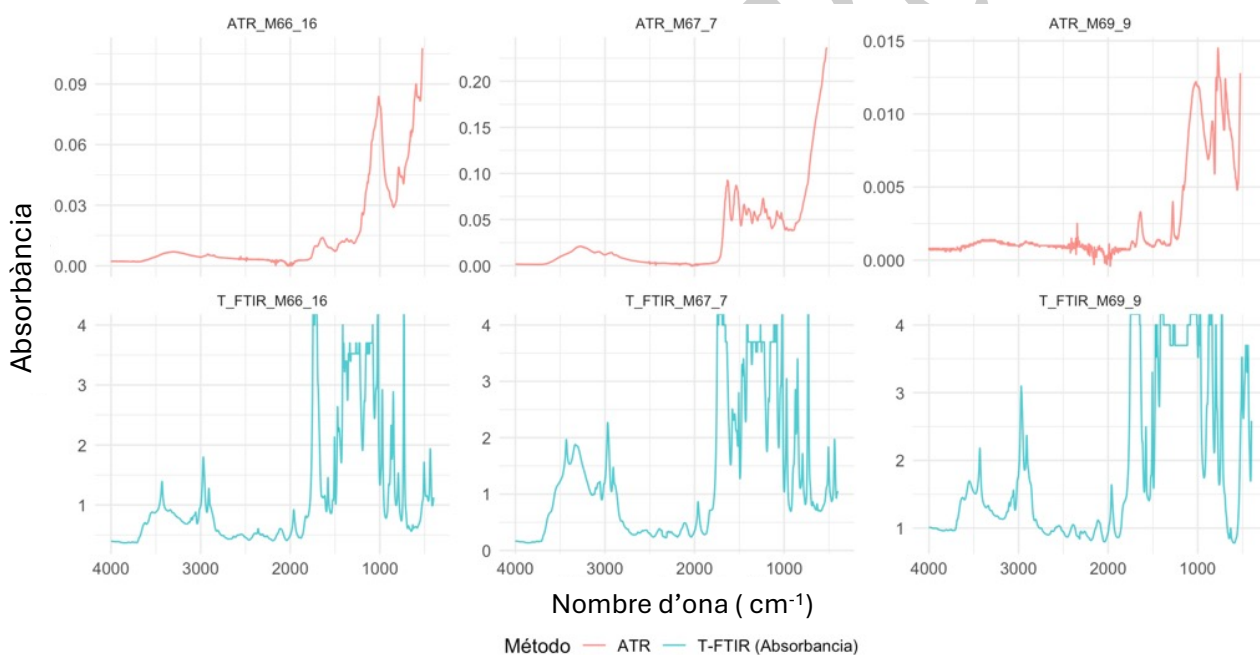


Figura 8. Comparació d'espectres FTIR obtinguts mitjançant reflectància total atenuada (ATR) i transmissió (T-FTIR) per a la mateixa mostra.

Tot i això, atès que la majoria de les mostres van mostrar coloracions fosques o se sospitava de la presència de múltiples capes, es va optar per utilitzar la tècnica ATR per als estudis posteriors. Malgrat això, per a mostres que presentaven un estat avançat de degradació i els fragments eren massa fràgils per a ATR (ja que es fracturaven per la pressió exercida sobre el vidre), es va emprar T-FTIR com a primera opció.

Un cop seleccionat el mode d'anàlisi, es van registrar els espectres de totes les mostres (ambdues campanyes de mostreig) i posteriorment es va fer un procés d'anàlisi exploratòria amb el qual es buscava validar la concordança entre les rèpliques de mesura i avaluar la presència de materials multicapa.

5.2. Identificació dels soports plàstics

5.2.1. Identificació de materials multicapa

Per determinar si els materials estaven compostos per una o més de dues capes, es van adquirir espectres d'ambdós costats de cada mostra, tal com es va descriure a l'apartat 4.2. La Figura 9 il·lustra aquest procés amb dos exemples: un pla monocapa (Plànol 67.9) i un multicapa (Plànol 55.07.S23).

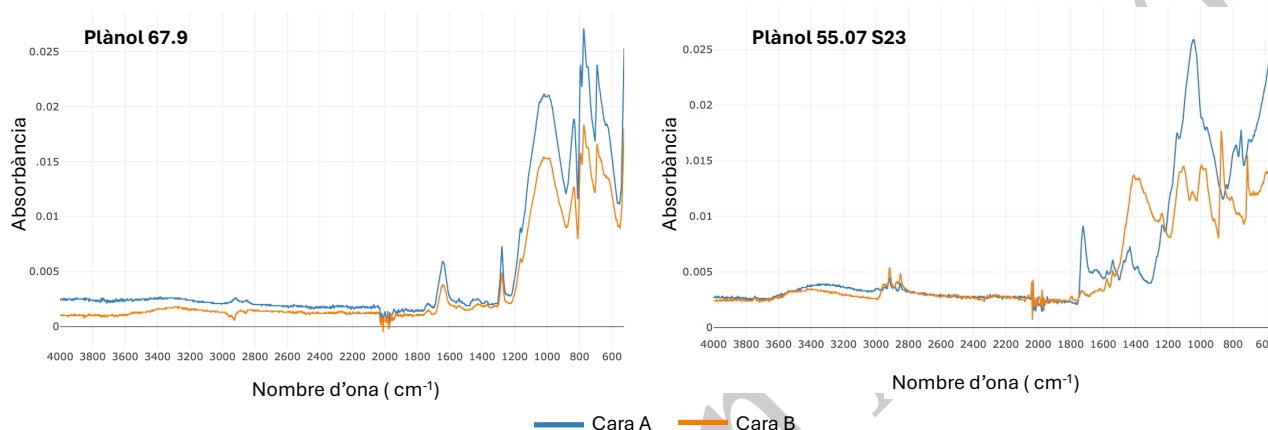


Figura 9. Procés d'avaluació de la presència de multi capes en els plànols. Esquerra, plano que representa una matèria monocapa i dreta presenta un material multicapa.

Al Plànol 67.9, s'observa que els espectres de les dues cares de la mostra presenten els mateixos senyals d'absorció, cosa que indica que el material superficial és homogeni i aparentment és una sola capa. No obstant això, no es pot descartar que es tracti d'un suport multicapa amb una estructura mínima de tres capes, per exemple, acetat de cel·lulosa a les superfícies i un nucli de PET, hipòtesi a confirmar experimentalment. Les úniques variacions es registren en la intensitat dels senyals, cosa que es pot atribuir a factors com l'heterogeneïtat de la superfície, diferències físiques (per exemple, rugositat i, en conseqüència, diferent superfície de contacte del cristall en ATR) o diferents graus de degradació entre les dues cares de la mostra.

En contrast, el Pla 55.07.S23 és clarament un material multicapa. En aquest cas, el perfil espectral de cada cara exhibeix senyals característiques de grups funcionals diferents, fet que confirma la presència de dos materials diferents. Aquest procediment es va aplicar a totes les mostres analitzades i es van confirmar inicialment que 6 dels 40 plans eren multicapa. Els polímers identificats a la composició d'aquests plànols es detallen a la Taula 2.

Taula 2. Materials multicapa i polímers identificats en la seva composició.

Mostra	Descripció
55.07_S23	Cara A: PET Cara B: Acetat de cel.lulosa
66.16	Cara B: PET Cara A: Acetat de cel.lulosa
68.9_S22	Cara A: PET Cara B: Acetat de cel.lulosa
70.15_S30	Cara A: PET Cara B: Acetat de cel.lulosa
71.2S10	Cara A: PET Cara B: Acetat de cel.lulosa
72.8(1962)	Cara A: Acetat de cel.lulosa Cara B: PET

D'acord amb Asensio et al., tant el PET com els èsters de cel·lulosa van ser suports polimèrics comuns als arxius del segle XX. L'acetat de cel·lulosa és àmpliament reconegut com una base de pel·lícula històrica, sovint anomenada "pel·lícula de seguretat". Tot i això, la literatura també documenta la seva vulnerabilitat a la degradació per hidròlisi amb el temps, un procés que porta a l'alliberament d'àcid acètic, conegut com a "síndrome del vinagre". Això explica la fragilitat que presenten diverses mostres.

La Taula 2 mostra que tots els materials multicapa inicialment identificats estan compostos per una combinació de PET i acetat de cel·lulosa. Aquesta troballa és consistent amb la pràctica industrial de l'època de produir estructures laminades per aprofitar les propietats complementàries de cada polímer (Chércoles, 2009). L'alta resistència mecànica i estabilitat dimensional del PET ho van establir com un reemplaçament superior per als èsters de cel·lulosa menys estables, i el seu ús com a capa de suport proveeix una protecció duradora. Per tant, la presència d'ambdues capes suggereix un disseny en què la durabilitat del PET es combina amb el rol funcional o històric de l'acetat de cel·lulosa al plano, cosa que mostra la complexitat de la composició d'aquests materials.

5.2.2. Identificació de polímers

Un cop identificats els materials multicapa, es va verificar la coherència entre les rèpliques de mesurament per seleccionar espectres representatius que es farien servir en el procés d'identificació descrit a l'apartat 4.4. En aquest procés de caracterització, es van identificar el polièster de tereftalat (PET), acetat de cel·lulosa, poliamida i nitrat de cel·lulosa.

En particular, alguns materials detectats inicialment, compostos per PET i acetat de cel·lulosa, han estat confirmats i es poden considerar materials multicapa definitius. D'altra banda, els materials inicialment detectats com a monocapa s'han de sotmetre a assajos addicionals de confirmació, ja que és possible que es tracti d'un multicapa amb dues superfícies externes de la mateixa naturalesa. La Figura 10 presenta la distribució percentual dels materials analitzats, incloent-hi tant els multicapa confirmats com els monocapa pendents de confirmació.

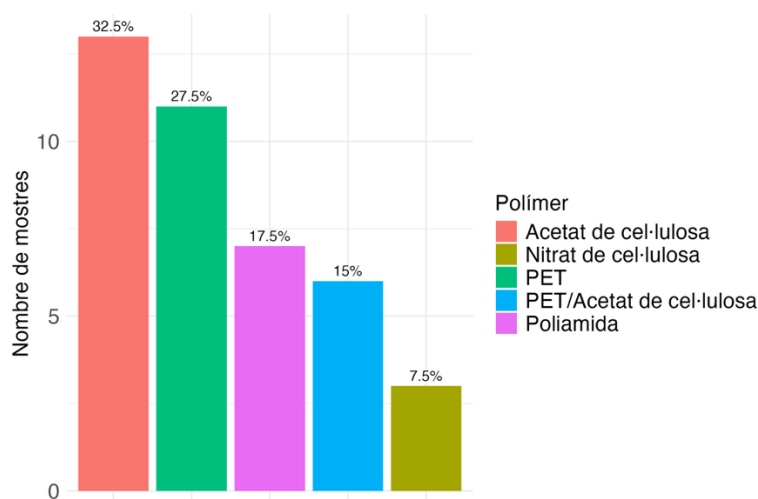


Figura 10. Distribució percentual dels materials identificats a les 40 mostres analitzades mitjançant espectroscòpia infraroja.

A la Figura 10, s'observa que l'acetat de cel·lulosa i el PET són els materials predominants a la col·lecció, representant un 32.5% i un 27.5%, respectivament. Això concorda amb l'ús generalitzat d'aquests polímers com a bases per a suports documentals al llarg del segle XX. D'altra banda, la presència de la poliamida (17,5%) i el nitrat de cel·lulosa (7,5%) reflecteix l'ús de materials d'èpoques anteriors o en aplicacions específiques. La identificació de nitrat de cel·lulosa, el polímer més antic dins del conjunt analitzat, indica la presència de materials potencialment fabricats amb formulacions primerenques de suports fotogràfics o de reproducció. Això no obstant, atès que els plànols més antics del conjunt daten de la dècada de 1960, aquesta identificació no implica necessàriament una cronologia anterior, sinó més aviat la persistència de l'ús d'aquest material en determinades aplicacions tècniques. Finalment, la presència de mostres multicapa de PET i acetat de cel·lulosa (15%) evidencia una tecnologia més recent que cercava combinar la durabilitat del PET amb les propietats de les bases de cel·lulosa.

A continuació, es presentaran exemples representatius per a cada material identificat, incloent-hi el plànol corresponent, un espectre representatiu i l'assignació de les principals bandes. L'Annex 2

a) Identificació de polièster de tereftalato (PET)

La identificació de polièster de tereftalat (PET) es va basar en l'assignació de les principals bandes observades als espectres d'infraroig, comparades amb valors de referència disponibles a la literatura. La Figura 11 presenta l'espectre que es va obtenir per a la mostra M72.8.

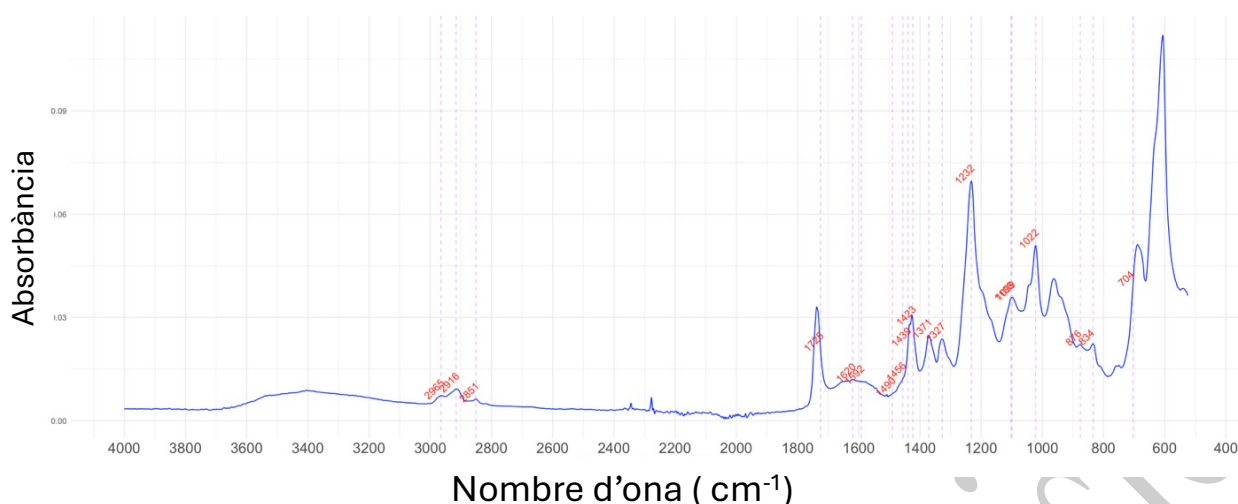


Figura 11. Exemple d'espectre de polièster de tereftalato suports de PET. Mostra M72.8

Dins la Figura 11, es troben els següents senyals distintius reportats en literatura:

- Bandes d'estirament asimètric i simètric del grup metilè ($-\text{CH}_2-$) el 2962, 2917 i 2848 cm^{-1} .
- Vibració d'estirament del grup carbonil de l'èster ($\text{C}=\text{O}$) a 1725 cm^{-1} .
- Estirament de l'anell aromàtic $\text{C}=\text{C}$ mitjançant bandes el 1620 (espatlla), 1592, 1439 i 1423 cm^{-1} .
- Vibració d'estirament de l'enllaç $\text{C}-\text{C}(\text{O})-\text{O}$ a 1232 cm^{-1} .
- Vibració d'estirament de l'enllaç $-\text{O}-\text{C}-$ el 1110 (espatlla) i 1099 cm^{-1} .
- Deformacions al pla i fora del pla de l'anell aromàtic $\text{C}-\text{H}$ el 1022, 970 i 876 cm^{-1} , respectivament.
- Moviments de flexió-torsió (rocking) del grup metilè en 834 cm^{-1} i de flexió-meneig (wagging) de l'anell aromàtic en 704 cm^{-1} .

La coincidència entre les bandes espectrals de les mostres i les referències bibliogràfiques va permetre confirmar la presència de PET a les mostres codificades com: 55.07_S23, 66.16, 66.16_S31, 66.17_S21, 67.12, 68.9_S22, 69.7_S20, 70.15_S30, 70.5_S28, 71.2_S9, 71.2_S10, 71.3_S8, 71.3, 71.4_S11, 71.7_S12, 72.8(1952), 7.

b) Identificació d'acetat de cel·lulosa

De la mateixa manera que per al cas anterior, a la Figura 12 es presenta un exemple d'espectre obtingut per a una mostra que es va identificar com a acetat de cel·lulosa, aquesta mostra correspon a la mostra F1-q, la qual es va fer servir posteriorment per a l'estudi de degradació. L'espectre presentat a la Figura 12 correspon a una zona poc degradada del pla.

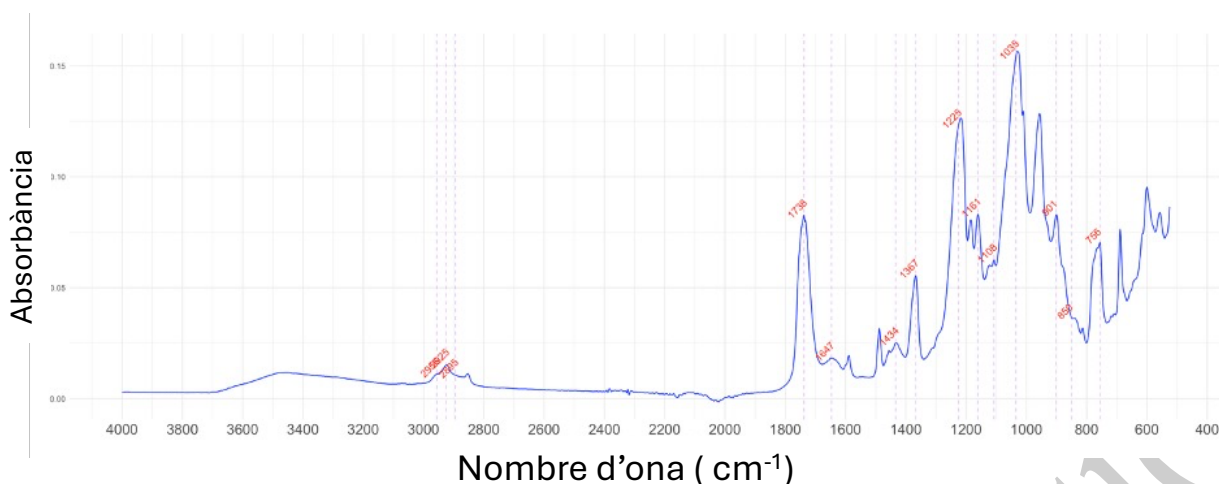


Figura 12. Exemple d'espectre d'acetat de cel·lulosa. Mostra F1-q.

A la Figura 12, es pot observar que l'espectre representatiu presenta els següents senyals distintius:

- Regió 2970–2840 cm^{-1} : bandes febles corresponents a l'estirament C–H de grups metil i metilè.
- Aproximadament 1738 cm^{-1} : banda intensa i ben definida atribuïda a l'estirament del grup carbonil (C=O) de la funció acetil.
- Entre 1640–1630 cm^{-1} : estiraments associats a l'anell glucosídic (C=C i C–O–C aromàtic/heterocíclic), sovint com a banda secundària o espatlla.
- Entre 1430–1370 cm^{-1} : bandes de deformació d'enllaços C–H.
- Bandes en 1225 cm^{-1} i 1035 cm^{-1} : Aquestes vibracions anulars de C–O–C i pirà són característiques de la cel·lulosa, específicament del seu esquelet i els seus enllaços glucosídics.
- Regió 1160–1050 cm^{-1} : diverses bandes fortes i amples atribuïdes a estiraments C–O–C tant de l'anell com de l'acetil.
- Entre 900–700 cm^{-1} : senyals de menor intensitat, corresponents a vibracions fora del pla de C–H en anells aromàtics i l'anell glucosídic. (902 en aquest cas)

La coincidència entre les bandes espectrals de les mostres i les referències bibliogràfiques va permetre confirmar la presència d'acetat de cel·lulosa a les mostres codificades com: 55.07_S23, 66.16, 66.16_S27, 67.11_S16, 67.16_19, 8. 70.11_S29, 70.15_S30, 71.2S10, 72-1_0-25_S3, 72-1_77_S1, 72.8(1962), 89_S24, 139_S25, 404_S26 i F1-q

És important assenyalar que en diversos casos la intensitat de les bandes espectrals no va coincidir completament entre les mostres, principalment a causa de l'estat de degradació. En mostres degradades, algunes bandes característiques, com la del grup carbonil, es poden presentar amb menys intensitat, ja que els productes de degradació generen bandes més intenses a altres regions de l'espectre infraroig. Això no obstant, per a la identificació es va procurar que els senyals assignats apareguessin de manera consistent i que guardessin proporcionalitat entre si dins de l'espectre de cada mostra, més que buscar una coincidència estricta en la intensitat absoluta entre diferents espectres.

c) Identificació de poliamida

La Figura 13 presenta un exemple de l'espectre per a un material que es va identificar com a poliamida, corresponent a la mostra 72.6.

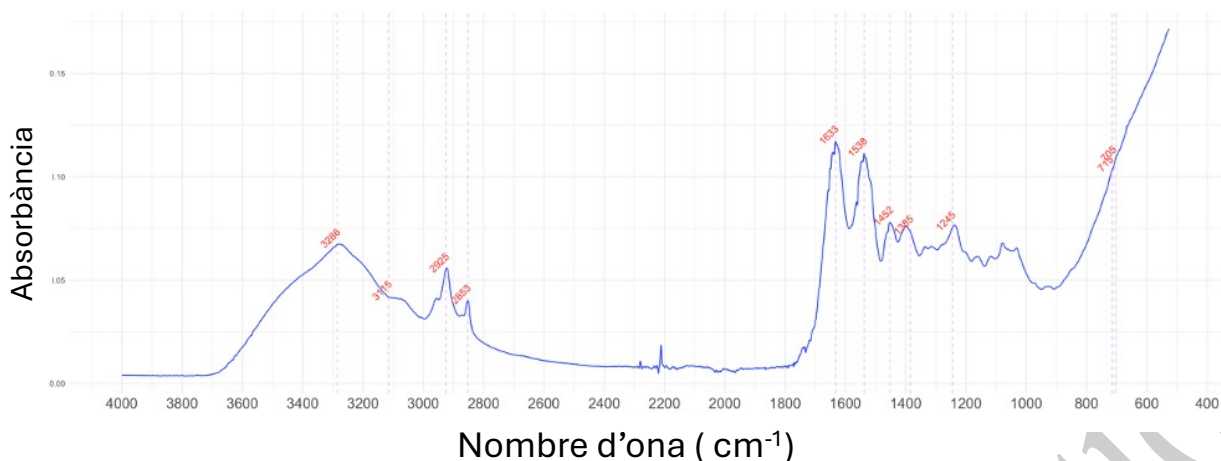


Figura 13. Exemple d'espectre de poliamida. Mostra 72.6

Per a la caracterització de poliamida es van prendre com a referències les dades reportades per a poliamides comunes com Nylon-6 i Nylon-6,6. Les bandes identificades inclouen:

- Banda ampla i forta a l'interval 3300–3100 cm^{-1} corresponent a l'estirament de l'enllaç N–H (amida A i amida B).
- Estiraments alifàtics C–H ($-\text{CH}_2-$) el 2920 i 2860 cm^{-1} .
- Banda intensa característica d'amida I (estirament C=O) els 1640–1630 cm^{-1} .
- Banda forta amida II (flexió de N–H i estirament C–N) al voltant de 1540 cm^{-1} .
- Banda mitjana amida III (estirament C–N i deformació N–H al pla) entre 1260 i 1240 cm^{-1} .
- Bandes corresponents a moviments de l'esquelet metilè (balanceig (rocking), torsió (twisting), meneig (wagging)) localitzades el 1460, 1370 i de 730 a 720 cm^{-1} .

La coincidència entre les bandes espectrals de les mostres i les referències bibliogràfiques va permetre confirmar la presència de poliamida a les mostres codificades com: 72.3_S5, 72.3_S6, 72.6_S7 i 67.18_S15.

d) Identificació del nitrat de cel·lulosa

La Figura 14 presenta un exemple de l'espectre per a un material que es va identificar com a nitrat de cel·lulosa, corresponent a la mostra 69.1_S17.

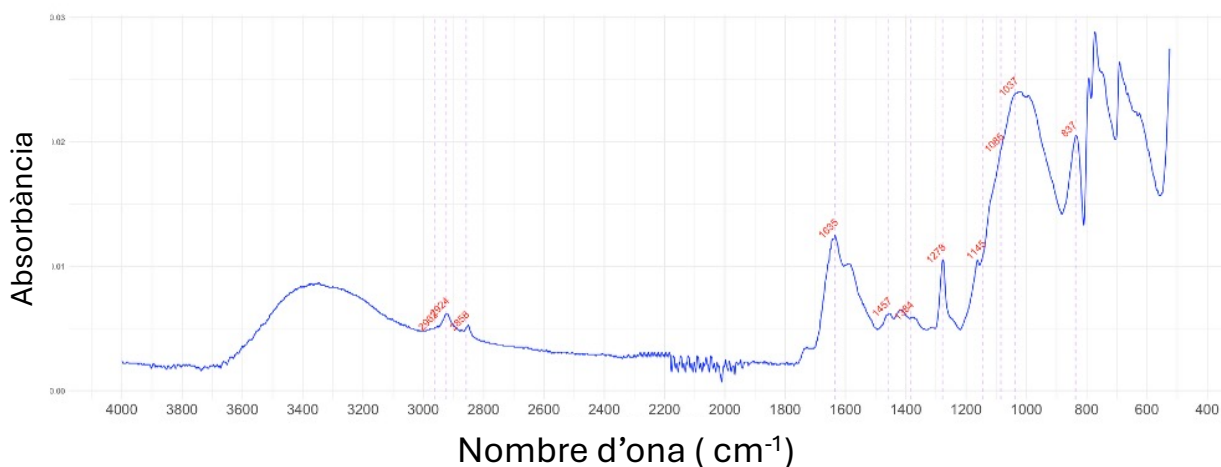


Figura 14. Exemple d'espectre de nitrat de cel·lulosa. Mostra 72.6

De la mateixa manera a allò realitzat amb els altres polímers, es va trobar que les bandes que coincideixen amb allò reportat en literatura per al nitrat de cel·lulosa corresponen a:

- Bandes febles a mitges a la regió $2970\text{--}2850\text{ cm}^{-1}$, corresponents a estiraments C–H alifàtics ($-\text{CH}_2-$, $-\text{CH}_3$).
- Bandes intenses del grup nitro ($-\text{NO}_2$): estirament asimètric $\text{N}=\text{O}$ entre $1650\text{--}1630\text{ cm}^{-1}$ i estirament simètric $\text{N}=\text{O}$ a l'interval $1280\text{--}1260\text{ cm}^{-1}$.
- Bandes fortes a la regió $840\text{--}820\text{ cm}^{-1}$ associades a vibracions del grup nitro.
- Diverses bandes intenses entre 1160 i 1050 cm^{-1} atribuïbles a estiraments C–O–C del pont glucosídic. Les quals s'observen solapades.
- Deformacions de C–H a l'interval $1450\text{--}1370\text{ cm}^{-1}$.

La coincidència entre les bandes espectrals de les mostres i les referències bibliogràfiques va permetre confirmar la presència de nitrat de cel·lulosa a les mostres codificades com: 67.9_S13 i 69.1_S17.

5.2.3. Resultats globals de identificació

A les Taules 3 i 4 es presenten els resultats preliminars d'identificació per als materials monocapa i multicapa, respectivament. A les dues taules es mostra el codi del plànol juntament amb les observacions més rellevants obtingudes durant el procés d'identificació, tal com es va descriure a la secció 4.4.

S'ha de tenir en compte que, en alguns casos, a causa de diferències entre les superfícies dels plànols i altres característiques assenyalades a l'informe de l'AMCB (Martínez, 2025), caldrà realitzar assajos instrumentals addicionals per confirmar de manera definitiva la naturalesa dels materials identificats.

Taula 3. Identificació proposada pels plànols que presentaren un material monocapa.

Codi del Plano	Possible(s) polímer(s)	Observacions
66.16_S27	Acetat de Cel·lulosa	L'espectre és consistent amb acetat de cel·lulosa, encara que presenta bandes característiques de baixa intensitat. El perfil espectral és semblant al de la mostra 139_S25.
66.16_S31	PET	Es va confirmar la presència de PET. L'espectre presenta una resolució limitada, però el perfil d'absorció és consistent inequívocament amb aquest polímer. No es van trobar diferències entre les cares de la mostra.
66.17_S21	PET	L'anàlisi espectral correspon a PET. La cara A mostra una degradació més gran, evidenciada per una disminució en la intensitat de les bandes d'absorció. Aquest comportament és similar al de la mostra 71.7_S12.
67.12	PET	La cara B presenta una degradació més avançada. És possible que es degui a una correlació amb la rugositat superficial.
67.7	Poliamida	L'anàlisi comparativa de les cares A i B va demostrar una composició idèntica. Els pics d'absorció són consistents amb Poliamida
67.11_S16	Acetat de Cel·lulosa	Es va confirmar una major degradació a la cara B. El perfil espectral és consistent amb acetat de cel·lulosa i similar al de la mostra 139_S25.
67.16_S14	Acetat de Cel·lulosa	Les cares A i B són espectralment idèntiques. El perfil d'absorció és consistent amb acetat de cel·lulosa, similar al de la mostra 139_S25.
67.18_S15	Poliamida	Es va confirmar la presència de Poliamida. L'espectre és consistent amb el de la mostra 72.3_S5.

Codi del Plano	Possible(s) polímer(s)	Observacions
67.9_S13	Nitrat de Cel·lulosa	Es va confirmar nitrat de cel·lulosa. Es va detectar un pic d'absorció a 998 cm^{-1} , indicatiu d'una càrrega inorgànica no identificada. La resta de les bandes són característiques del nitrat de cel·lulosa.
68.10	Acetat de Cel·lulosa	Les bandes d'absorció a la cara A són més febles que a la cara B. No obstant, el perfil espectral és el mateix, cosa que confirma que es tracta del mateix material. És possible que aquesta diferència sigui deguda a la rugositat superficial.
69.9	Nitrat de Cel·lulosa	Es va confirmar la presència de nitrat de cel·lulosa.
69.1_S17	Nitrat de Cel·lulosa	L'espectre és semblant al de la mostra 67.9_S13. La cara A presenta una degradació més avançada respecte a la cara B. Això es reflecteix en una disminució de la intensitat de les bandes d'absorció.
69.3_S19	PET	Es va confirmar la presència de PET. L'espectre és consistent amb el de la mostra 66.16_S31.
69.7_S20	PET	La mostra va ser identificada com a PET. La cara A presenta degradació, amb bandes d'absorció de menys intensitat respecte a la cara B. El perfil espectral és similar al de la mostra 66.16_S31.
70.11_S29	Acetat de Cel·lulosa	Es va confirmar Acetat de cel·lulosa. S'observa un senyal en 1021 cm^{-1} que podria ser indicatiu d'una càrrega inorgànica, com ara carbonat de calci o un silicat.
70.5_S28	PET	Es va confirmar la presència de PET. L'espectre és consistent amb el de la mostra 66.16_S31.
71.2_S9	PET	Es va confirmar la presència de PET. L'espectre és consistent amb el de la mostra 66.16_S31.
71.3_S8	PET	L'espectre és consistent amb PET. El perfil espectral és semblant al de la mostra 71.7_S12.
71.3	PET	Es va confirmar que la presència de tinta a la cara B redueix la intensitat del senyal del polímer. Les cares A i B són espectralment equivalents, excloent-ne l'efecte de la tinta.
71.4_S11	PET	El material del plano és PET. Es va trobar que la cinta adhesiva, considerada un material extern, és Acetat de cel·lulosa. Les cares A i B del pla són espectralment semblants.
71.7_S12	PET	La mostra va ser identificada com a PET. Es va observar un pic no assignat en 1146 cm^{-1} i una baixa resolució general, però el perfil és consistent amb PET.
72-1_0-25_S3	Acetat de Cel·lulosa	Es va confirmar la presència d'Acetat de cel·lulosa, amb pics característics clarament distingibles.
72-1_77_S1	Acetat de Cel·lulosa	El perfil espectral és consistent amb el de la mostra 72-1_0-25_S3, confirmant la presència d'acetat de cel·lulosa.
72.3	Poliamida	La mostra es va identificar com a Poliamida. L'espectre és clarament consistent amb aquest polímer i l'absència d'una banda forta al voltant de 1050 cm^{-1} descarta la possibilitat que sigui PET.
72.3_S5	Poliamida	L'espectre correspon clarament a una poliamida.
72.3_S6	Poliamida	L'espectre és consistent amb el de la mostra 72.3_S5 i confirma la presència de Poliamida.
72.3_S4	Poliamida	Es va confirmar la presència de Poliamida. La cara B presenta un estat de degradació més avançat.
72.6_S7	Poliamida	L'espectre és consistent amb el de la mostra 72.3_S5 i confirma la presència de Poliamida.

Codi del Plano	Possible(s) polímer(s)	Observacions
72.8(1953)	PET	Es va confirmar PET. La cara A presenta degradació superficial i resulta en bandes d'absorció més febles.
73.12	PET	La mostra va ser identificada com a PET.
89_S24	Acetat de Cel·lulosa	Les cares A i B són espectralment idèntiques, excepte per una diferència a la regió de $800-600\text{ cm}^{-1}$ a la cara A, que podria ser un contaminant inorgànic o contaminació creuada. El perfil espectral és consistent amb el de la mostra 72-1_0-25_S3.
139_S25	Acetat de Cel·lulosa	Es va confirmar la presència d'Acetat de cel·lulosa. Es va observar un senyal a 992 cm^{-1} atribuïble a una càrrega inorgànica. La cara B presenta una degradació més gran.
404_S26	Acetat de Cel·lulosa	El perfil espectral és consistent amb el de la mostra 72-1_0-25_S3, confirmant la presència d'acetat de cel·lulosa.
F1-q	Acetat de Cel·lulosa	Es va confirmar la presència d'Acetat de cel·lulosa. S'hi va trobar una variabilitat espectral que s'atribueix a una degradació heterogènia de la mostra.

Taula 4. Identificació proposada pels planos que mostraren un material multicapa.

Codi del Plano	Possible(s) polímer(s)	Observacions
55.07_S23	PET y Acetat de cel·lulosa	Es va confirmar que la mostra és multicapa. L'anàlisi espectral de la cara A és consistent amb PET, mentre que la cara B correspon a acetat de cel·lulosa. La mostra presenta similituds espectrals amb la 66.16_S31.
66.16	PET y Acetat de cel·lulosa	L'espectre de la cara B és PET. La cara A presenta un espectre de baixa resolució que no permet una identificació concloent, encara que l'absència de la banda del grup carbonil i dels sobretons aromàtics suggereix la possible presència d'acetat de cel·lulosa.
68.9_S22	PET y Acetat de cel·lulosa	Es va confirmar que la mostra és multicapa. L'espectre de la cara A correspon a PET, mentre que el de la cara B és consistent amb acetat de cel·lulosa. L'anàlisi va ser complex i va requerir una raspadura de la superfície per obtenir una identificació precisa de la capa inferior.
70.15_S30	PET y Acetat de cel·lulosa	L'espectre de la mostra revela la presència d'Acetat de cel·lulosa i PET, confirmant-ne la naturalesa multicapa.
71.2S10	PET y Acetat de cel·lulosa	S'ha identificat que la mostra és multicapa. La cara A és consistent amb PET, mentre que la cara B va ser identificada com a Acetato de cel·lulosa. Els espectres més clars s'obtingueren a partir d'una mostra raspada. El perfil espectral de la cara B és semblant al de la mostra 72-1_0-25_S3.
72.8(1962)	PET y Acetat de cel·lulosa	Es va confirmar que la mostra és multicapa mitjançant l'anàlisi dels espectres de cada cara. D'altra banda, es va confirmar que la Cara A correspon a Acetat de Cel·lulosa i la Cara B a cara B a PET

Les observacions presentades a les Taules 3 i 4 revelen característiques clau sobre l'estat de conservació i la composició dels materials analitzats. Una troballa recurrent és la degradació heterogènia, manifestada per una notable disminució en la intensitat de les bandes d'absorció en certes cares de les mostres, com es va observar als plànols 66.17_S21 i 69.1_S17. Aquest comportament es pot atribuir tant a la rugositat superficial diferencial, que redueix la superfície efectiva de contacte per a l'ATR i, per tant, la intensitat del senyal, com a una exposició diferencial a factors externs, com

les condicions ambientals o l'emmagatzematge. Cal assenyalar la diferent degradació del pla F1-q a les zones perifèriques respecte a la central, la qual cosa podria indicar que l'àcid acètic generat és més gran o queda més concentrat a la part central del pla als calaixos d'emmagatzematge utilitzats.

El procés d'identificació es va veure influenciat per la naturalesa física de les mostres. En el cas dels materials multicapa, una identificació concloent sovint va requerir la remoció de capes superficials mitjançant raspat, com es detalla per al pla 68.9_S22 i 71.2S10. De manera similar, l'obtenció d'espectres d'alta qualitat en materials monocapa amb degradació heterogènia va ser possible en seleccionar les zones amb una alteració menor, com es va fer per a la mostra F1-q. D'altra banda, es va trobar que variacions en la intensitat de les bandes en mostres monocapa, com en el pla 67.12, també es van atribuir a diferències físiques, com la rugositat superficial o la presència de materials externs com la tinta (plànol 71.3) o cinta adhesiva (plànol 71.4_S11).

Finalment, les observacions espectrals van permetre detectar la possible presència de càrregues inorgàniques en alguns plànols. Per exemple, al pla 67.9_S13, es va detectar un pic en 998 cm^{-1} , i al 70.11_S29, es va trobar un pic en 1021 cm^{-1} , la qual cosa ressalta la complexitat de la composició d'aquests materials d'arxiu més enllà dels polímers base.

5.3. Comparació amb con proves organolèptiques

Com s'ha esmentat, les proves organolèptiques són un procediment pràctic i accessible als arxius i la seva utilitat està àmpliament reconeguda a la literatura. Per tal d'avaluar la capacitat d'aquest mètode preliminar, se'n van comparar els resultats amb els obtinguts mitjançant anàlisi instrumental per espectroscòpia d'ATR. La Taula 5 mostra els resultats per als materials monocapa i multicapa. En cada cas, s'hi inclou el codi del plànol, el resultat de la prova organolèptica, el grup assignat (Martínez, 2025), la identificació preliminar per ATR, així com una indicació de la coherència entre tots dos mètodes.

La principal observació de la comparació és que, en general als plànols en què s'ha determinat la presència de PET mitjançant ATR (tant monocapa com multicapa), aquest polímer també va ser identificat mitjançant la determinació organolèptica. Per a la resta dels materials de suport determinats per ATR, la coherència amb els procediments organolèptics és menor. Aquesta menor coincidència es pot deure tant a la complexitat intrínseca de les mostres en la determinació instrumental com a les limitacions de la prova organolèptica, que es pot veure emmascarada per diferències en transparència, color, rugositat o processos de degradació que afecten la percepció dels materials.

En conseqüència, algunes mostres inicialment classificades com a monocapa podrien correspondre a estructures multicapa o requerir confirmació addicional. Per això, s'han identificat certs materials que necessiten assajos complementaris per verificar-ne la naturalesa i descartar possibles multi capes, garantint així una interpretació més robusta i fiable dels resultats.

Taula 5. Comparació de proves organolèptiques vs anàlisi instrumental (ATR) per materials identificats inicialment com monocapa i confirmats com multicapa (*Agrupacions basades en la determinació organolèptica).

Materials monocapa inicialment identificat amb ATR.									
Mostra	Prova Organolèptica	Grup assignat *	ATR	Coherència	Mostra	Prova Organolèptica	Grup assignat*	ATR	Coherència
66.16_S27	PET/Diazo	3B	Acetat de Cel·lulosa	X	71.3_S8	PET	3A	PET	✓
66.16_S31	PET	3B	PET	✓	71.3	PET	3A	PET	✓
66.17_S21	PET/Diazo	3B	PET	✓	71.4_S11	PET	3A	PET	✓
67.12	PET/Diazo	3B	PET	✓	71.7_S12	PET	3A	PET	✓
67.7	PET/gelatina-plata	3C	Poliamida	X	72-1_0-25_S3	PET/Diazo	3B	Acetat de Cel·lulosa	X
67.11_S16	PET/Diazo	3B	Acetat de Cel·lulosa	X	72-1_77_S1	PET/Diazo	3B	Acetat de Cel·lulosa	X
67.16_S14	PET/Diazo	3B	Acetat de Cel·lulosa	X	72.3	Acetat de cel·lulosa/Gelatina-plata	1B	Poliamida	X
67.18_S15	PET/gelatina-plata	1B	Poliamida	X	72.3_S5	PVC/Gelatina	2B	Poliamida	X
67.9_S13	PET	3A	Nitrat de Cel·lulosa	X	72.3_S6	Acetat de cel·lulosa/gelatina	1B	Poliamida	X
68.10	Acetat de cel·lulosa	1A	Acetat de Cel·lulosa	✓	72.3S4	PVC/Gelatina	2B	Poliamida	X
69.9	PVC/PET	2A/3B	Nitrat de Cel·lulosa	X	72.6_S7	Acetat de cel·lulosa/Gelatina	1B	Poliamida	X
69.1_S17	PET	3A	Nitrat de Cel·lulosa	X	72.8(1953)	PVC	2A	PET	X
69.3_S19	PET	3A	PET	✓	73.12	PET	3A	PET	✓
69.7_S20	PET	3A	PET	✓	89_S24	Paper vegetal/Acetats	1A	Acetat de Cel·lulosa	✓
70.11_S29	PET	3A	Acetat de Cel·lulosa	X	139_S25	PET/Diazo	3B	Acetat de Cel·lulosa	X
70.5_S28	PET	3A	PET	✓	404_S26	PET/Diazo	3B	Acetat de Cel·lulosa	X
71.2_S9	PET	3A	PET	✓	F1-q	Acetat de cel·lulosa	1A	Acetat de Cel·lulosa	✓



Materials multicapa inicialment identificats amb ATR									
Mostra	Prova Organolèptica	Grup assignat *	ATR	Coherència	Mostra	Prova Organolèptica	Grup Assignat	ATR	Coherència
55.07_S23	PET	3A	PET y Acetat de cel·lulosa	✓	71.2S10	PET	3A	PET y Acetat de cel·lulosa	✓
66.16	PET/Diazo	3B	PET y Acetat de cel·lulosa	✓	72.8(1962)	PVC/PET	2A o 3A	PET y Acetat de cel·lulosa	✓
68.9_S22	PET/Diazo	3B	PET y Acetat de cel·lulosa	✓	70.15_S30	PET	3A	PET y Acetat de cel·lulosa	✓

Un cas particular és el de les mostres identificades com a poliamida mitjançant ATR, que a la prova organolèptica van ser classificades generalment com a gelatina. Aquesta diferència pot estar relacionada amb el fet que les gelatines també contenen enllaços amida (-CO-NH-) a la seva estructura proteica, generant bandes FTIR molt similars a les poliamides, especialment a les regions d'Amida I ($\sim 1650\text{ cm}^{-1}$) i Amida II ($\sim 1550\text{ cm}^{-1}$). Aquest solapament espectral pot induir errors d'identificació, per la qual cosa es faran alguns assaigs addicionals, com ara raspats de la superfície o comparació amb mostres de referència, per confirmar-ne la veritable composició.

De la mateixa manera, en diversos casos, les proves organolèptiques van assenyalar la possible presència de diazo, especialment en mostres amb emulsió sobre PET. Tot i això, a l'anàlisi ATR no es va detectar evidència d'aquest grup diazo. Aquesta discrepància pot ser deguda a la sensibilitat limitada d'ATR davant de compostos de capa superficial molt prima o a la interpretació de característiques visuals per part de la classificació organolèptica. Per això, aquests materials requereixen confirmació addicional mitjançant assaigs complementaris.

En conseqüència, s'han identificat certs materials la naturalesa dels quals requereix assajos instrumentals complementaris, amb l'objectiu de confirmar-ne definitivament la composició i descartar possibles multicapa. Aquesta diferenciació permet distingir clarament entre les mostres la identificació de les quals es pot considerar fiable i aquelles que romanen com a preliminars, reflectint la necessitat d'un enfocament progressiu en la caracterització dels suports plàstics.

5.4. Estudi Pilot de degradació i proposta de monitorització.

5.4.1. Estudi pilot de degradació.

En el marc del present estudi es va seleccionar la mostra F1-q, un suport d'acetat de cel·lulosa en format monocapa, com a cas pilot pel seu clar gradient de deteriorament: des d'una degradació severa a la zona central fins a un millor estat de conservació a les vores. L'objectiu d'aquesta secció no és la identificació del polímer, ja abordada prèviament, sinó l'anàlisi de les variacions als espectres infrarojos i a les imatges digitals de la mostra. Per això es van obtenir 16 submostres distribuïdes al llarg del gradient, registrant-se els seus espectres inicialment mitjançant transmissió FTIR (T-FTIR).

L'acetat de cel·lulosa és propens a processos de degradació que en comprometen l'estabilitat física i química en contextos d'arxiu. El mecanisme principal és la hidròlisi dels grups acetil, afavorida per temperatures i humitats relatives elevades, que condueix a l'alliberament d'àcid acètic. A aquest procés se suma la migració i evaporació de plastificants, que originalment atorguen flexibilitat al polímer però la pèrdua progressiva del qual afavoreix l'esquerdament i la fragilitat del suport. Aquests mecanismes, en conjunt, expliquen la presència d'olors específiques, així com la fragilització física i els canvis òptics observables, cosa que fa que l'acetat de cel·lulosa sigui un material susceptible de deteriorament en col·leccions patrimonials (Gaudio, 2021).

La Figura 15 presenta els espectres de transmissió registrats per als diferents punts de mostreig al llarg del gradient de degradació a la mostra F1-q. Cada gràfic correspon a una submostra específica i s'observa que la transmissió és considerablement baixa en certes regions, cosa que dificulta la identificació definitiva dels senyals associats als diferents grups funcionals; això és atribuïble l'estat de degradació del material, cosa que pot generar elevada absorció de la radiació. En aquesta Figura, s'observa que en comparar espectres adjacents com P01 amb P02, no s'evidencien diferències marcades, cosa que suggereix que en zones veïnes el grau de degradació és relativament semblant. No obstant això, en comparar espectres més allunyats dins del gradient per exemple entre P01 (visiblement més degradada) i P16 (visiblement menys degradada), sí que s'aprecien



canvis notoris, especialment en els senyals situats per sota de 1700 cm^{-1} , que mostren variacions en forma i intensitat.

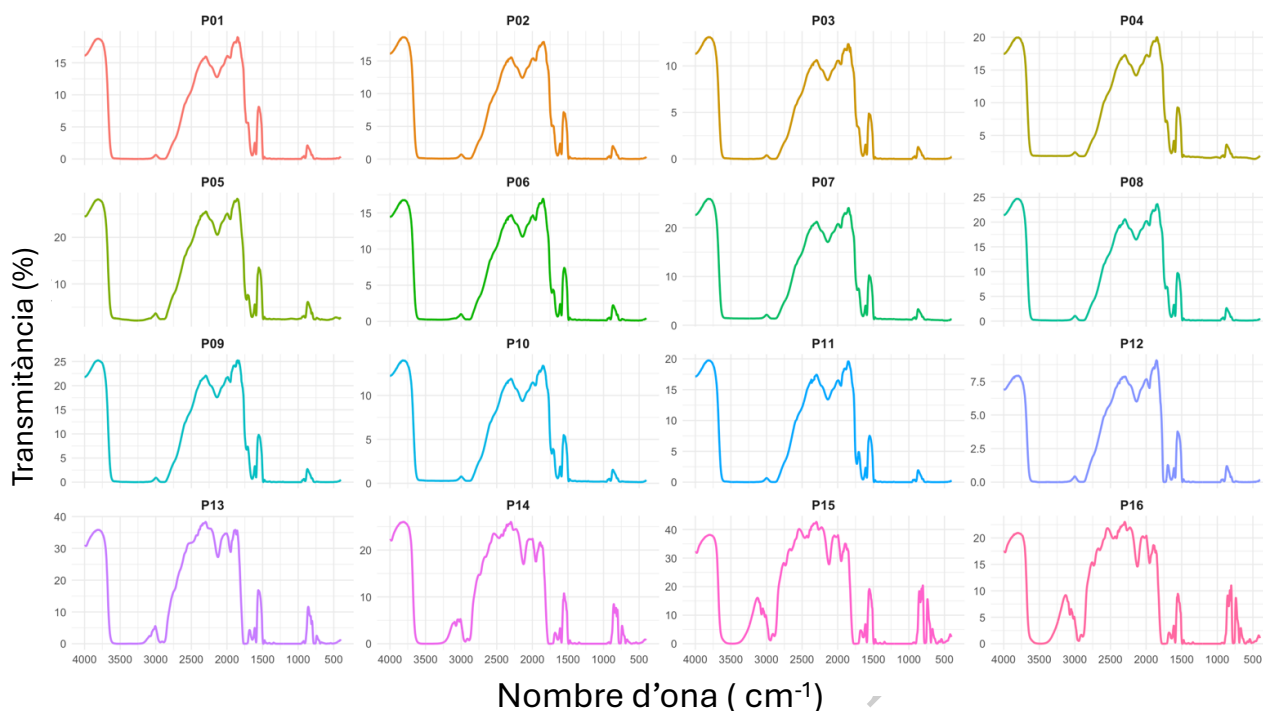


Figura 15. Espectres FTIR de transmissió representatius en los punts de mostreig al llarg del gradient de degradació de la mostra F1-q.

La Figura 16 mostra la superposició d'espectres representatius (P01, P06, P12 i P15), cosa que permet visualitzar de manera precisa l'evolució dels senyals infrarojos al llarg del gradient de degradació de l'acetat de cel·lulosa. A mesura que s'avança des d'una regió més afectada (P01) cap a una de menys alterada (P16), s'observen canvis progressius en bandes clau que són coherents amb els mecanismes de reacció descrits en la literatura (Tan, 2023; Edge et al., 1989; Ballany et al., 2000). En particular, la banda associada a l'estirament O–H (3480 cm^{-1}) s'eixampla i augmenta en intensitat a les àrees més degradades, indicant l'exposició i la formació de grups hidroxil com a conseqüència directa de la hidròlisi. Paral·lelament, es registra una disminució marcada en la intensitat tant de l'estirament C–H (2945 cm^{-1}) com del carbonil (1740 cm^{-1}), comportament que s'interpreta com a evidència de la pèrdua progressiva de grups acetil i la desacetilació molecular del polímer.

Aquest comportament coincideix amb estudis previs que descriuen l'afebliment i eventual desaparició de la banda de 1760 cm^{-1} (C=O) durant processos de degradació química, particularment en ambients àcids i amb exposició a humitat. L'increment simultani de la banda O–H concorda amb la regeneració de grups funcionals típics de la cel·lulosa, mentre que, a la zona baixa de l'espectre (per sota de 1000 cm^{-1}), la pèrdua de definició i nitidesa dels senyals atribuïts a vibracions de l'anell glucosídic (924 , 835 , 740 cm^{-1}) suggereix ruptura d'enllaços, tal com s'observa en etapa avançada de deteriorament físic i químic.

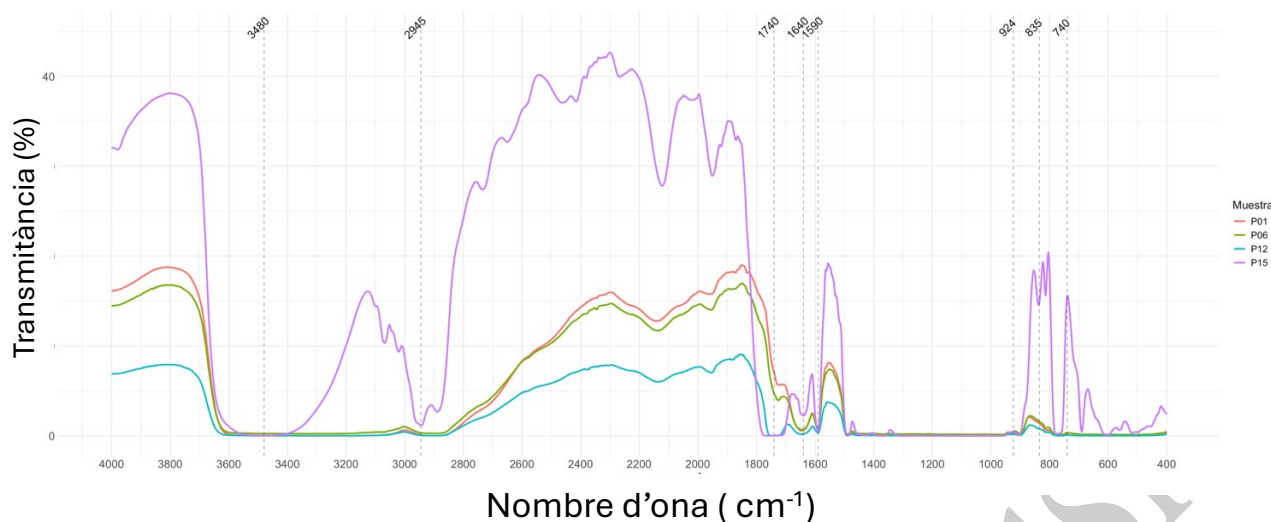


Figura 16. Espectres FTIR de transmissió superposats dels punts P01, P06, P12 y P15, mostrant canvis en bandes clau que reflecteixen la progressió del deteriorament químic en l'acetat de cel·lulosa.

D'altra banda, alguns fragments es van poder analitzar mitjançant espectroscòpia ATR. La Figura 17 mostra la superposició dels espectres obtinguts amb aquesta tècnica, permetent confirmar tendències clau de degradació: la disminució de la banda característica del carbonil ($\sim 1740\text{ cm}^{-1}$, estirament $\text{C}=\text{O}$ d'acetil), la banda d'estirament $\text{C}-\text{H}$ de grups metil i metilè ($\sim 2945\text{ cm}^{-1}$) (vibracions fora del pla de $\text{C}-\text{H}$ en anells aromàtics i glucosídics). Per contra, s'observa un augment d'intensitat a la banda $\text{O}-\text{H}$ ($\sim 3480\text{ cm}^{-1}$, estirament d'hidroxil), així com al senyal en 740 cm^{-1} (vibració fora del pla de l'anell glucosídic i flexió de $\text{C}-\text{H}$), la qual cosa indica una major exposició dels grups hidroxil i una reorganització conformational de la cel·lulosa degradada. A més, s'aprecien senyals nous o reforçats a la regió $1600\text{--}600\text{ cm}^{-1}$, especialment la banda en 1483 cm^{-1} i en 1174 cm^{-1} , la qual cosa pot obeir a la possible aparició de fragments aromàtics o productes secundaris de degradació.

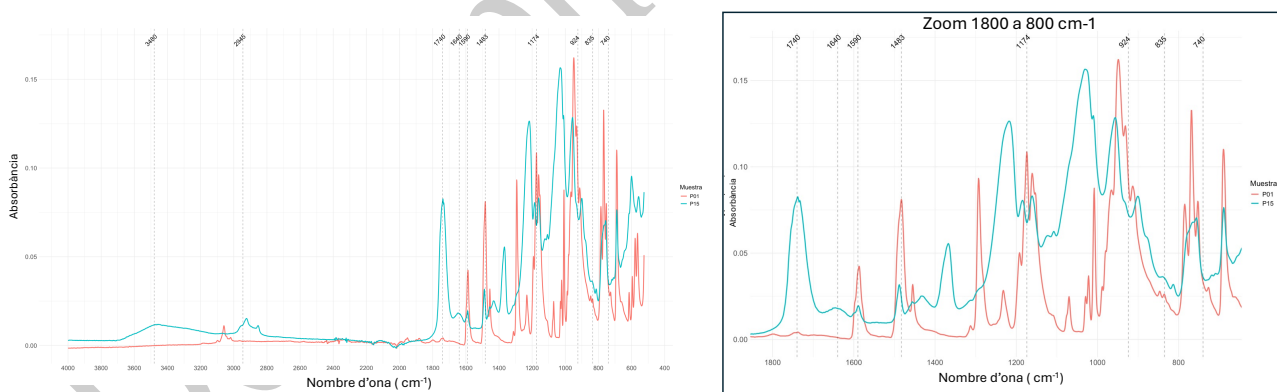


Figura 17. Espectres FTIR ATR superposats dels punts seleccionats, conformant l'evolució de bandes clau (carbonil, anell glucosídic, $\text{C}-\text{H}$ y $\text{C}-\text{O}-\text{C}$).

D'altra banda, els canvis químics identificats mitjançant IR, principalment la pèrdua de grups acetil i l'augment d'hidroxils, afecten directament l'aparició d'alteracions físiques visibles com el groc, la fragilització i la contractura de l'acetat de cel·lulosa.

5.4.2. Proposta de monitorització.

La conservació dels plànols en suports plàstics i els resultats obtinguts en aquest estudi mostren tant la necessitat de sistemes de monitorització de l'estat de conservació dels plànols que puguin implementar-se als arxius i tallers de restauració com la dificultat de realitzar aquestes determinacions i obtenir resultats coherents en tots els casos. Aquesta situació evidencia una distància entre les proves de taller i les de laboratori que seria convenient completar amb una proposta que complementés la capacitat de les proves organolèptiques en el seguiment dels processos de degradació dels plànols. En aquest context, s'ha assajat la utilització d'imatges fotogràfiques per al seguiment de l'estat de conservació/degradació dels suports plàstics a través de l'avaluació del color dels plànols.

Per a aquesta primera aproximació es van prendre imatges del plànol mitjançant un telèfon mòbil. Després del processament digital de les imatges fotogràfiques, que va incloure correcció de gradients, ombres i il·luminació i calibratge cromàtic, es va estimar l'índex de groc seguint la norma ASTM E313-20. La Figura 18 presenta aquests resultats, evidenciant que els valors més alts de groc es concentren en els primers punts de mostreig (zona visualment més degradada) i disminueixen progressivament, en total correspondència amb l'observació visual i les observacions espectroscòpiques: la menor degradació es localitza a partir del punt 14. Aquesta coherència demostra que l'anàlisi digital de color permet estimar de manera ràpida i no invasiva el grau de deteriorament del material, cosa que resulta d'utilitat per a aplicacions de monitorització i conservació preventiva.

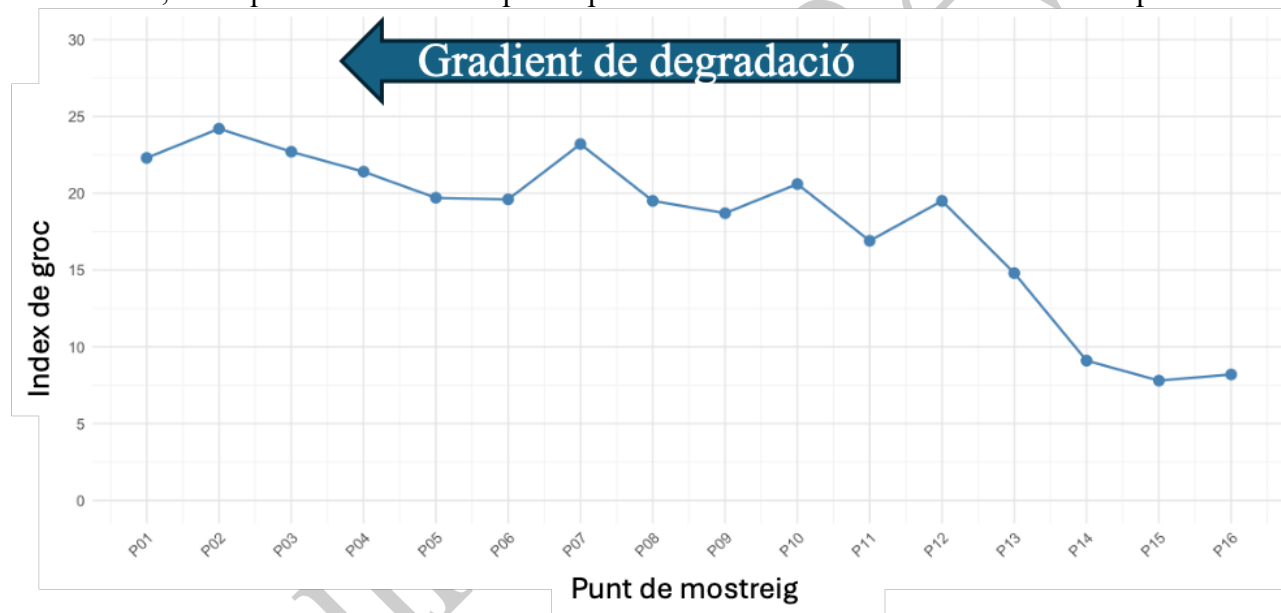


Figura 18. Índex de groc calculat a partir de l'anàlisi digital de les fotografies fetes al llarg del gradient de degradació a la mostra F1-q.

A l'anàlisi digital d'imatge no només es va calcular l'índex de groc, sinó també mètriques com tons, saturació, brillantor, contrast i diferents índexs cromàtics i de grisos, els quals han mostrat correlació lineal amb paràmetres químics i concentració de compostos en altres investigacions. Per a aquest treball, es van estimar aproximadament 30 mètriques visuals al llarg de la mostra i se'n va analitzar la correlació amb les bandes rellevants de l'espectre IR, seleccionades prèviament després d'aplicar una anàlisi de components principals (PCA) per reduir-ne la dimensionalitat. La Figura 19 mostra el mapa de correlacions (només per a Coeficients de Correlació >0.5 i >-0.5) entre les diferents propietats extretes de l'anàlisi digital d'imatge i els números d'ona seleccionats, il·lustrant quines mètriques visuals presenten les relacions més fortes amb els canvis químics mesurats espectroscòpicament.

En aquesta gràfica s'observa que propietats com els índexs de groc (ASTM_Groc, CieLAB_Groc), cromaticitat (Cromatic_R, Cromatic_G, Cromatic_B), saturació i paràmetres dels espais de color CieLAB i HSV mostren correlacions significatives amb regions espectrals clau, especialment a les

zones del carbonil ($\sim 1740\text{ cm}^{-1}$), hidroxil ($\sim 3480\text{ cm}^{-1}$) i el rang estructural per sota de 1000 cm^{-1} , això mostra el potencial de l'anàlisi d'imatge digital.

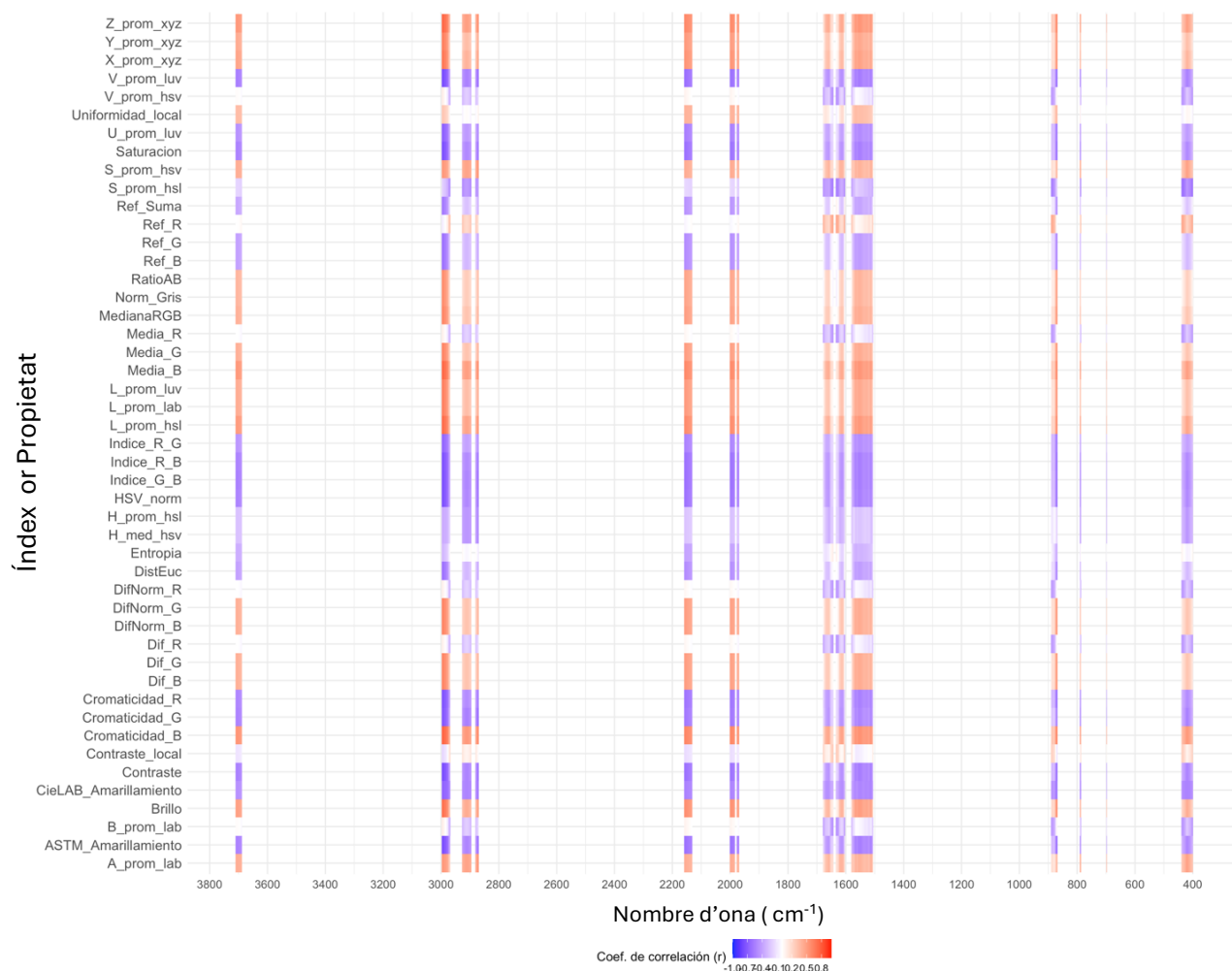


Figura 19. Mapa de correlacions entre propietats visuals digitals i números d'ona seleccionats (absorbància IR), mostrant la relació quantitativa entre paràmetres d'imatge i variacions químiques al llarg del gradient de degradació en la mostra F1-q.

D'altra banda, la Figura 20 presenta la variació del coeficient de correlació entre l'índex de groc i cada número d'ona de l'espectre FTIR, el qual permet demostrar com a través de la imatge digital es poden reconèixer o predir les regions espectrals que tenen més associació amb aquest paràmetre visual. Per exemple, a la Figura 20 s'observa clarament com l'índex de groc presenta correlacions negatives intenses ($R \approx -0.7$) a la regió de l'estirament O-H ($\sim 3500\text{ cm}^{-1}$), correlacions positives moderades a la zona del carbonil ($\sim 2800\text{--}3000\text{ cm}^{-1}$) i novament 1000 cm^{-1} , especialment a les bandes de l'anell glucosídic. Aquests patrons confirmen que el groc visual es correlaciona sistemàticament amb la pèrdua de grups acetil i l'augment d'hidroxils, validant l'ús de l'anàlisi digital com a indicador indirecte dels canvis químics.

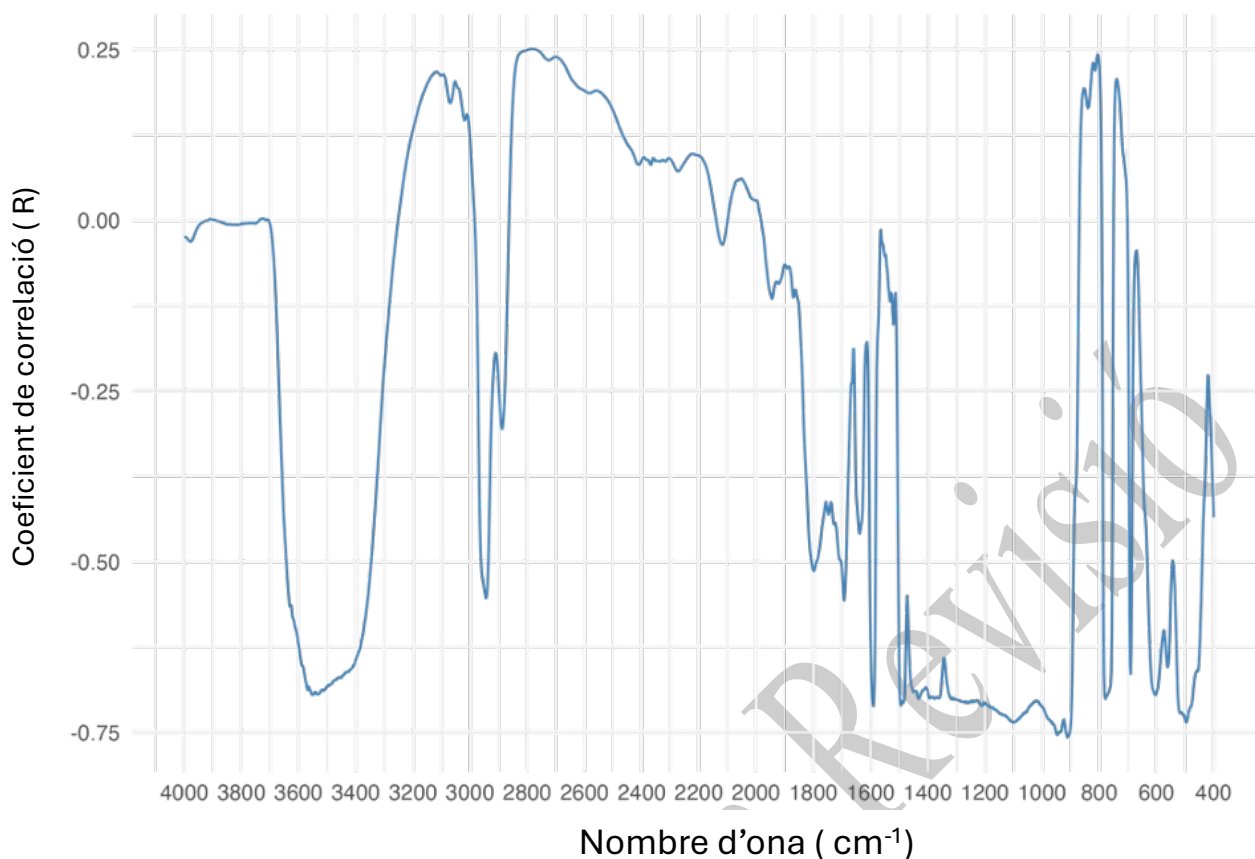


Figura 20. Coeficient de correlació entre l'índex de groc i el número d'ona de l'espectre IR, evidenciant les regions espectrals amb més gran associació als canvis visuals observats a la mostra F1q.

Finalment, encara que es tracta d'un treball exploratori, aquests resultats demostren que és possible fer una anàlisi integral emprant tècniques d'anàlisi d'imatge accessibles, cosa que representa una eina amb alt potencial per implementar-se com a mètode de monitorització rutinari en arxius i centres de conservació. Això no obstant, és important reconèixer les limitacions del present estudi: es va analitzar únicament un plànol d'acetat de cel·lulosa, es desconeix l'estat inicial i la història de conservació del material, i els resultats són específics per a aquest tipus de polímer.

6. CONCLUSIONS

La caracterització de 40 plànols mitjançant espectroscòpia infraroja va permetre establir un protocol efectiu per a la identificació de suports polimèrics en plànols urbanístics. Els resultats obtinguts mitjançant les tècniques ATR i T-FTIR van demostrar ser complementàries: ATR va resultar més adequada per a mostres opaques i multicapa a causa de la seva capacitat d'anàlisi superficial, mentre que T-FTIR es va implementar amb èxit en fragments extremadament fràgils on ATR era inviable.

La identificació va revelar que l'acetat de cel·lulosa (32,5%) i el PET (27,5%) constitueixen els materials predominants en els plànols estudiats, seguits per poliamida (17,5%) i nitrat de cel·lulosa (7,5%). La detecció de sis plànols multicapa (PET/acetat de cel·lulosa) evidencia la complexitat compositiva d'aquests materials arxivístics i la necessitat d'anàlisis específiques per capes.

En la comparació entre proves organolèptiques (Martínez, 2025) i anàlisi instrumental per ATR va demostrar la capacitat de les primeres per a la determinació de suports de PET, tant en suports monocapa com multicapa. Tot i això, es van identificar discrepàncies significatives en la identificació d'altres materials de suport que reflecteixen les diferències fonamentals entre ambdós mètodes, on la tendència va ser identificar com a PET materials que van resultar ser poliamida o nitrats de cel·lulosa mitjançant ATR. Per això, cal realitzar assaigs addicionals per confirmar la veritable composició dels materials inicialment identificats com a monocapa i per descartar possibles solapaments espectrals, com els que es poden presentar entre gelatines i poliamides a l'espectroscòpia FTIR.

L'anàlisi combinada d'espectroscòpia FTIR i caracterització digital d'imatge aplicada a la mostra F1-q d'acetat de cel·lulosa va demostrar ser efectiva per avaluar el gradient de degradació present als materials. Els resultats espectroscòpics van confirmar el mecanisme d'hidròlisi esperat: disminució progressiva de les bandes de carbonil (1740 cm^{-1}) i C–H (2945 cm^{-1}) associades a grups acetil, augment del senyal O–H (3480 cm^{-1}) per exposició d'hidroxils a 0 cm^{-1} que reflecteixen canvis a l'anell glucosídic.

7. AGRAÏMENTS.

Els autors expressen el seu agraïment als conservadors Zoel Forniés i Adela Martínez per la seva valuosa col·laboració, experiència i disposició constant durant el desenvolupament d'aquest estudi. El seu professionalisme i amabilitat van ser fonamentals per a l'avenç i l'enriquiment d'aquesta investigació.

Així mateix, es reconeix la important tasca institucional desenvolupada a l'Arxiu Municipal Contemporani de Barcelona, la Gerència de Serveis Generals, l'Ajuntament de Barcelona, i en particular el suport facilitat per l'equip de conservació preventiva dins la secció de tractament documental.



8. REFERÈNCIES

- Andrady, A. L. (2022) "Oxidation and fragmentation of plastics in a changing environment." Environmental Science & Pollution Research.
- Bruker (2025). "Conceptos básicos de la espectroscopia : Guía sobre microscopía FT-IR". Disponible en : <https://www.bruker.com/es/products-and-solutions/infrared-and-raman/ft-ir-microscopes/what-is-ft-ir-microscopy.html> Consulta: 2025-09-29
- Chércoles Asensio, R., San Andrés Moya, M., De la Roja, J. M., & Gómez, M. (2009). Analytical characterization of polymers used in conservation and restoration by ATR-FTIR spectroscopy. Analytical and bioanalytical chemistry, 395(7), 2081-2096.
- Derrick, M. R., Stulik, D., & Landry, J. M. (2000). Infrared spectroscopy in conservation science. Getty Publications.
- King, R. (2024). Plasticisers in Historic Plastics: Spectroscopic and Chromatographic Approaches for Cellulose Acetate and Polyvinyl Chloride (Doctoral dissertation, UCL (University College London)).
- Krieg, T., Mazzon, C., & Gómez-Sánchez, E. (2021). Material analysis and a visual guide of degradation phenomena in historical synthetic polymers as tools to follow ageing processes in industrial heritage collections. Polymers, 14(1), 121.
- Lu, Q., Zhou, Y., Sui, Q., & Zhou, Y. (2023). Mechanism and characterization of microplastic aging process: A review. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 17(8), 100.
- Lucas, N., Bienaime, C., Belloy, C., Queneudec, M., Silvestre, F., & Nava-Saucedo, J. E. (2008). Polymer biodegradation: Mechanisms and estimation techniques—A review. Chemosphere, 73(4), 429-442.
- Marques, C., Correia, E., Dinis, L. T., & Vilela, A. (2022). An overview of sensory characterization techniques: From classical descriptive analysis to the emergence of novel profiling methods. Foods, 11(3), 255.
- Martínez, A. Forniés, Z. (2025) "Informe relatiu a la revisió del conjunt documental planimètric conservat als dipòsits de l'arxiu intermedi, amb identificació dels plànols amb suport sintètic i avaluació del seu estat de conservació mitjançant metodologia organolèptica". Ref. J120. Conservació de bens. Gerència de Recursos, Arxiu Municipal Contemporani de Barcelona.
- Prati, S. I. L. V. I. A., Sciutto, G. I. O. R. G. I. A., Bonacini, I. R. E. N. E., & Mazzeo, R. O. C. C. O. (2016). New frontiers in application of FTIR microscopy for characterization of cultural heritage materials. Analytical Chemistry for Cultural Heritage, 129-160.
- Shashoua, Y. (2012). Conservation of plastics. Routledge. DOI: <https://doi.org/10.4324/9780080878782>
- Urbanová, P., Kučíková, K., Klempová, S., Tiño, R., Gabčová, V., & Vizárová, K. (2024) preservation of plastic cultural heritage. A review. International Journal of Conservation Science, 15(2), 893-922.

ANNEX 1: PROVES ORGANOLÈPTIQUES

1. Olor en escalfar

Les mostres es van escalfar per fricció amb un drap de cotó net o mitjançant exposició a aigua calenta (50–60 °C). L'olor característica va permetre una primera aproximació al tipus de polímer:

- Poli(tereftalat d'etilè): aroma de cera, espelmes o parafina.
- Acetat de cel·lulosa: olor de vinagre o paper cremat.
- Policlorur de vinil plastificat: aroma similar a seients de cotxe nous.

2. Prova de la flama

Es va utilitzar un encenedor Bunsen per cremar petites mostres (aprox. 2 × 4 cm) i es van registrar les següents característiques:

- Capacitat de combustió (continua o autoextingible).
- Olor del fum.
- Velocitat de combustió.
- pH del vapor, mesurat amb tira de pH exposada al vapor.
- Observacions addicionals com a color i tipus de fum.

Tipus de plàstic	Combustió	Olor fum	Velocitat	pH vapor	Altres
Poli(tereftalato d'etilè)	Continua	Cautxú cremat	Ràpida	4.0	Fum negre amb sutge
Acetat de cel·lulosa	Continua	Vinagre	Lenta	2.5	Fum negre amb sutge
Policlorur de vinil	Autoextingible	Acre	Lenta	1–2	Fum blanc

3. Prova de Beilstein

Es va escalfar un fil de coure net amb l'encenedor Bunsen, es va introduir al plàstic fins fondre's, i es va tornar a escalfar el fil. L'aparició de flama verda va confirmar la presència de clor, característica del policlorur de vinil.

4. Prova de solubilitat

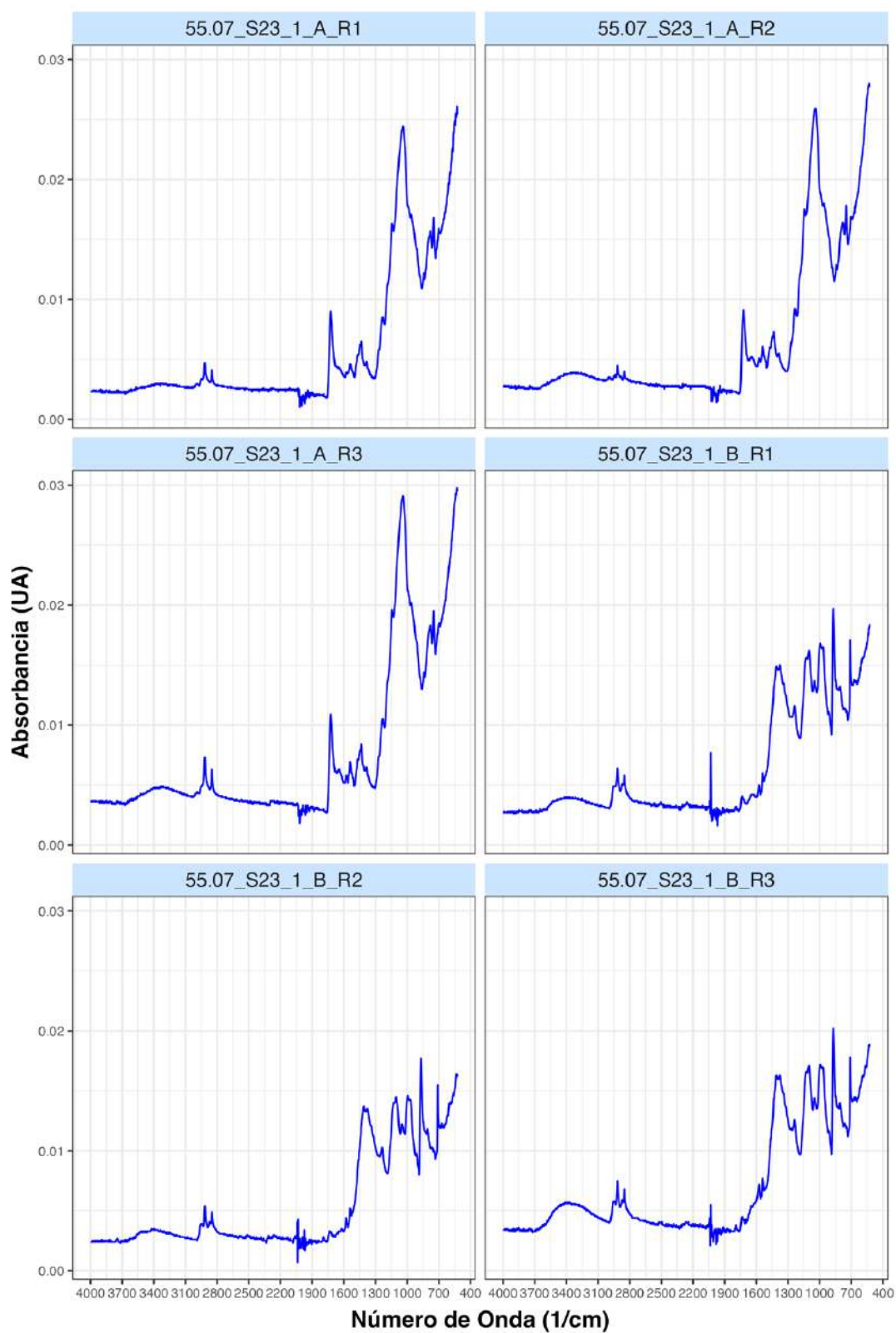
Es va deixar una petita mostra en contacte amb dissolvents específics durant 24 hores a temperatura ambient, observant canvis de textura, color i dimensions que van indicar interaccions materials-dissolvent:

Tipus de plàstic	Solvent	Observacions
Poli(tereftalato de etileno)	Toluè, Xilè	-
Acetat de cel·lulosa	Acetona	Alcohol isopropílic o metanol pot inflar
Policlorur de vinil	Dimetilformamida (DMF)	L'aigua pot inflar el PVC

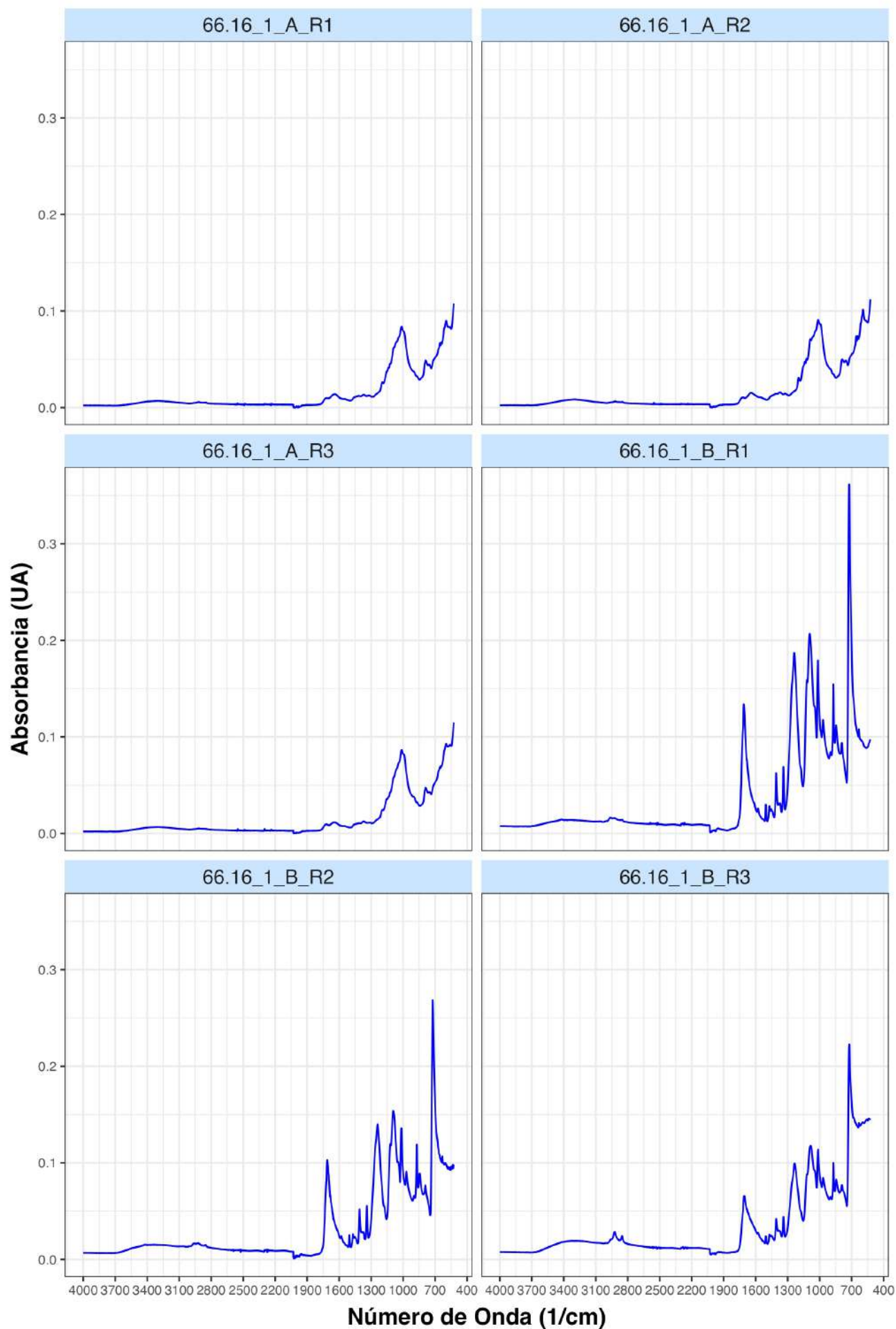


ANEXO 1: ESPECTROS INFRARROJO OBTENIDOS

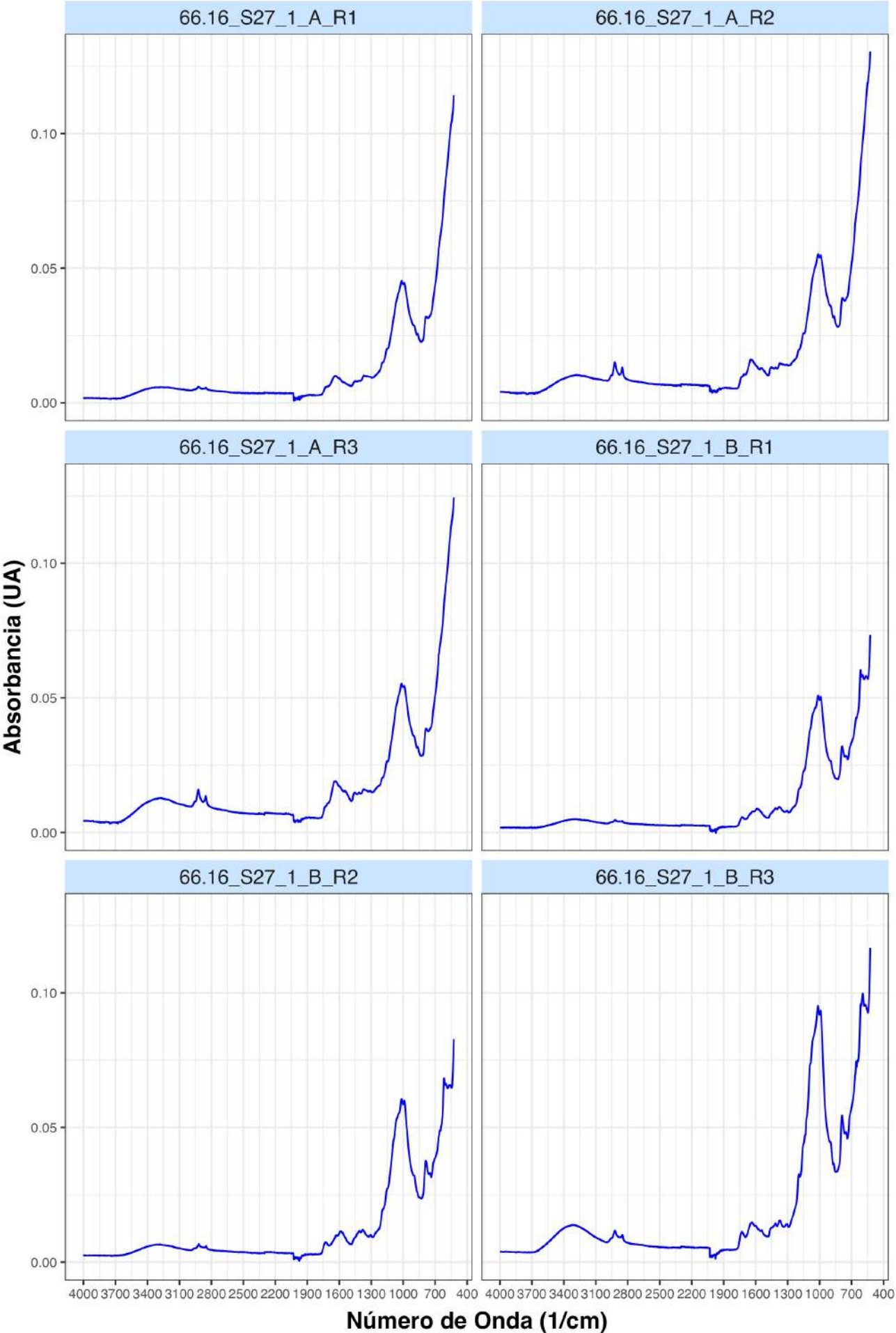
Espectros para Plano 55.07_S23 - Parte 1 de 1



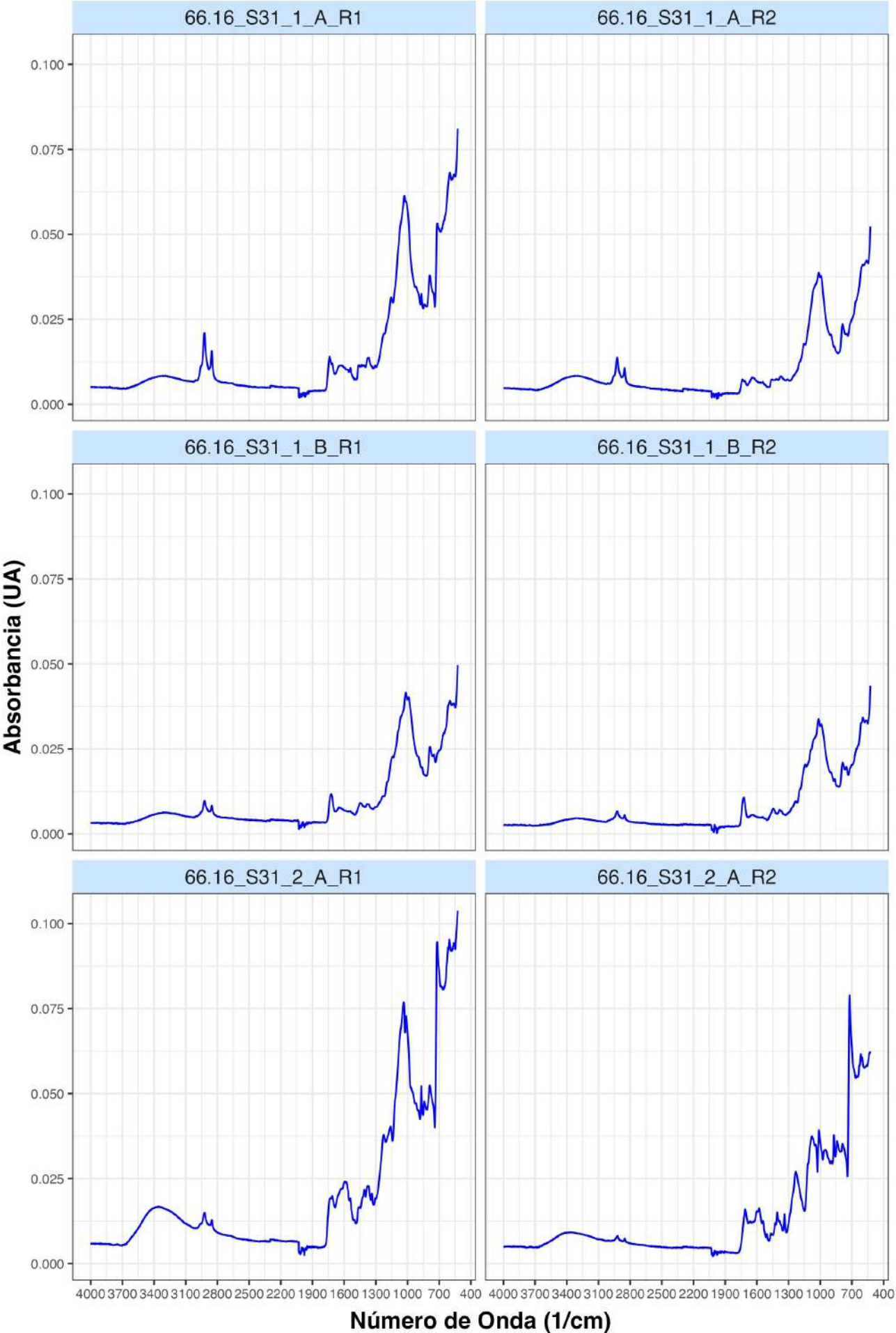
Espectros para Plano 66.16 - Parte 1 de 1



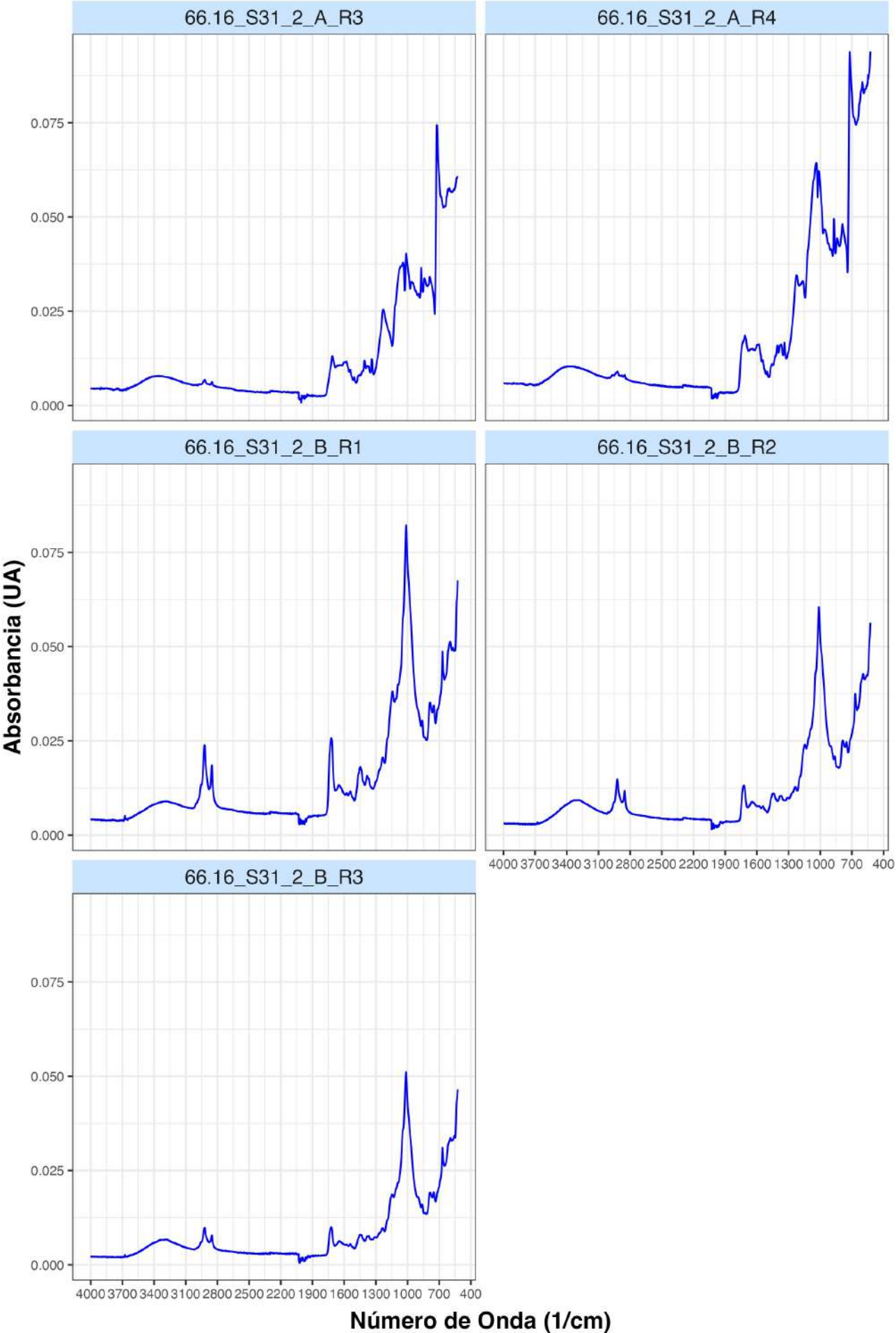
Espectros para Plano 66.16_S27 - Parte 1 de 1



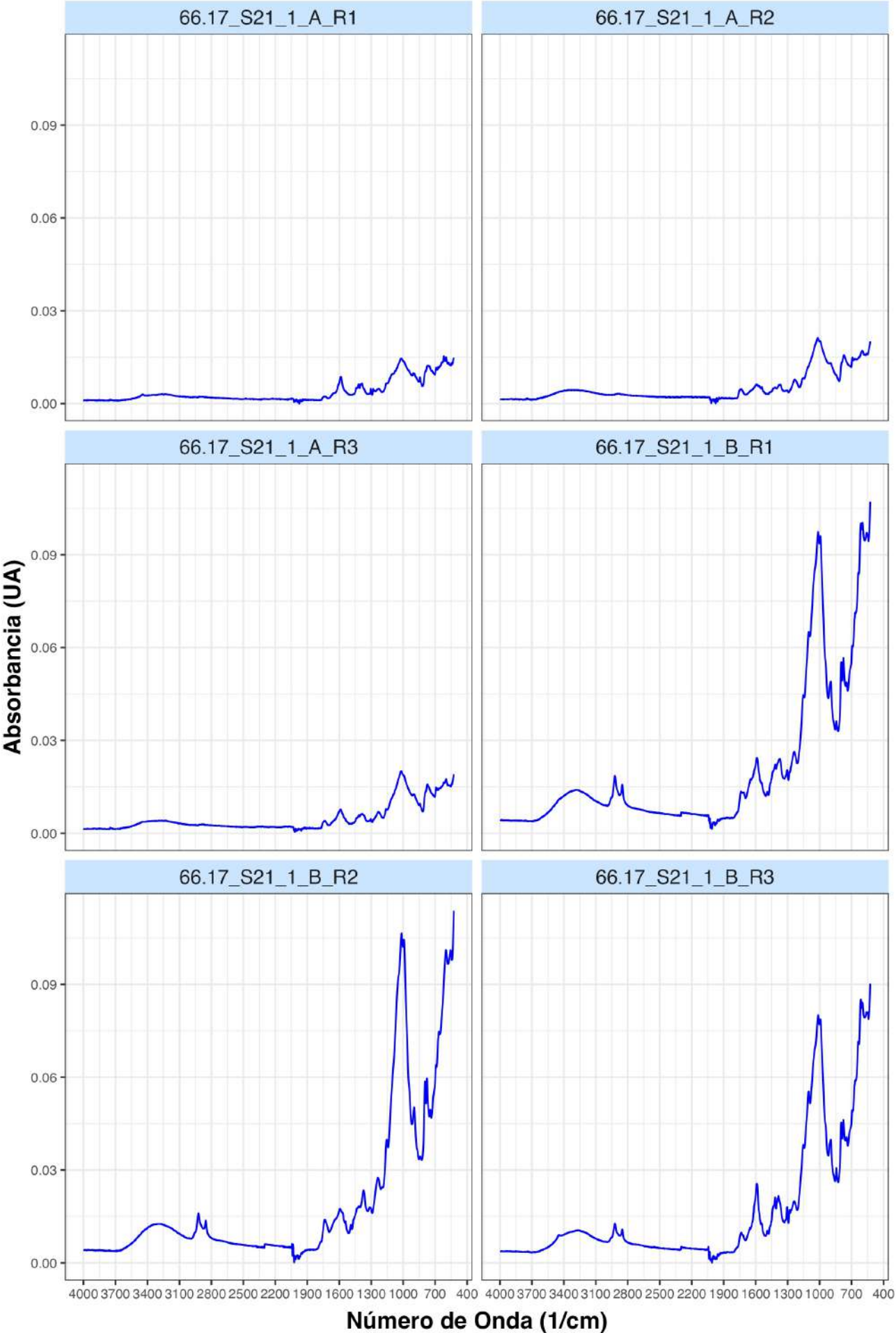
Espectros para Plano 66.16_S31 - Parte 1 de 2



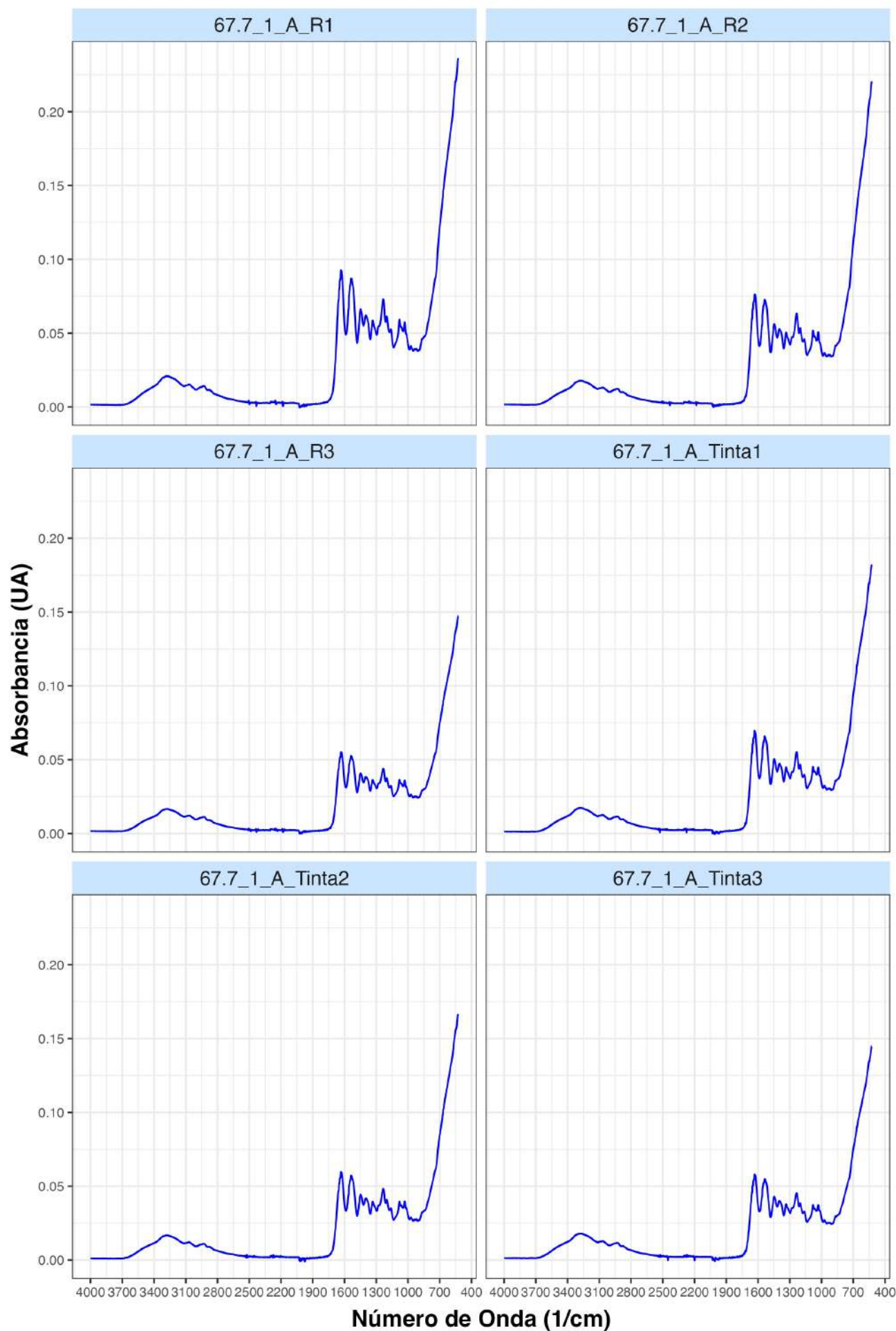
Espectros para Plano 66.16_S31 - Parte 2 de 2



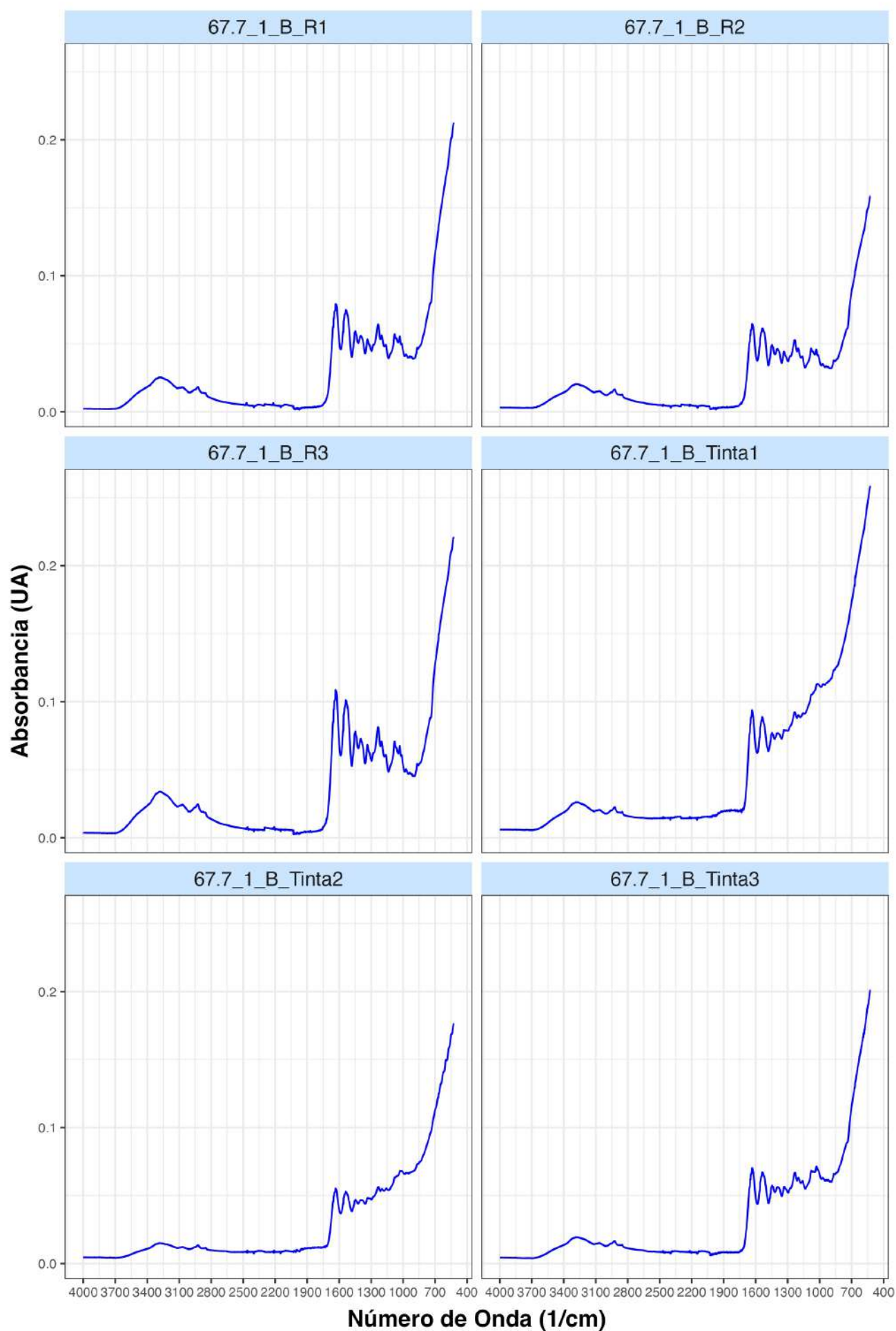
Espectros para Plano 66.17_S21 - Parte 1 de 1



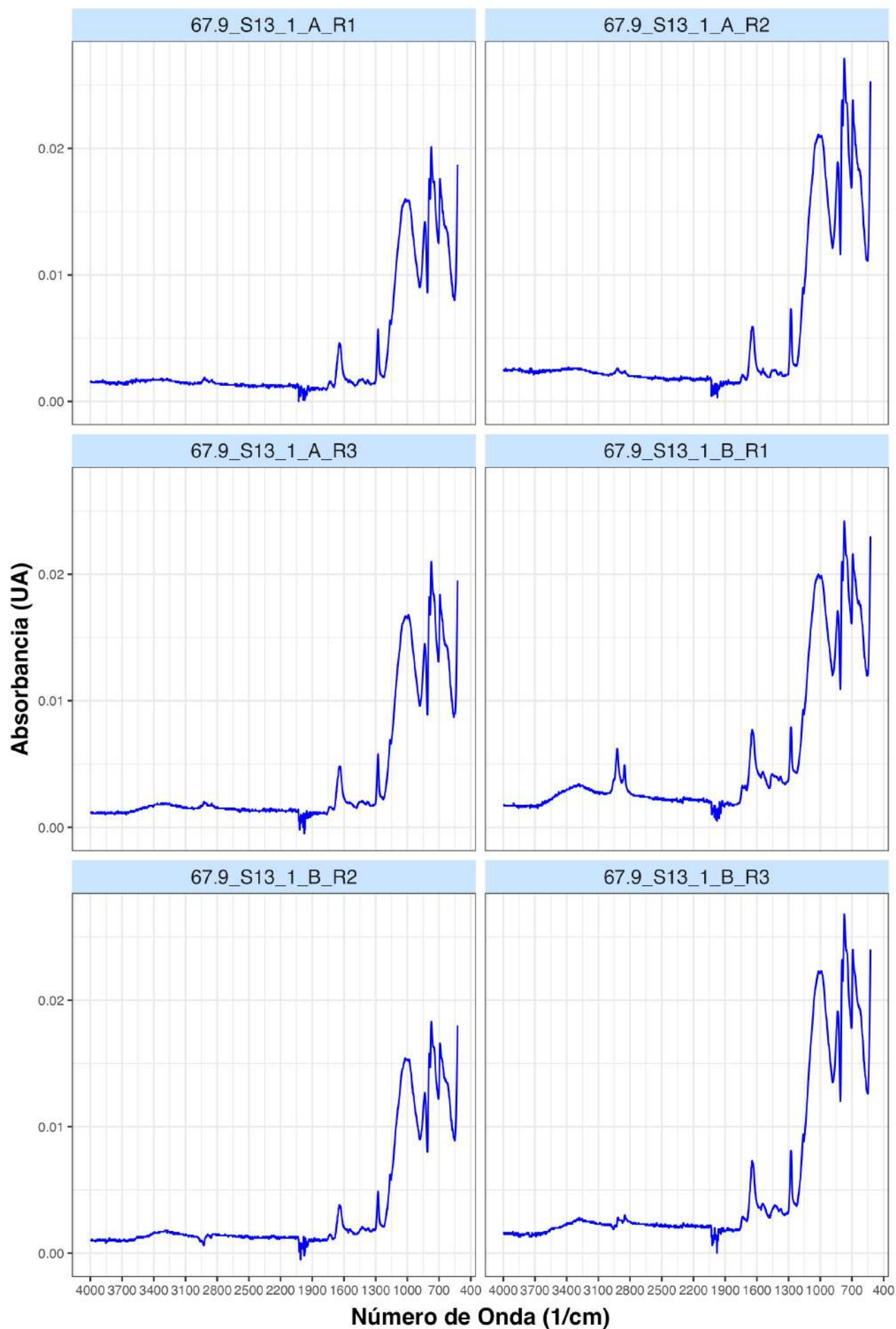
Espectros para Plano 67.7 - Parte 1 de 2



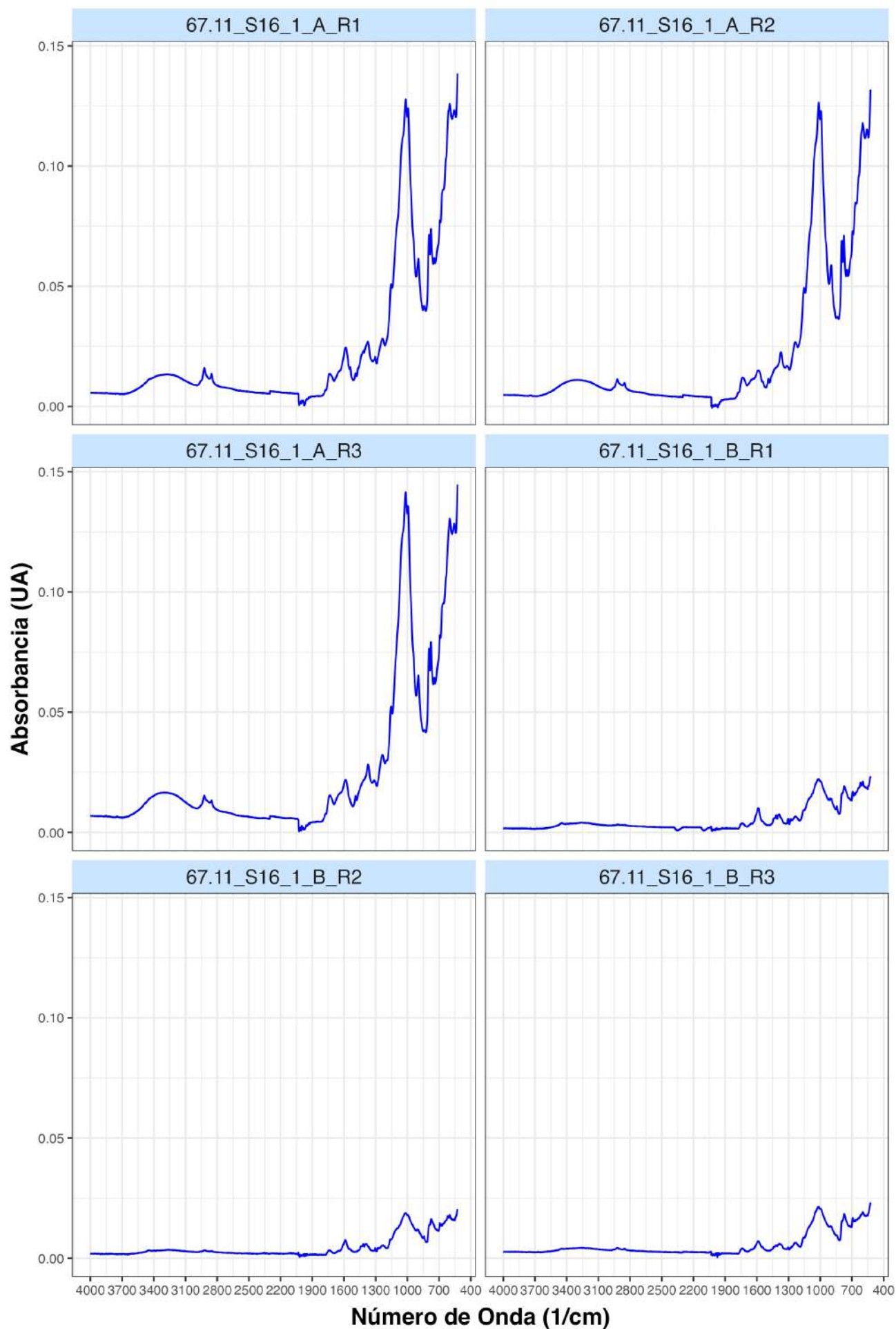
Espectros para Plano 67.7 - Parte 2 de 2



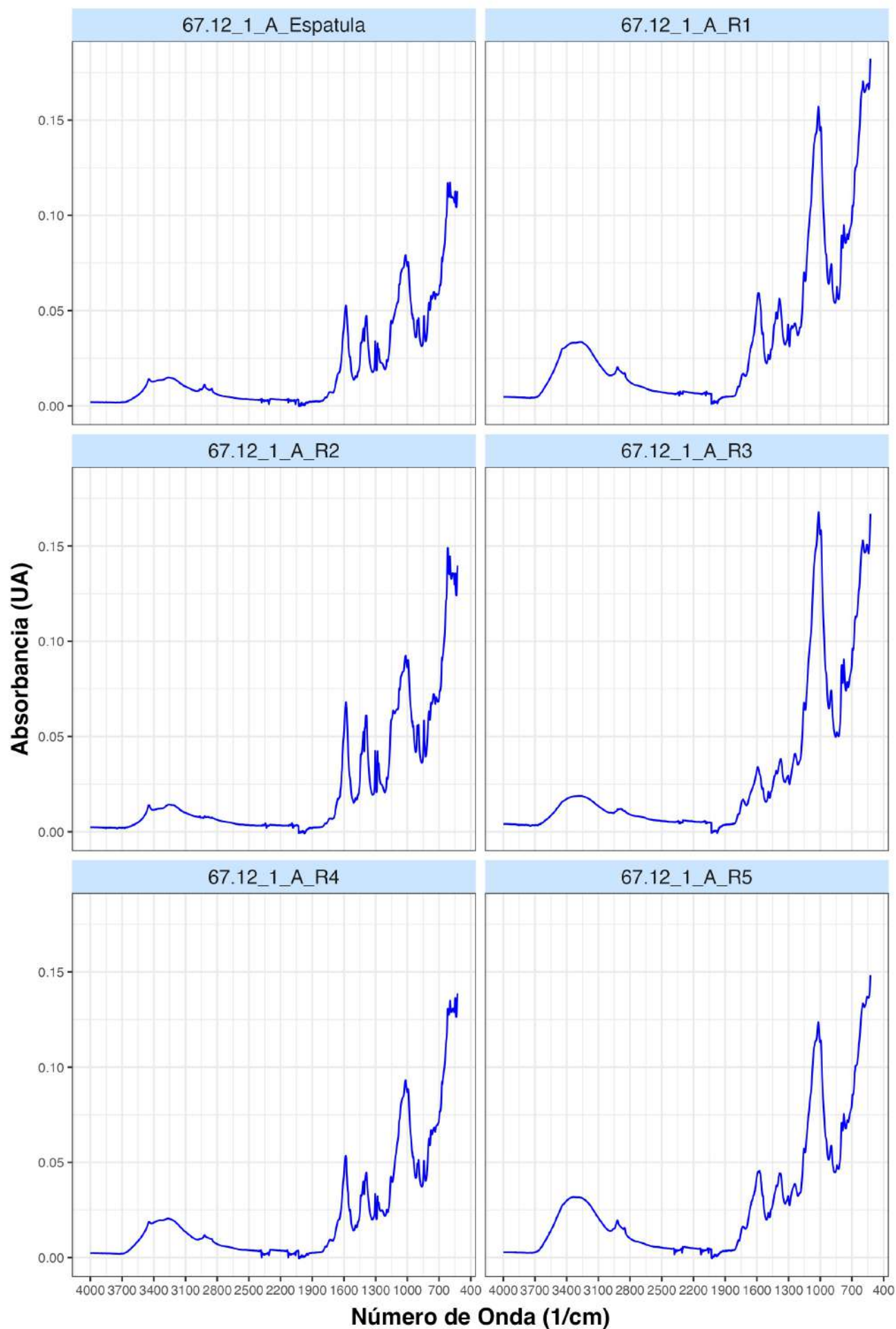
Espectros para Plano 67.9_S13 - Parte 1 de 1



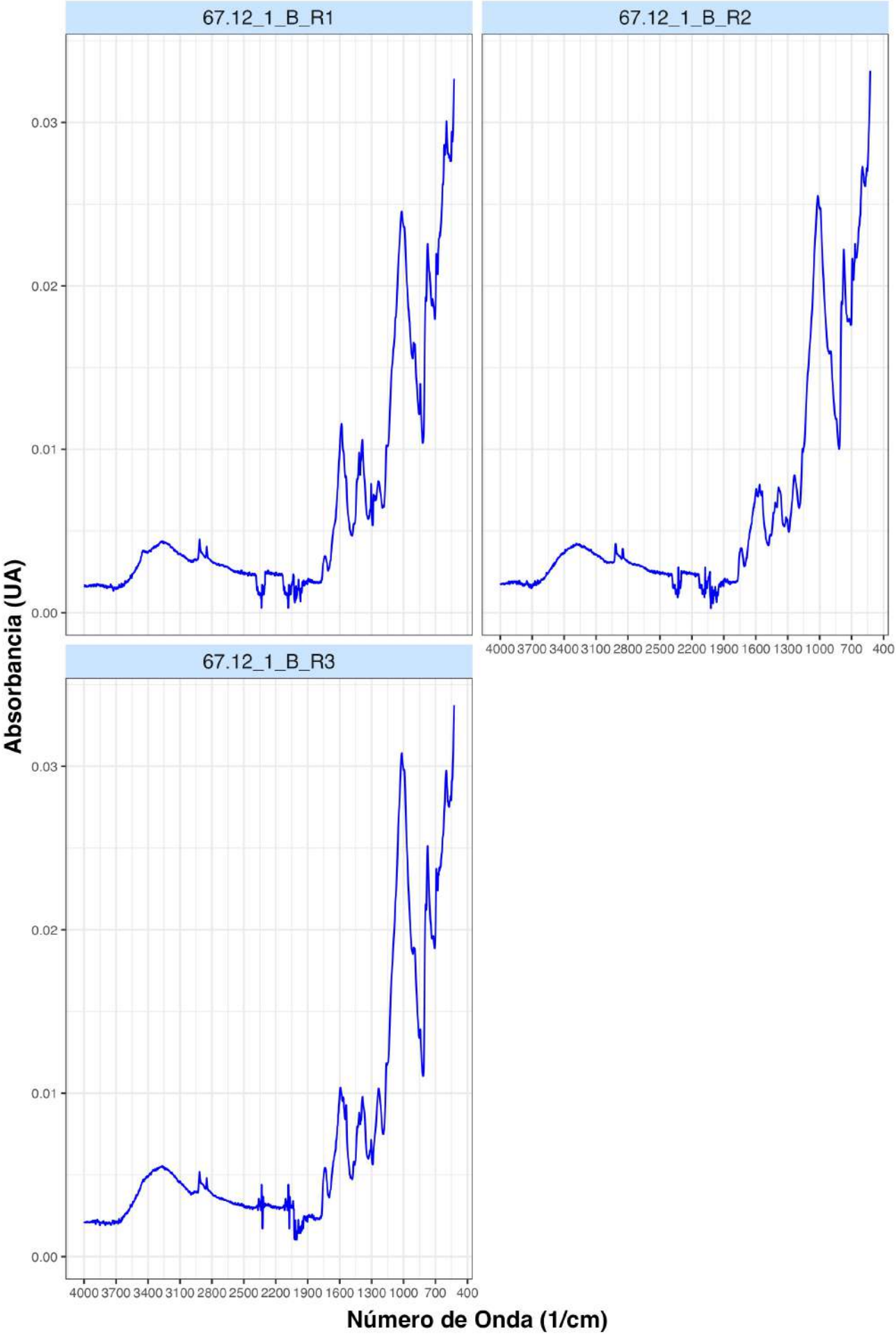
Espectros para Plano 67.11_S16 - Parte 1 de 1



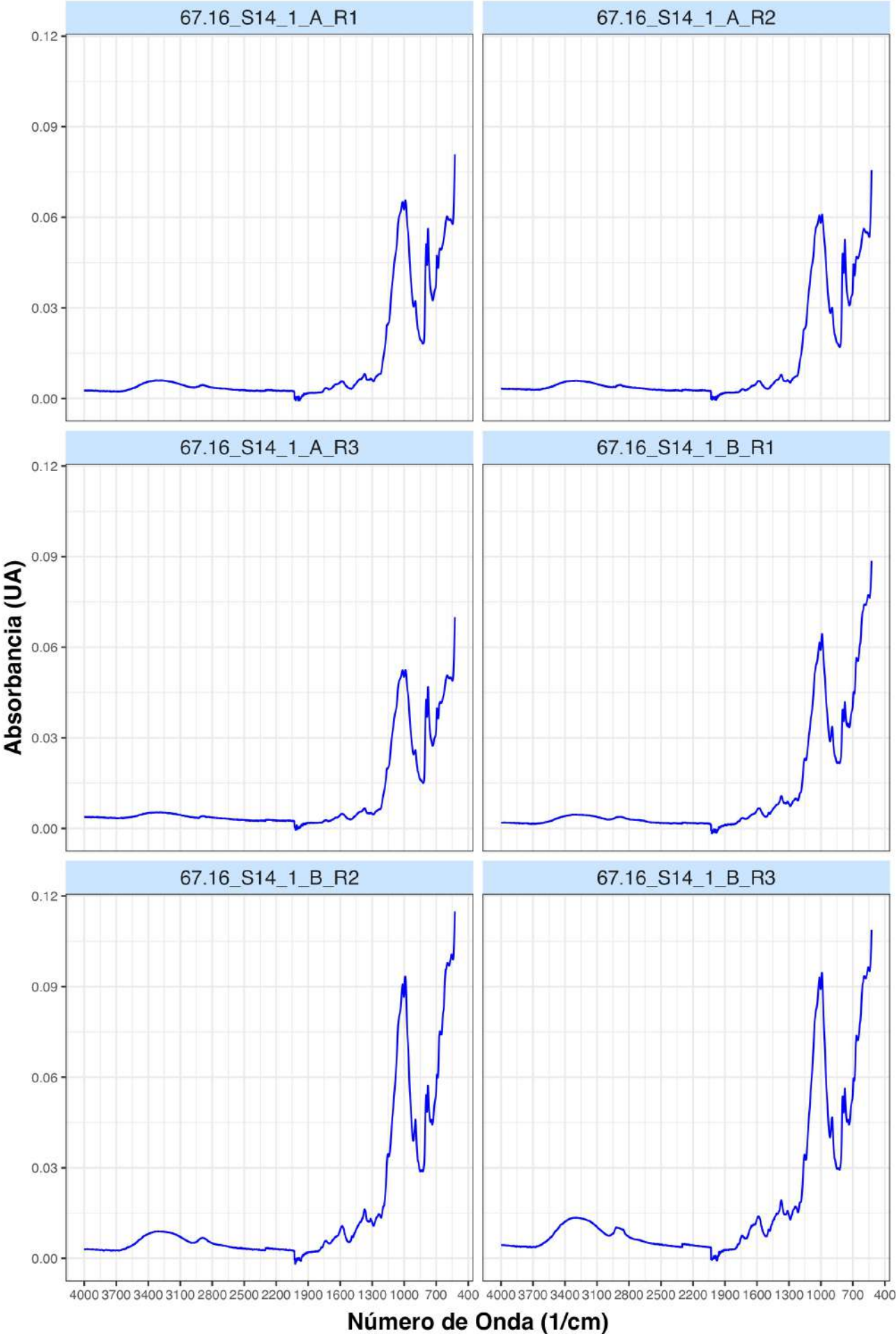
Espectros para Plano 67.12 - Parte 1 de 2



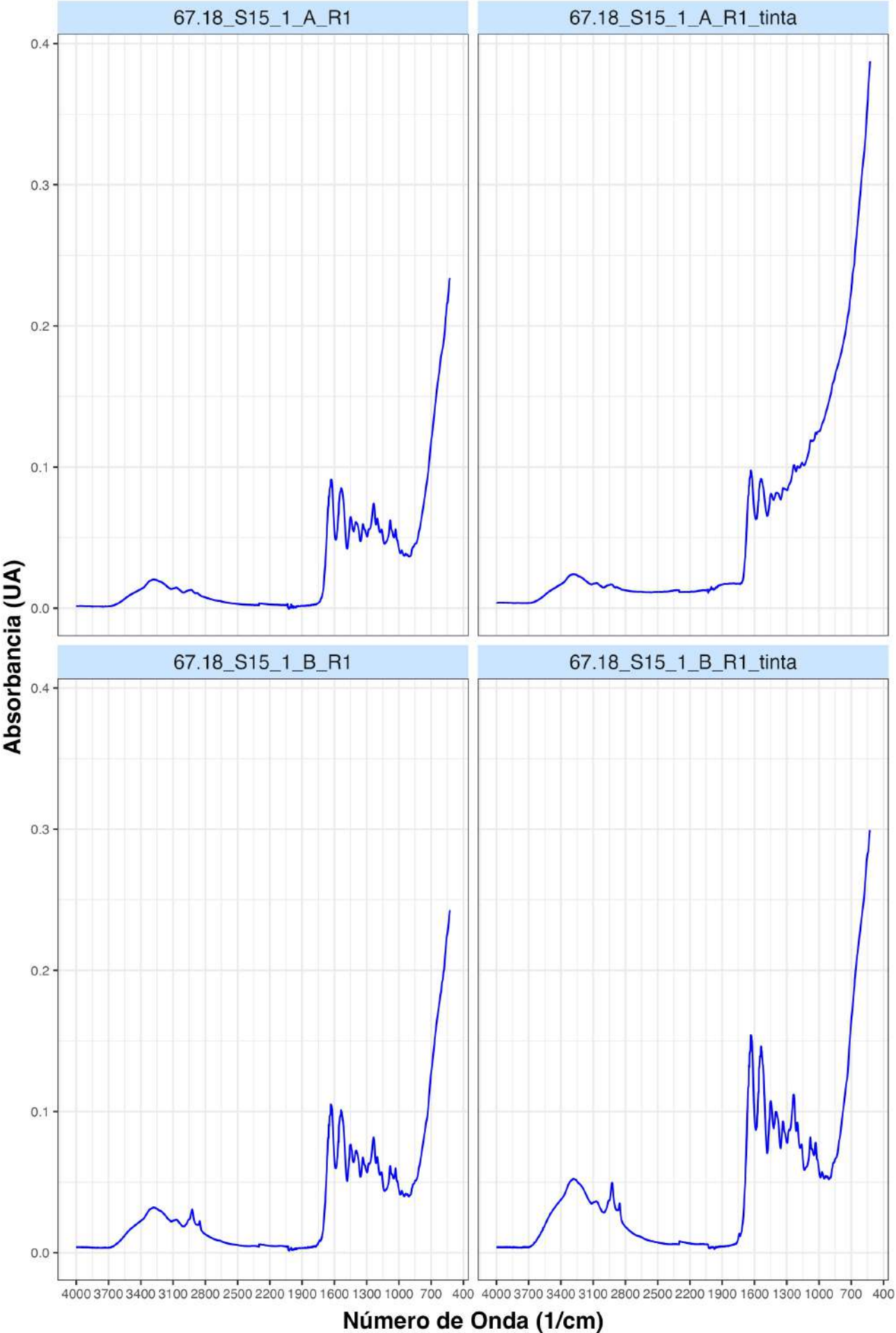
Espectros para Plano 67.12 - Parte 2 de 2



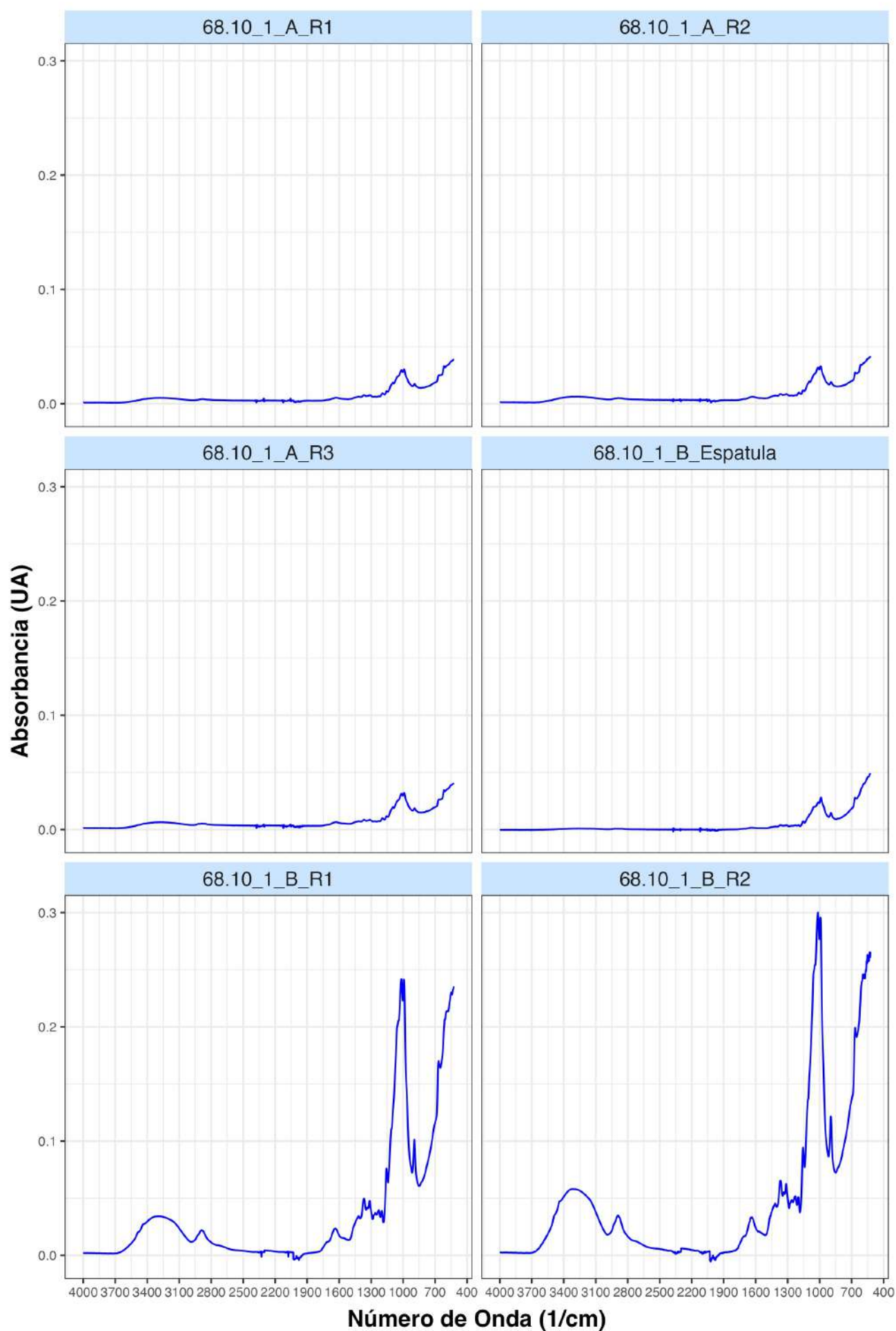
Espectros para Plano 67.16_S14 - Parte 1 de 1



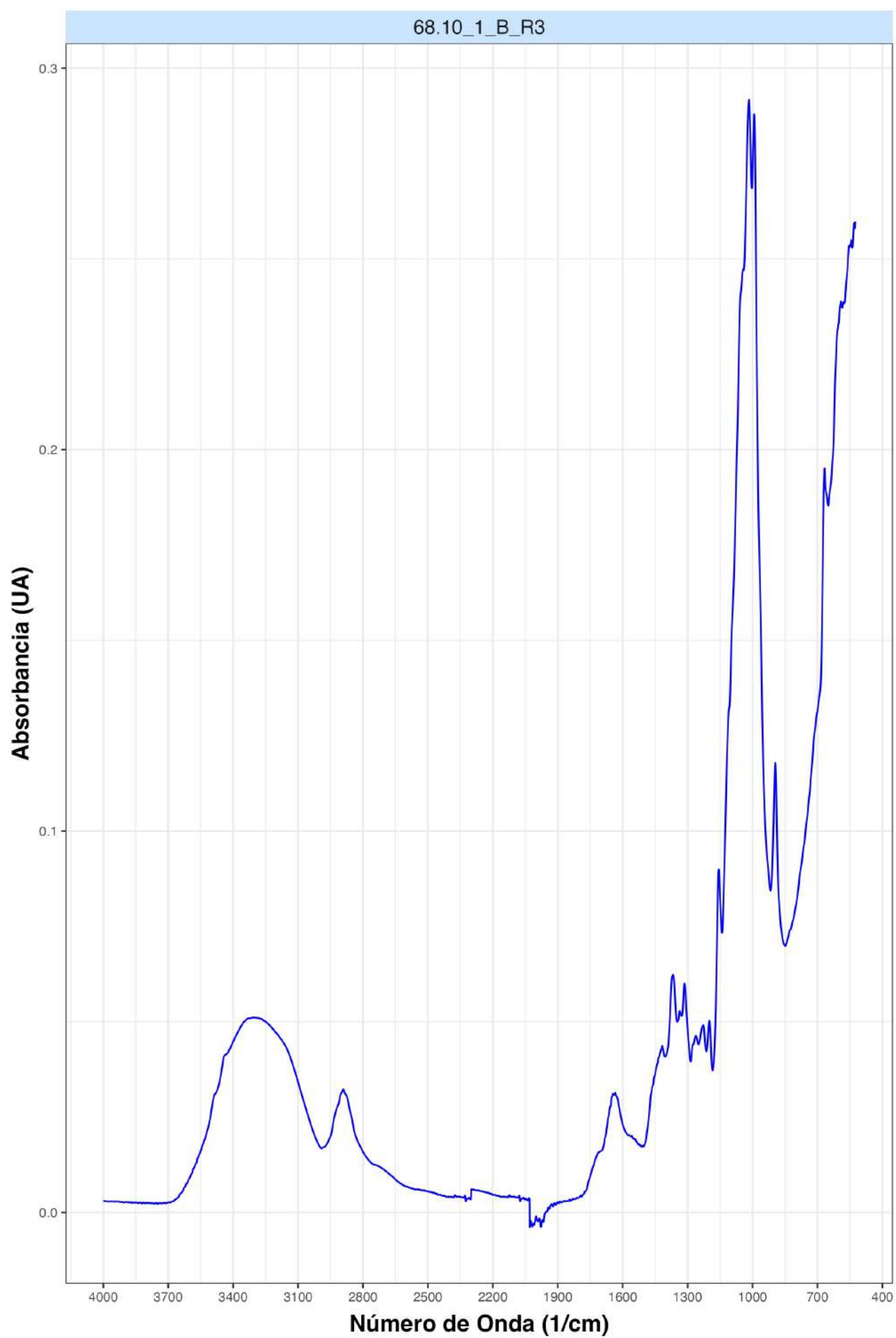
Espectros para Plano 67.18_S15 - Parte 1 de 1



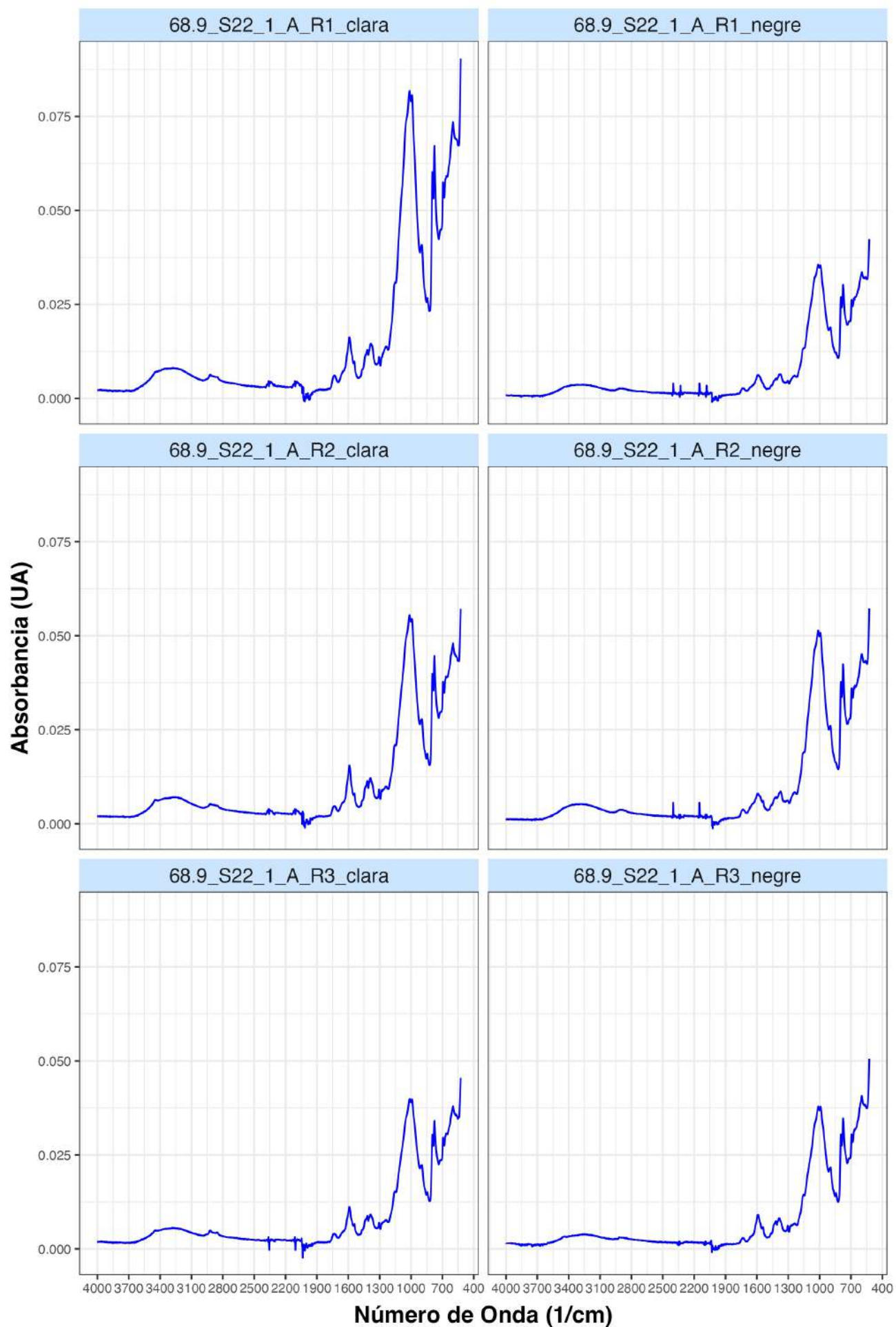
Espectros para Plano 68.1 - Parte 1 de 2



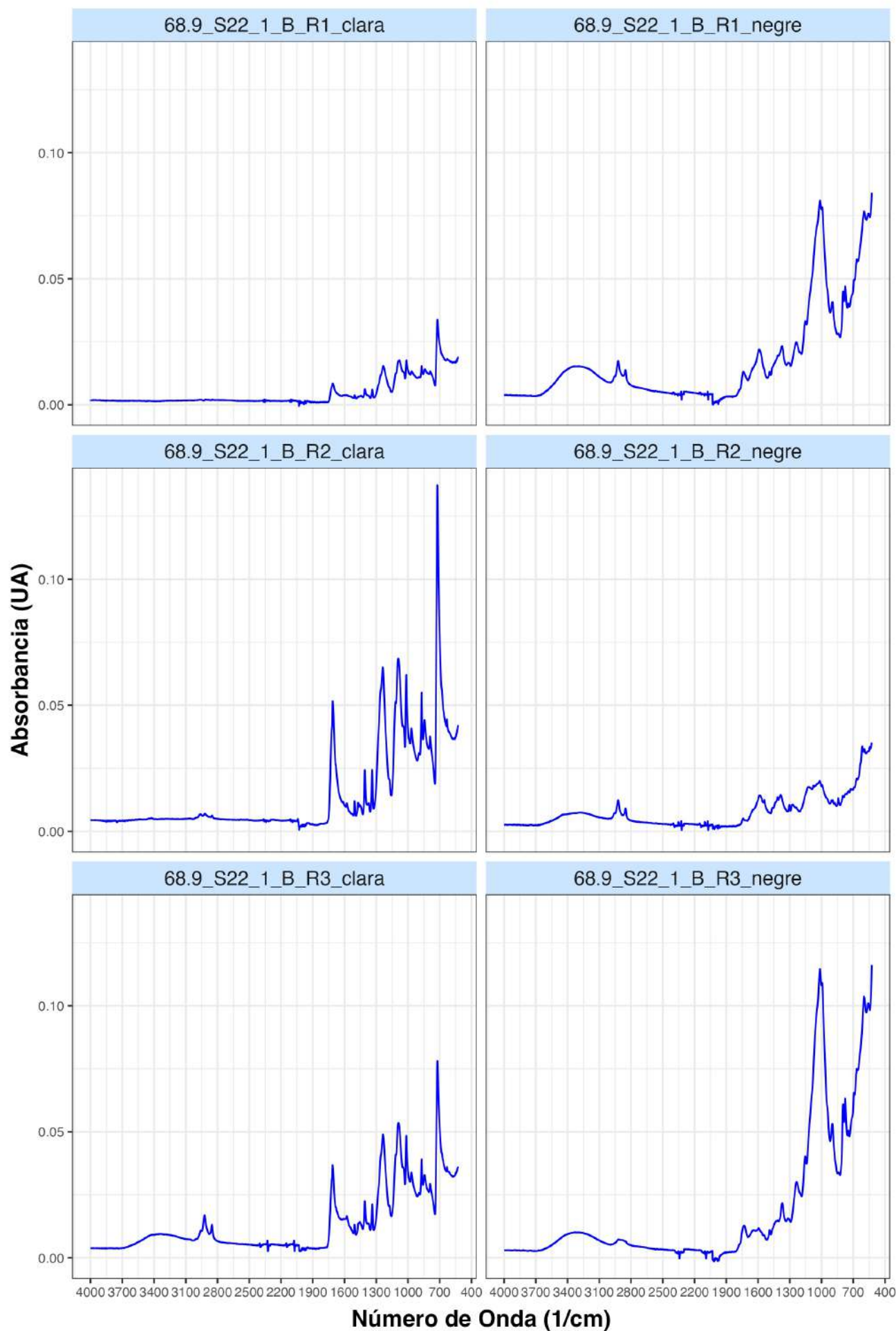
Espectros para Plano 68.1 - Parte 2 de 2



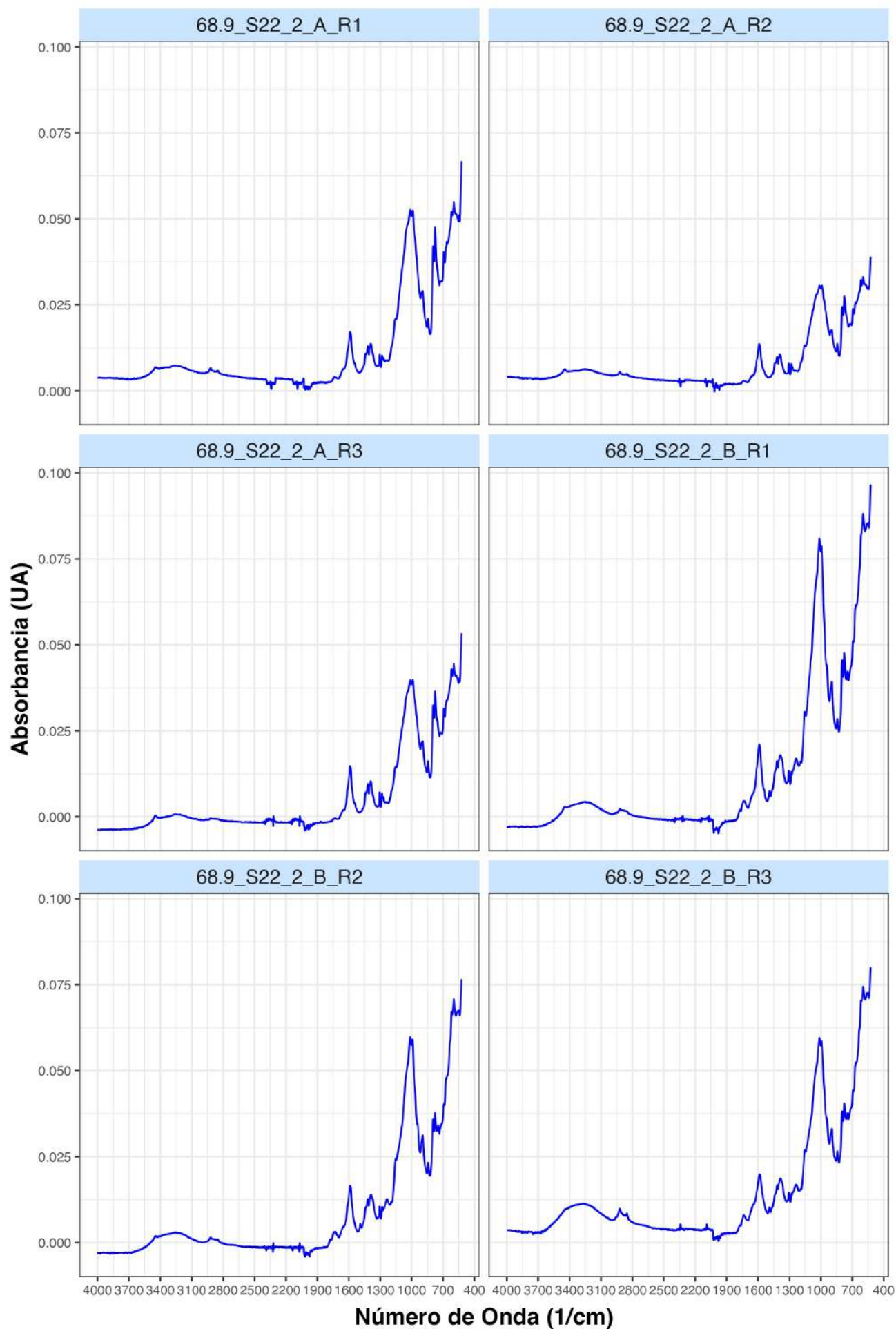
Espectros para Plano 68.9_S22 - Parte 1 de 3



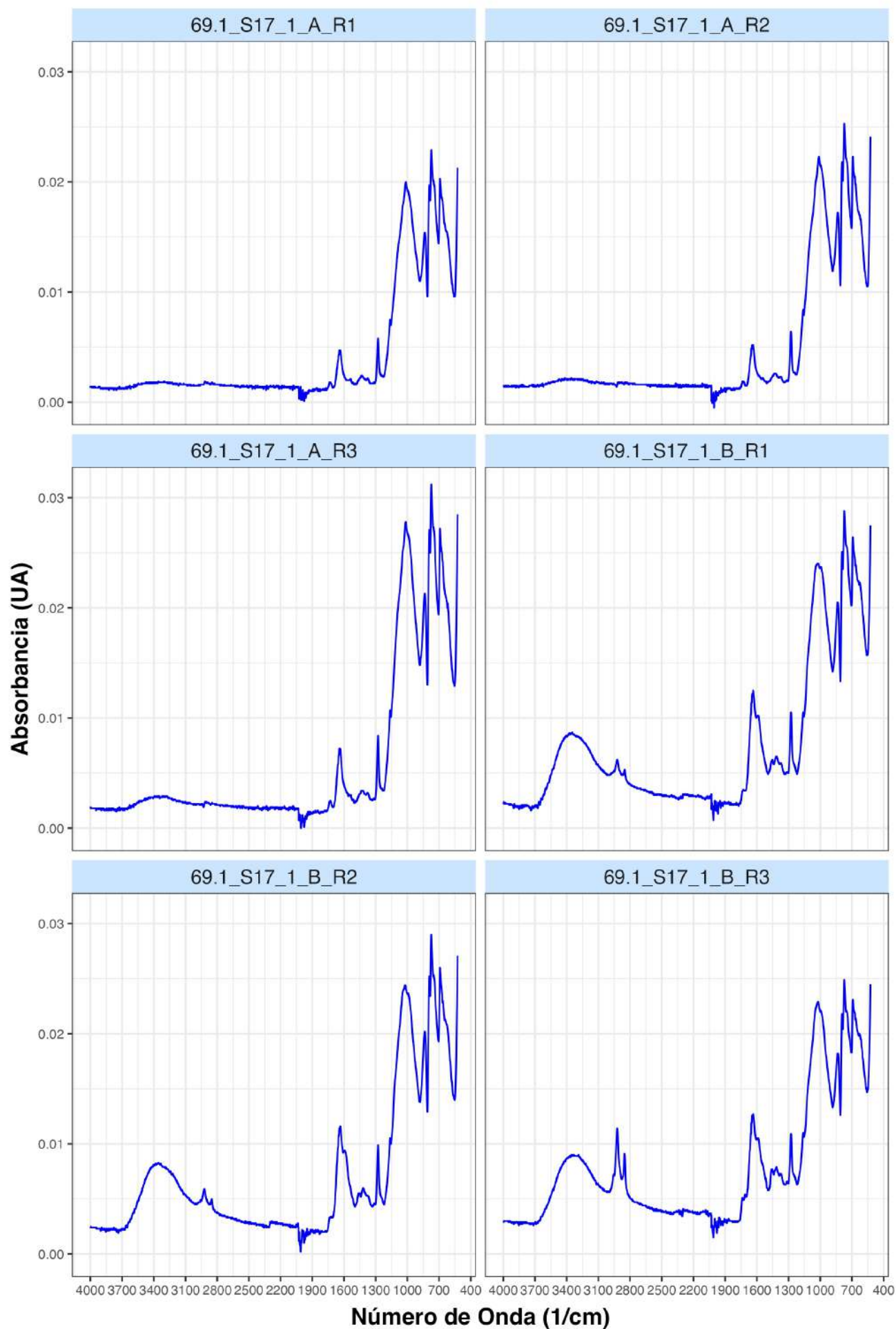
Espectros para Plano 68.9_S22 - Parte 2 de 3



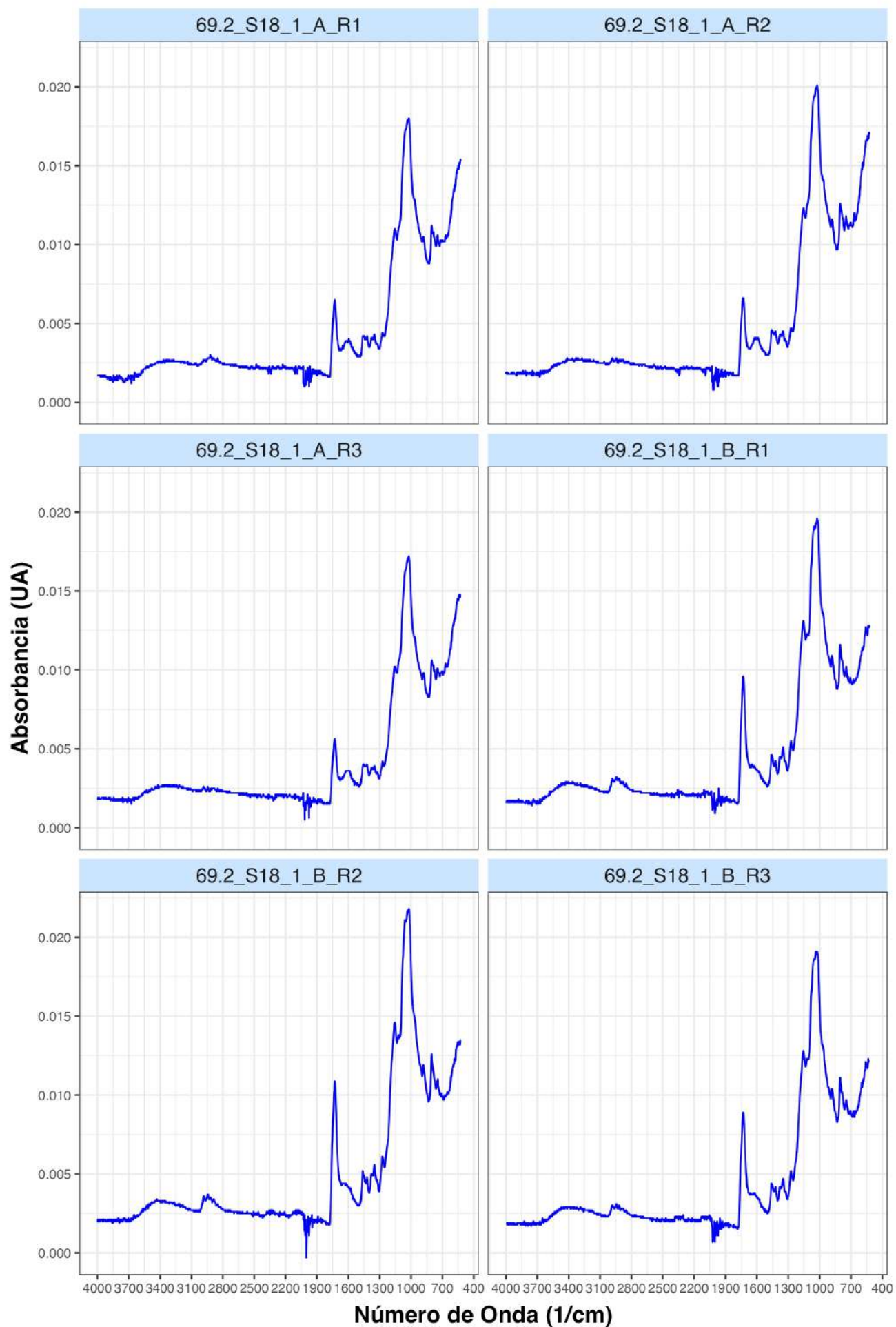
Espectros para Plano 68.9_S22 - Parte 3 de 3



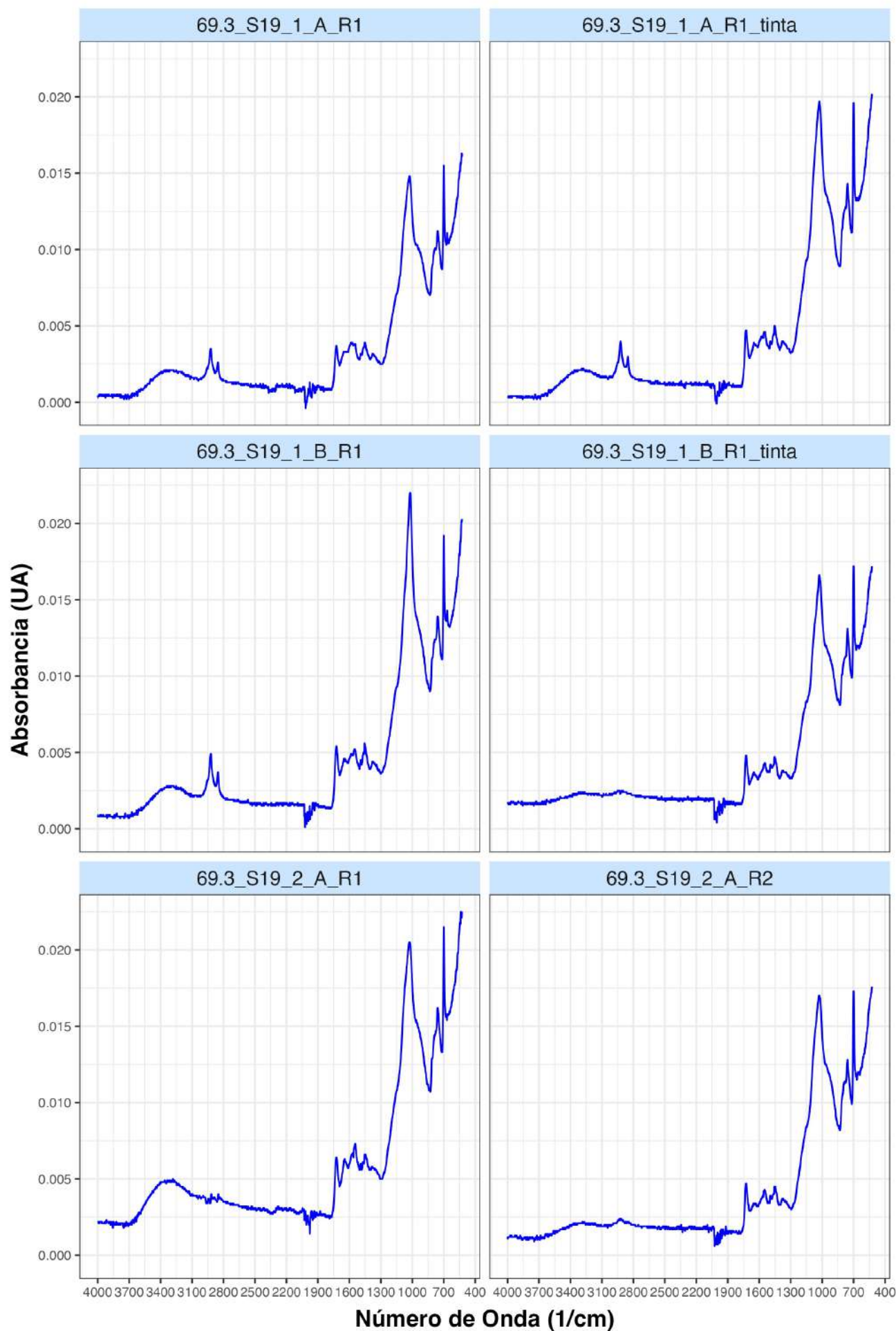
Espectros para Plano 69.1 - Parte 1 de 1



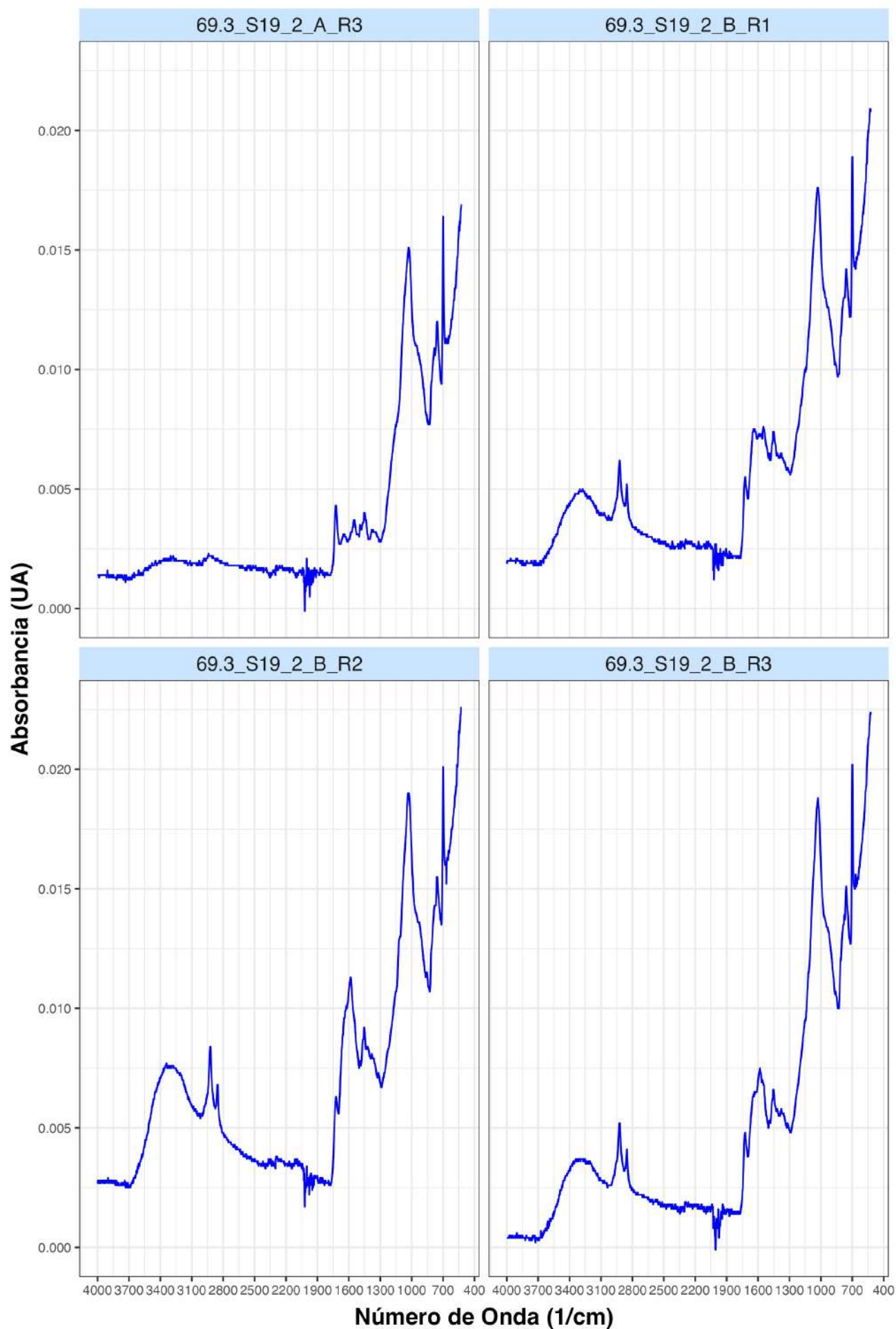
Espectros para Plano 69.2 - Parte 1 de 1



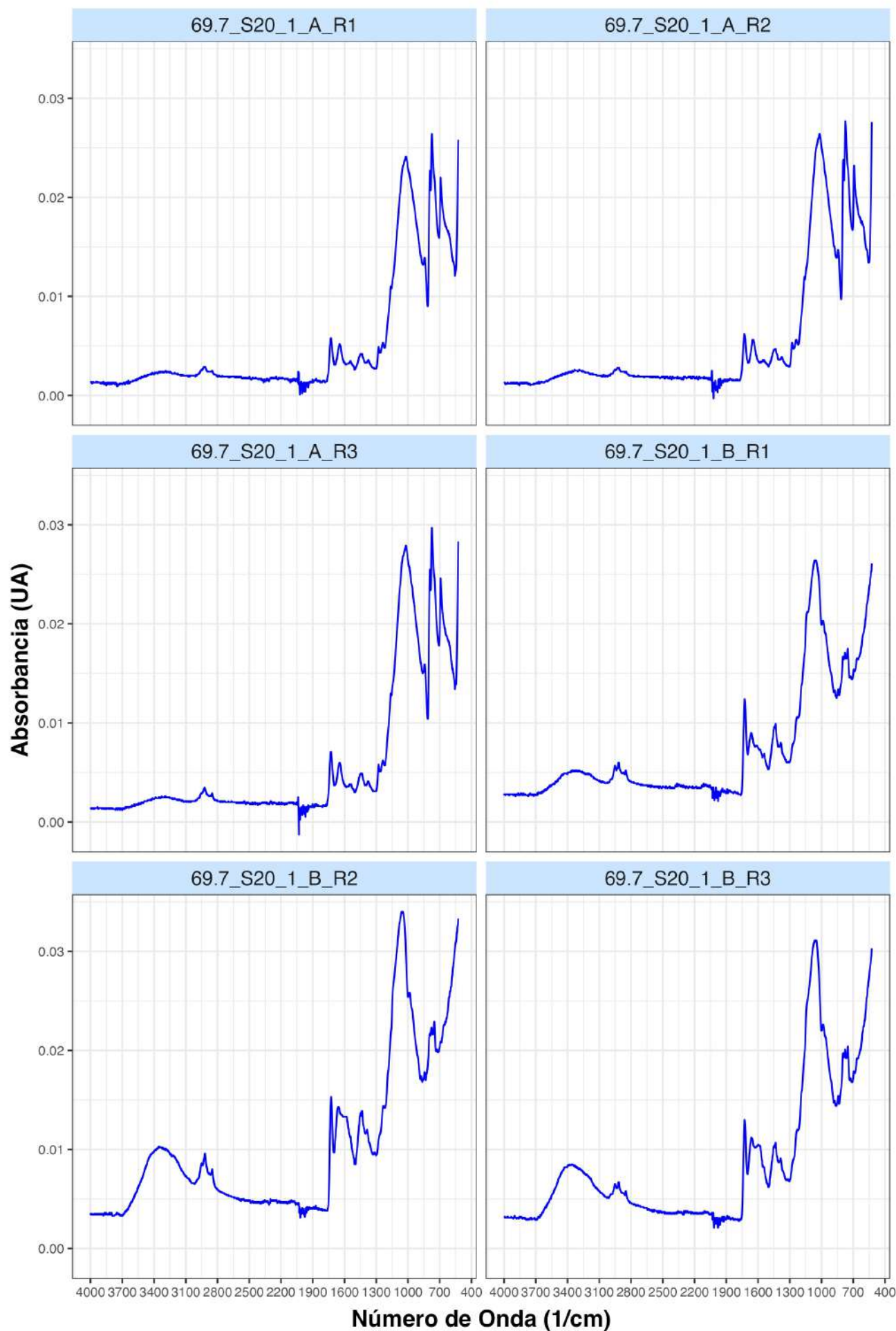
Espectros para Plano 69.3_S19 - Parte 1 de 2



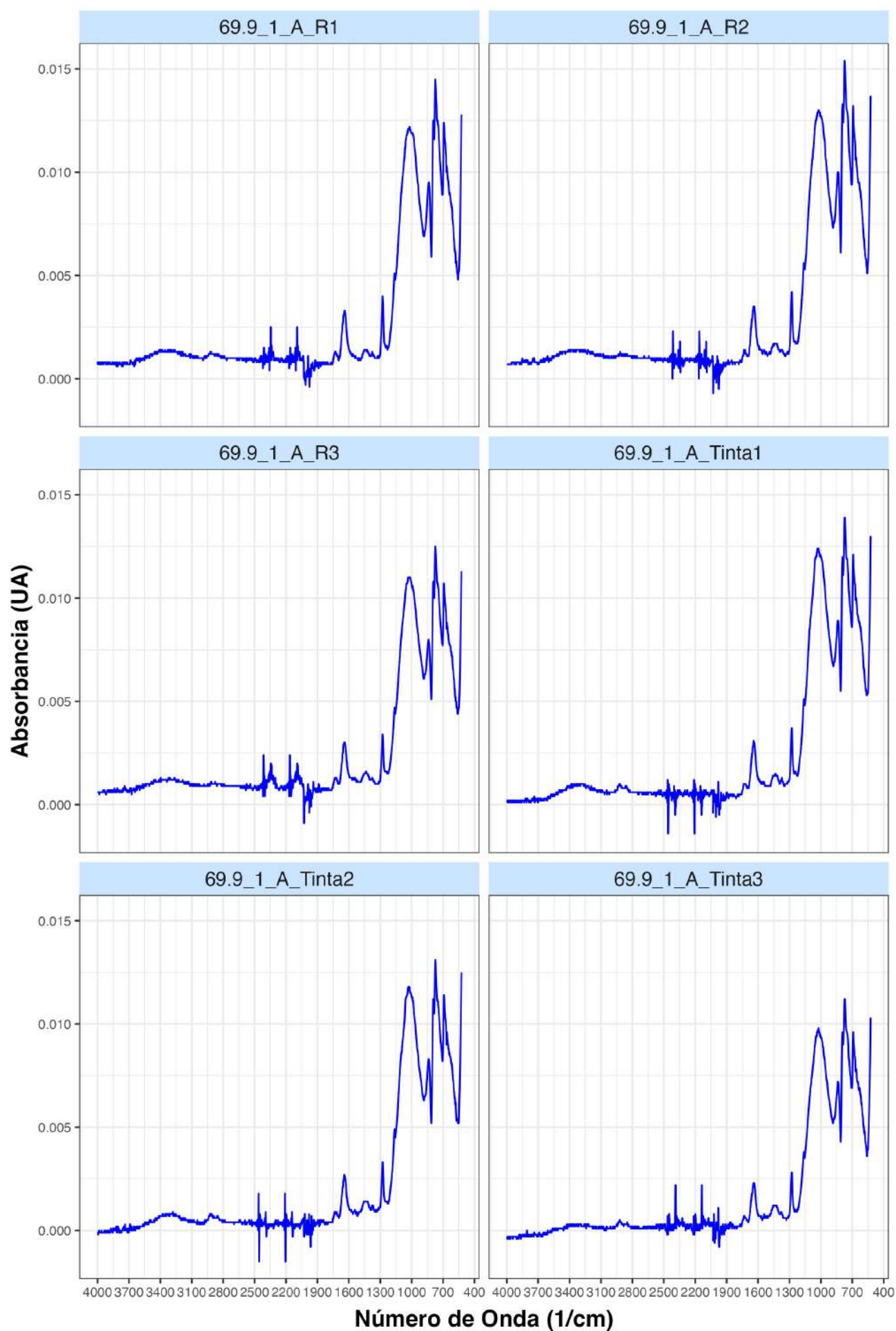
Espectros para Plano 69.3_S19 - Parte 2 de 2



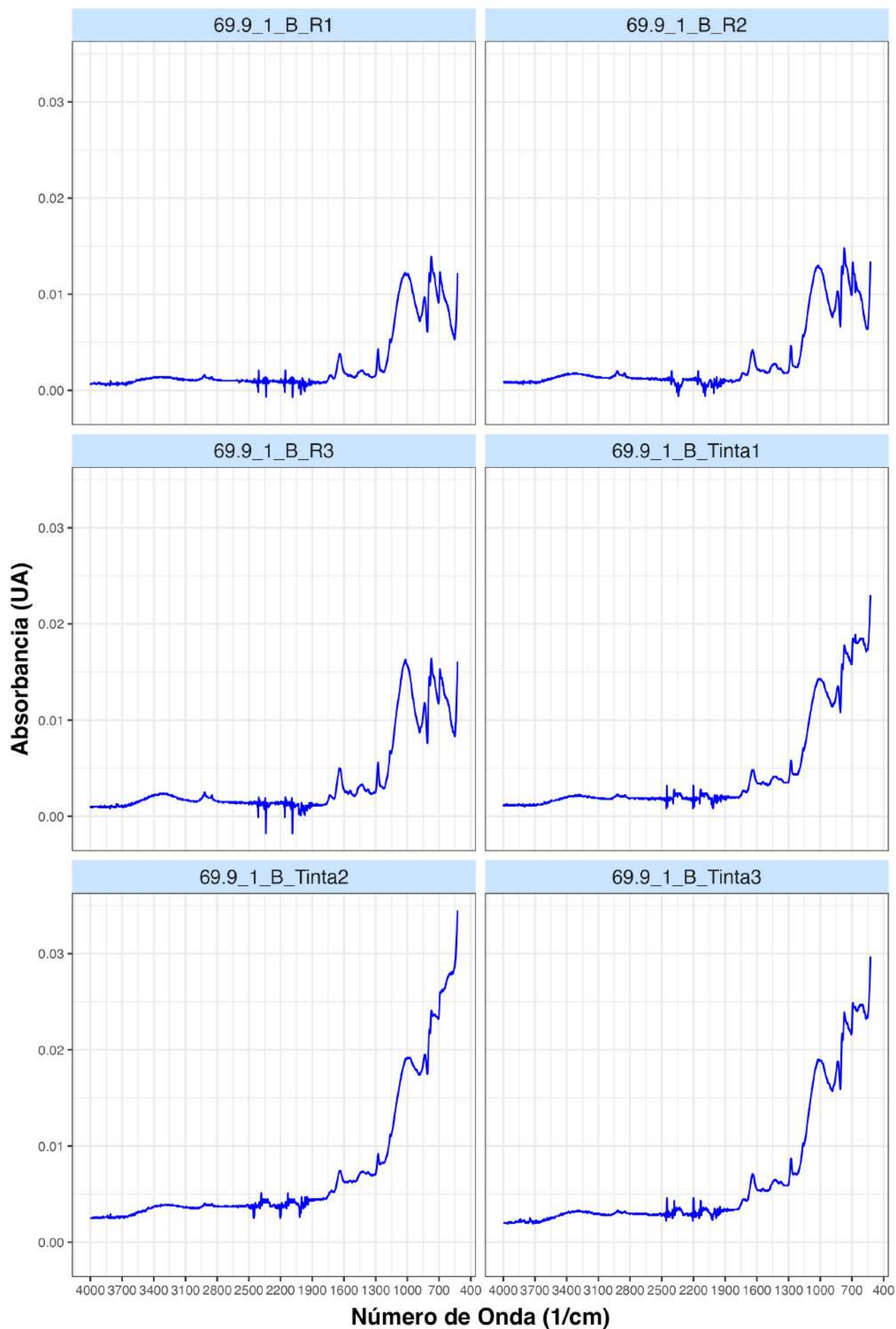
Espectros para Plano 69.7_S20 - Parte 1 de 1



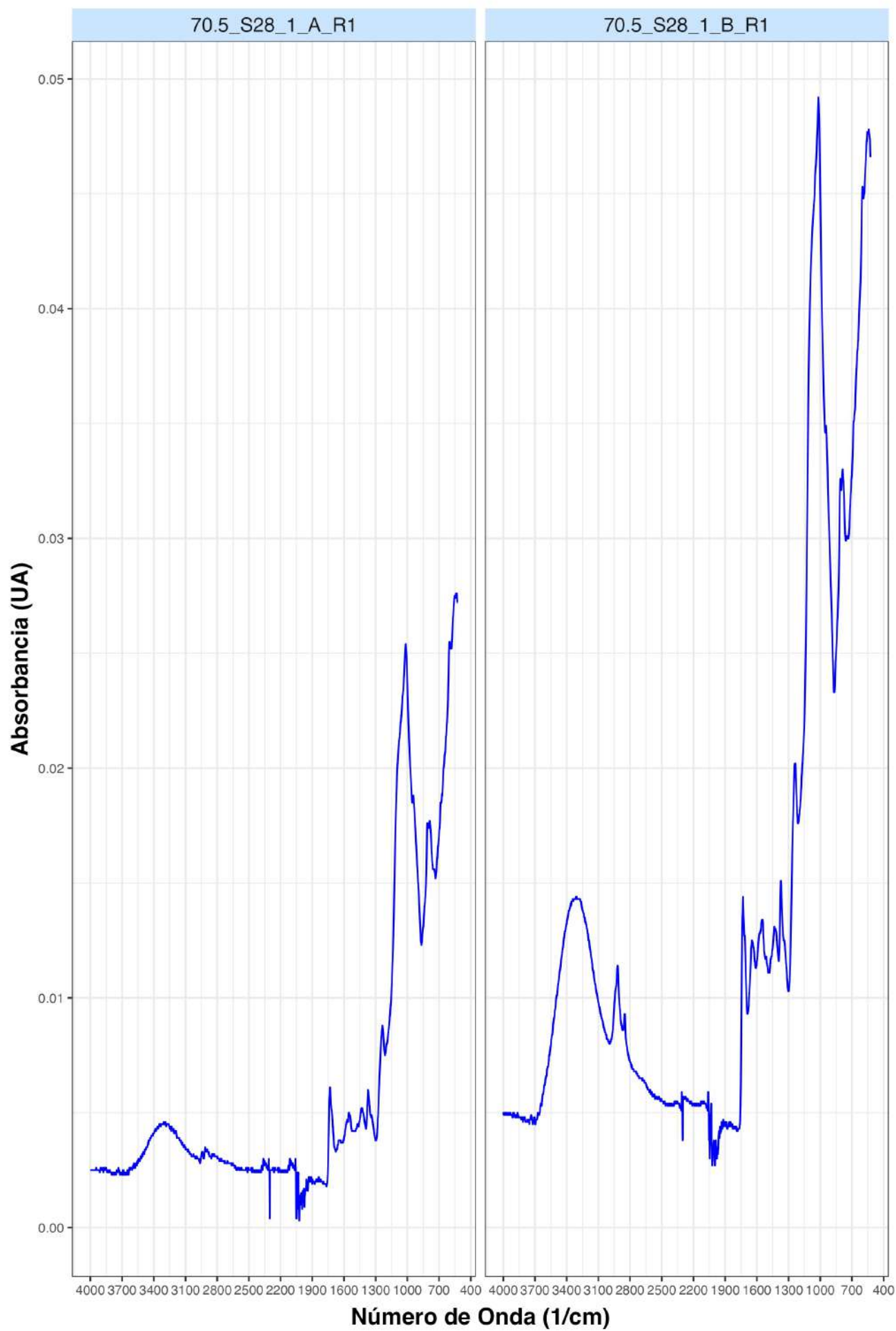
Espectros para Plano 69.9 - Parte 1 de 2



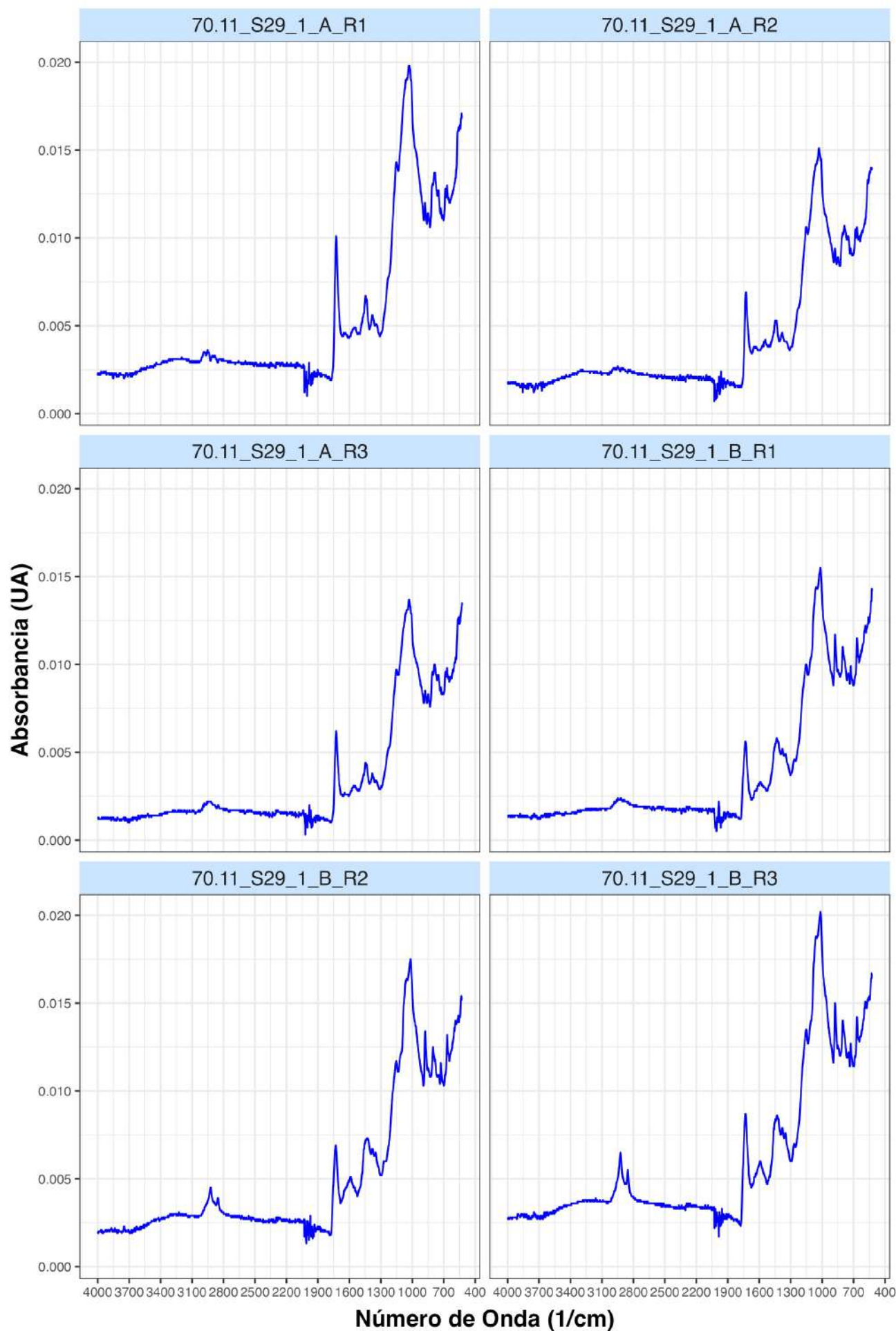
Espectros para Plano 69.9 - Parte 2 de 2



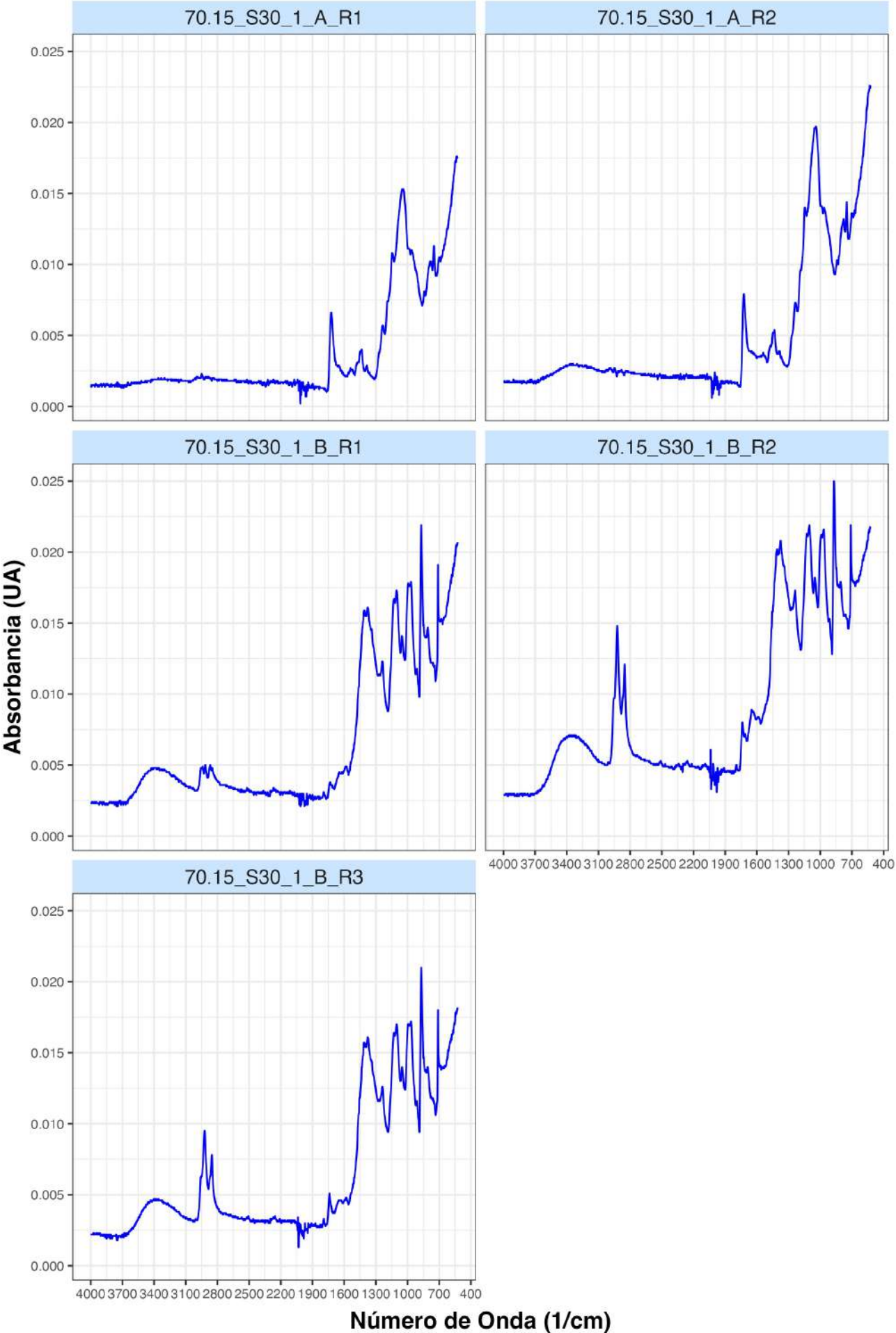
Espectros para Plano 70.5_S28 - Parte 1 de 1



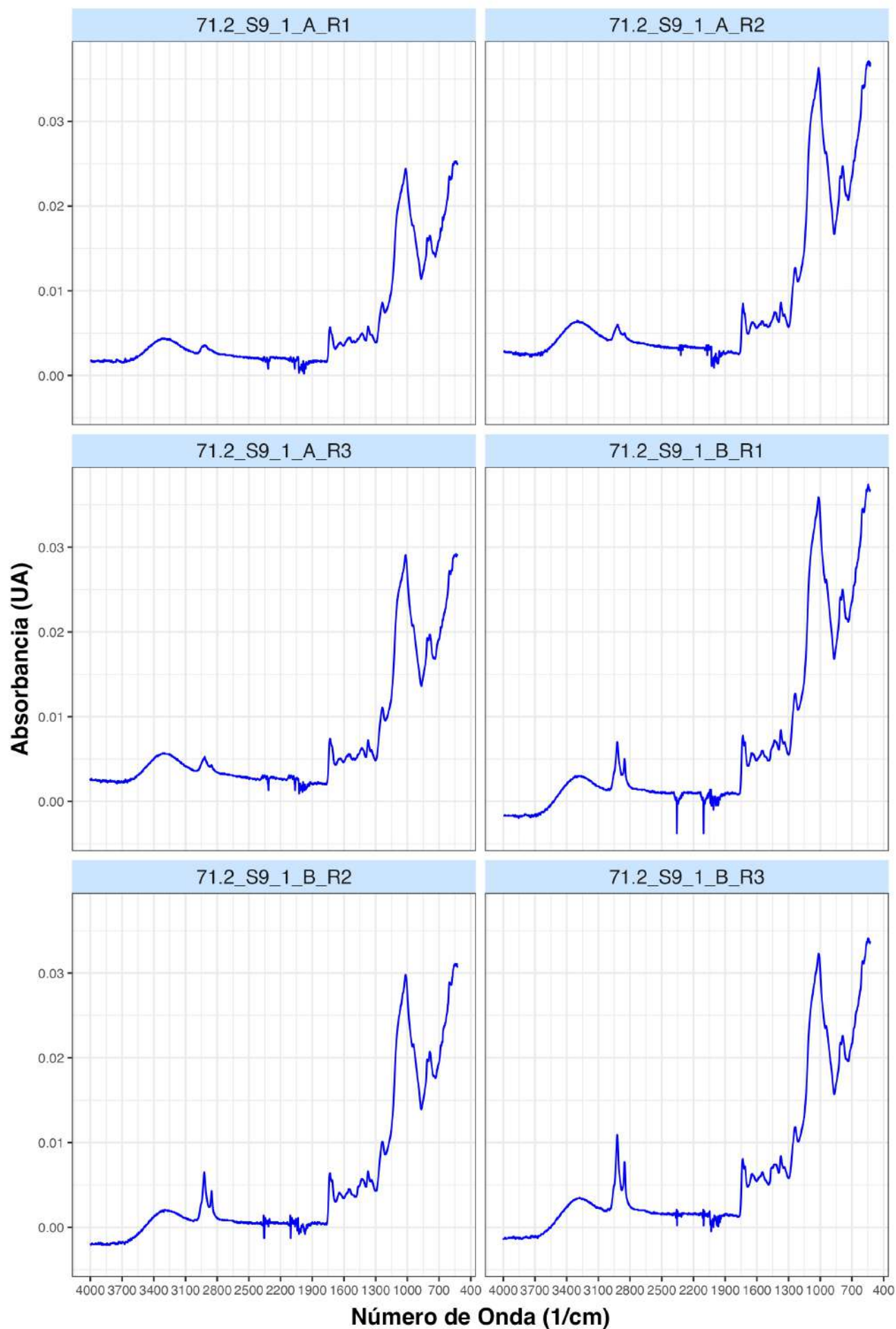
Espectros para Plano 70.11_S29 - Parte 1 de 1



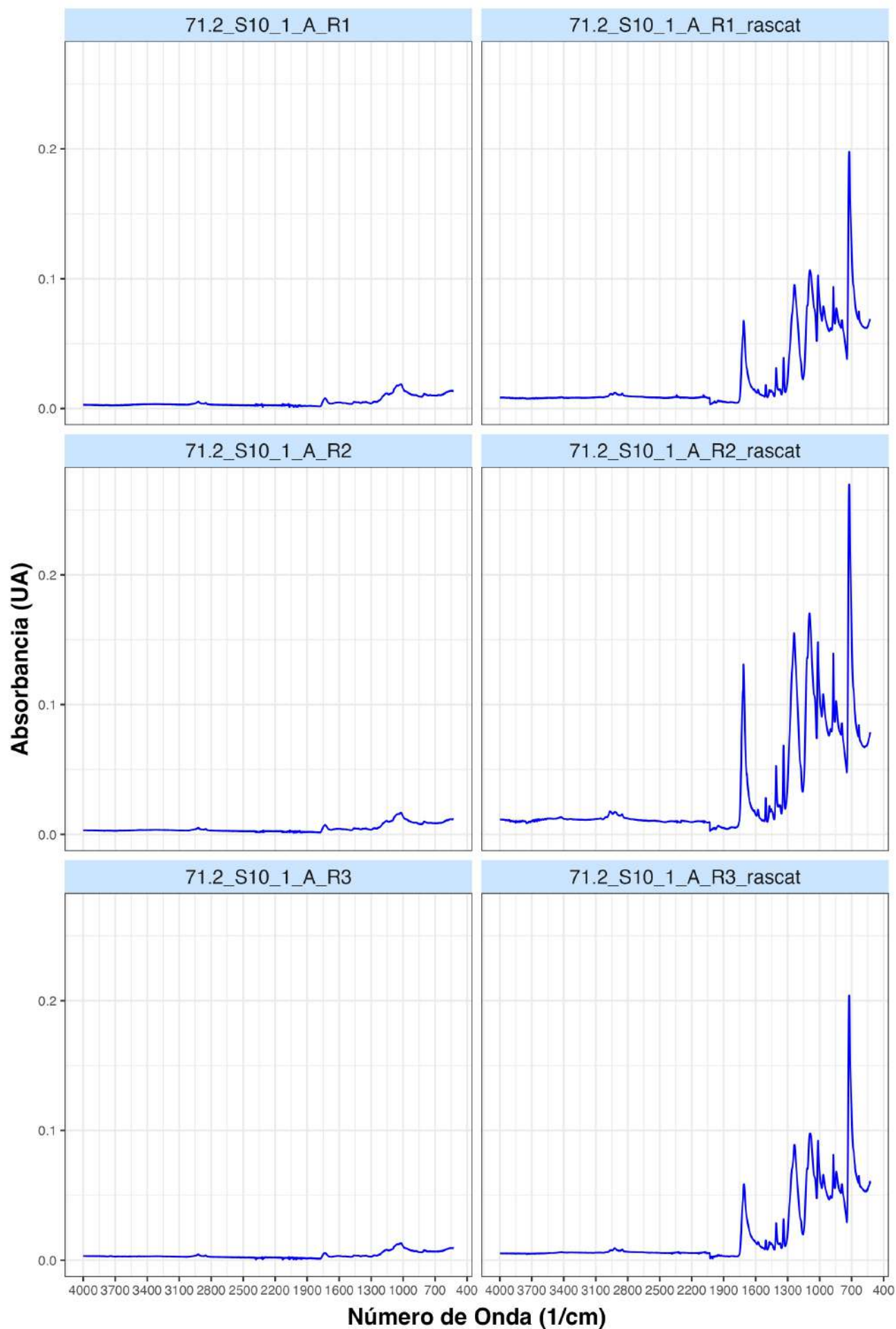
Espectros para Plano 70.15_S30 - Parte 1 de 1



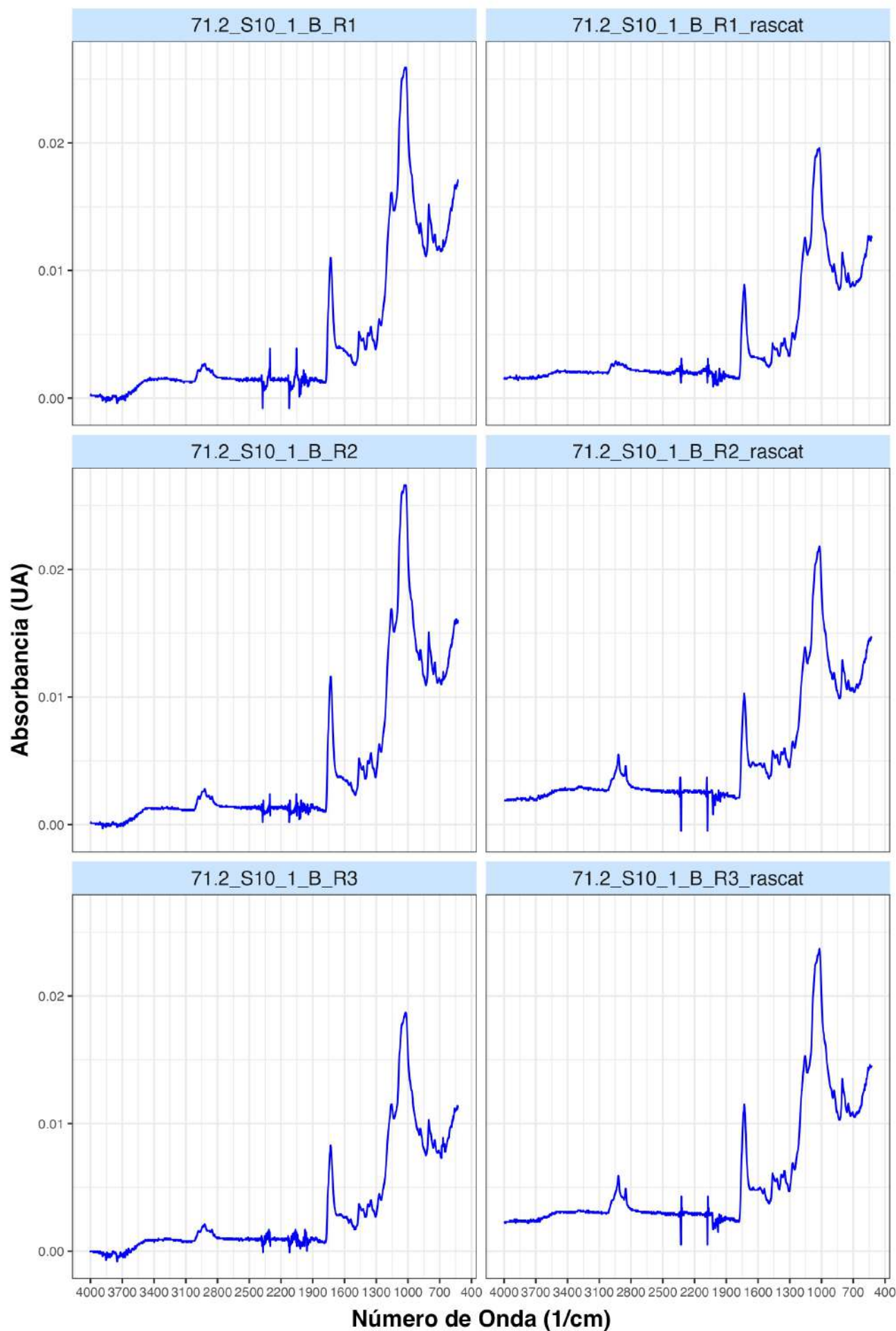
Espectros para Plano 71.2_S9 - Parte 1 de 1



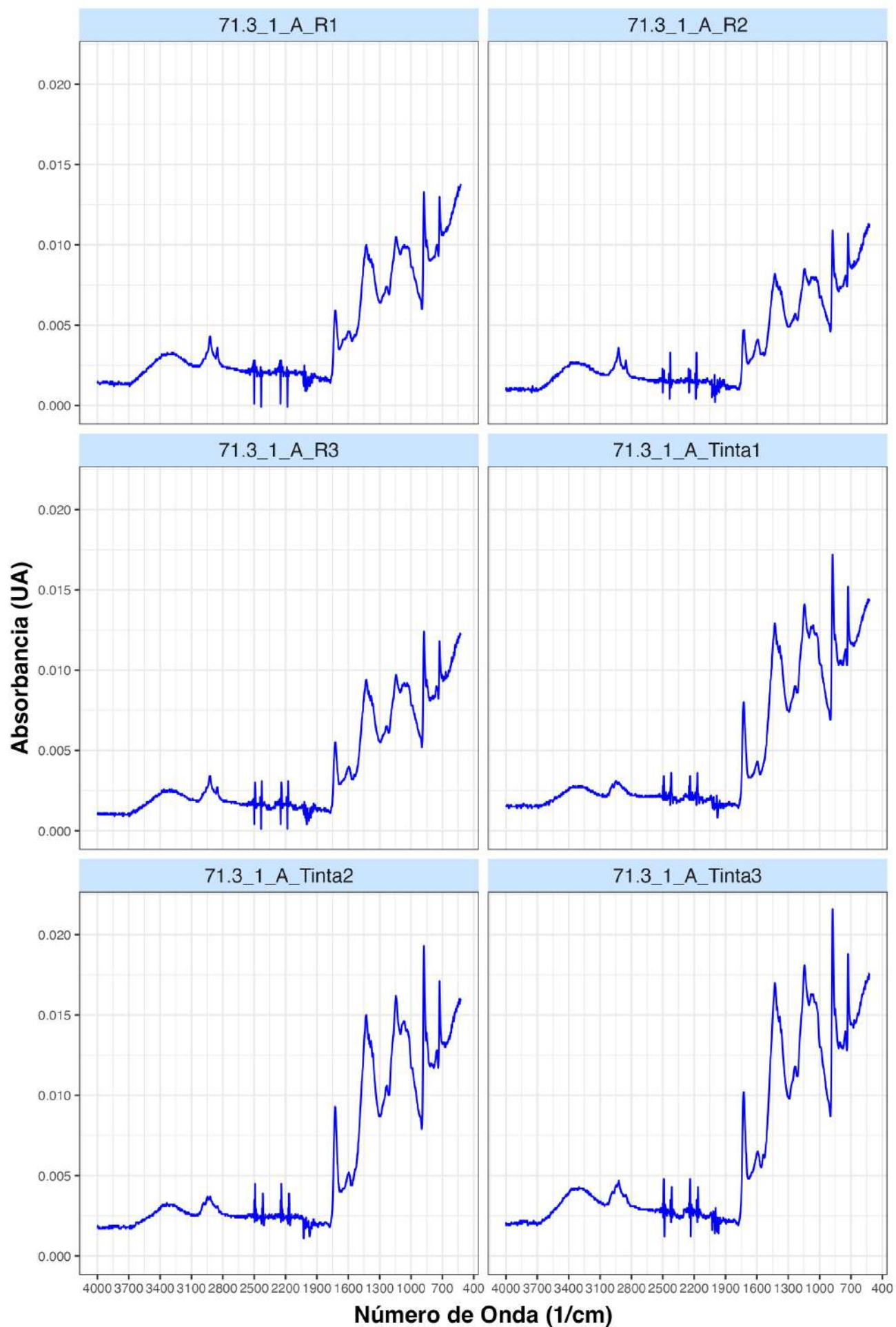
Espectros para Plano 71.2_S10 - Parte 1 de 2



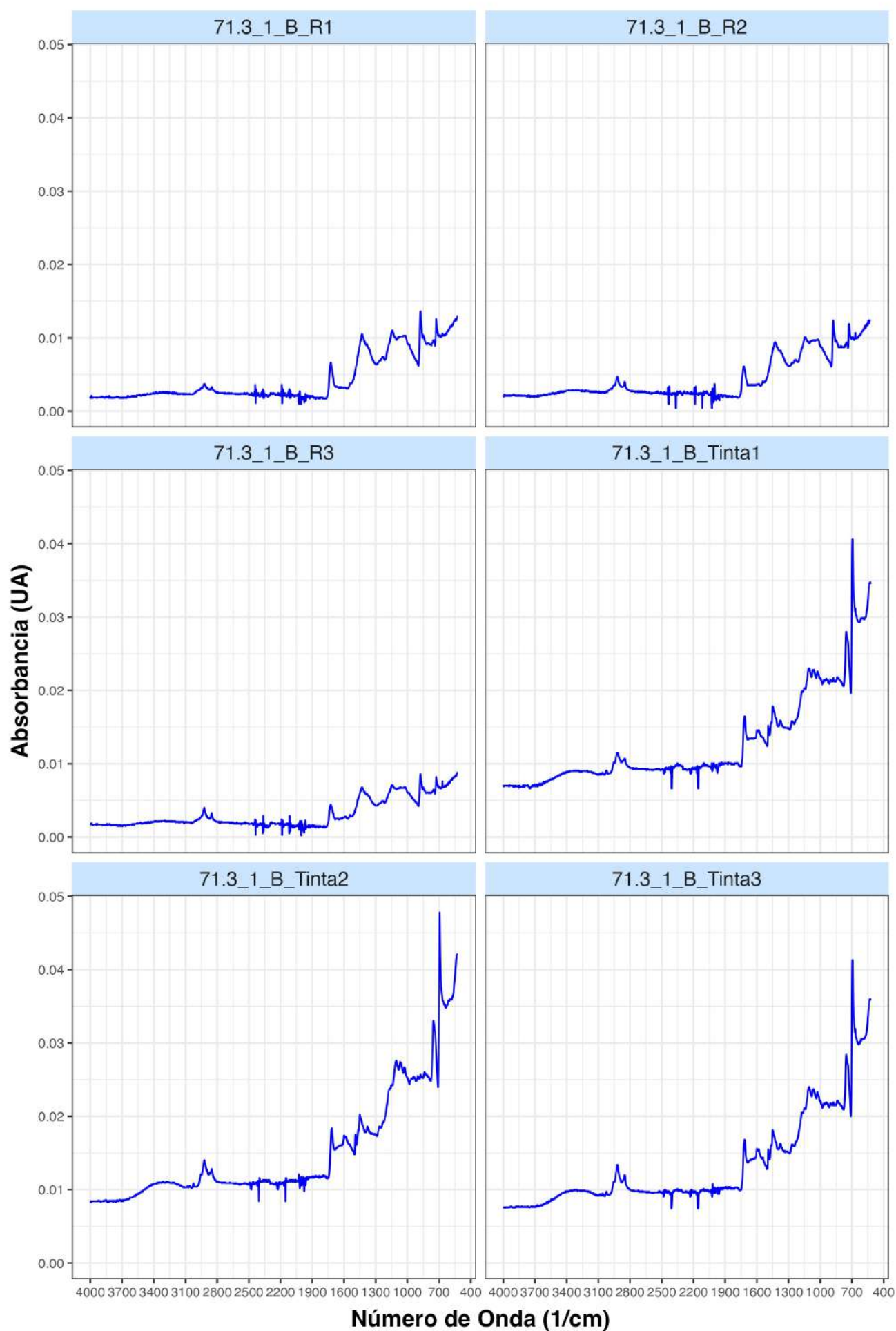
Espectros para Plano 71.2_S10 - Parte 2 de 2



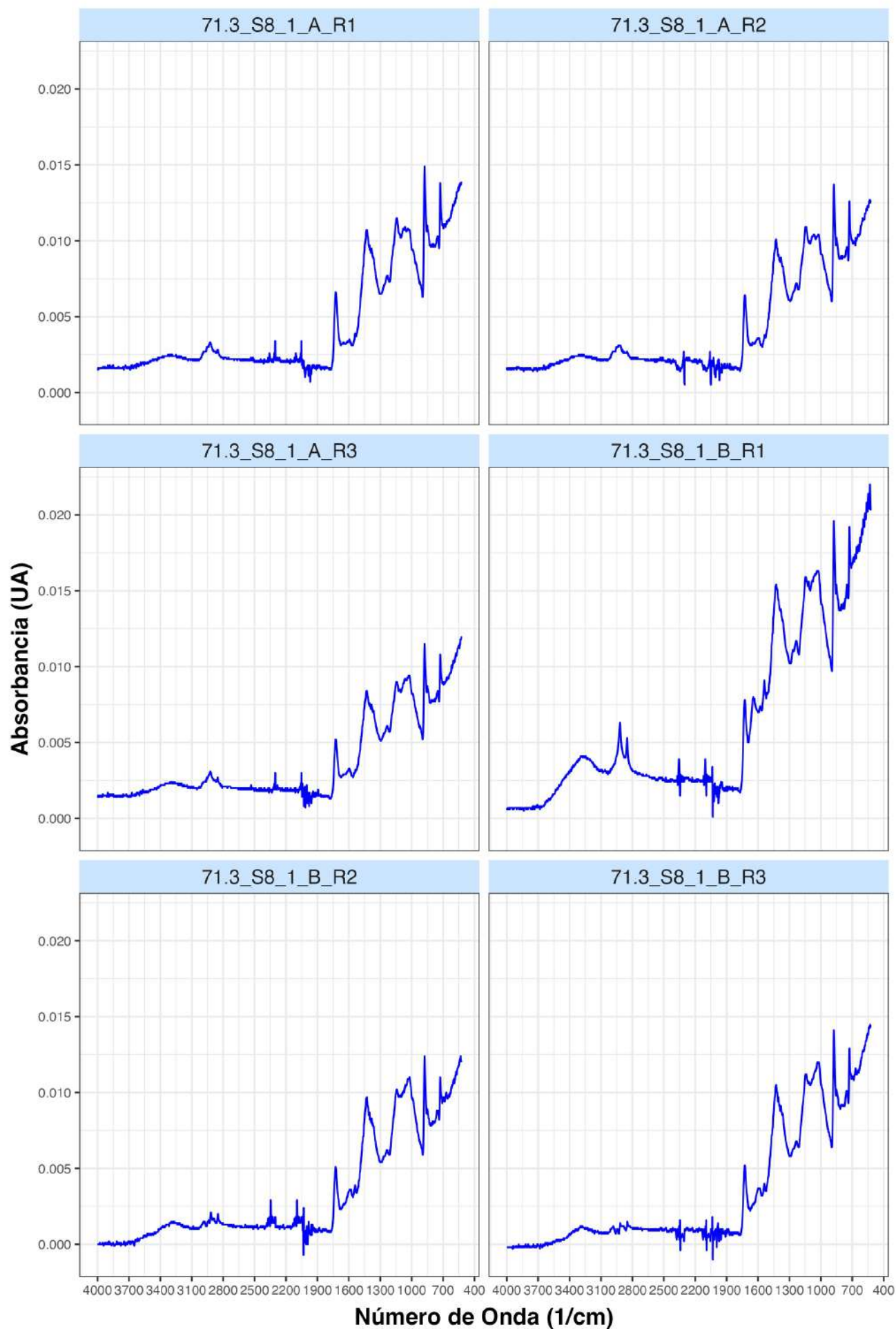
Espectros para Plano 71.3 - Parte 1 de 2



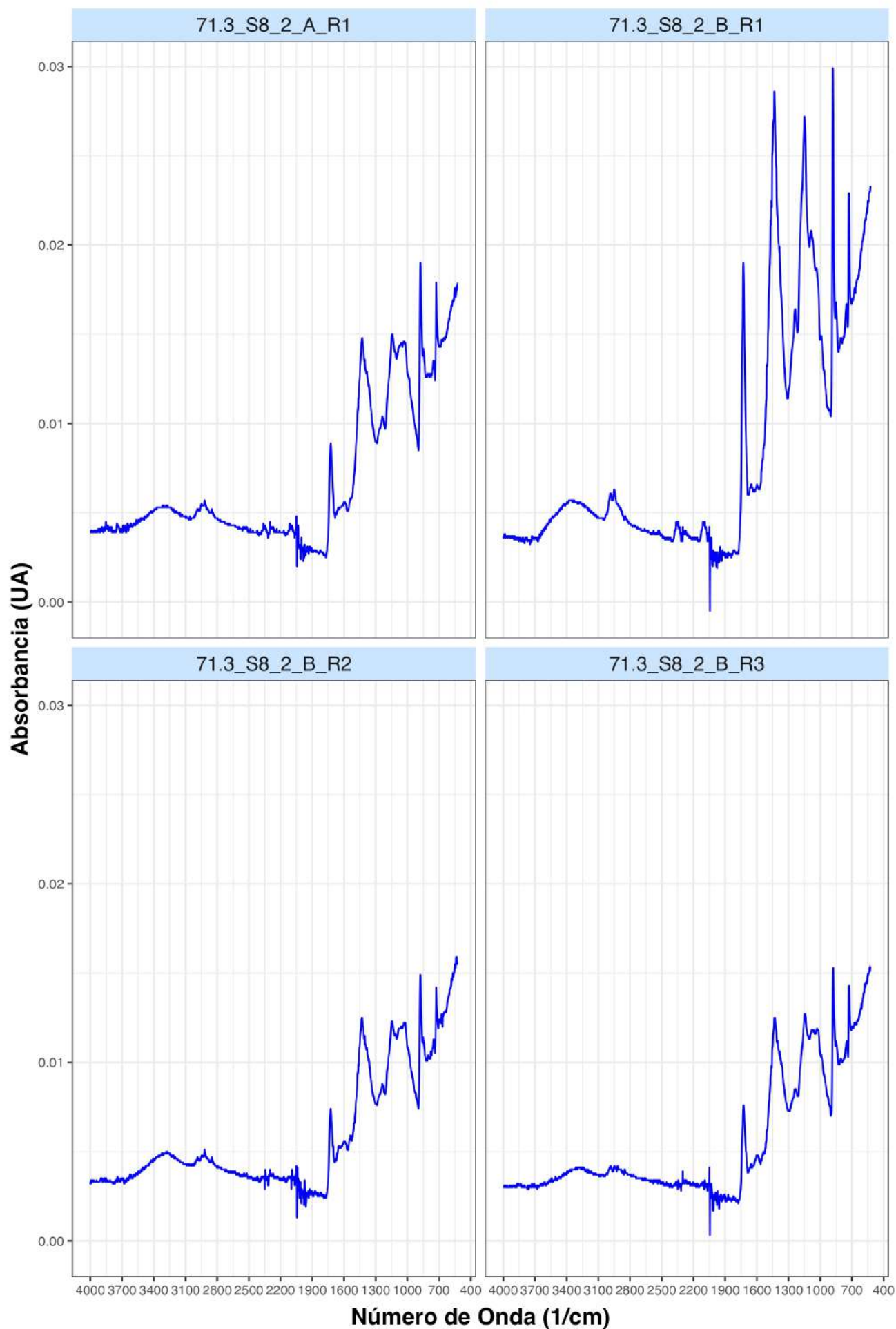
Espectros para Plano 71.3 - Parte 2 de 2



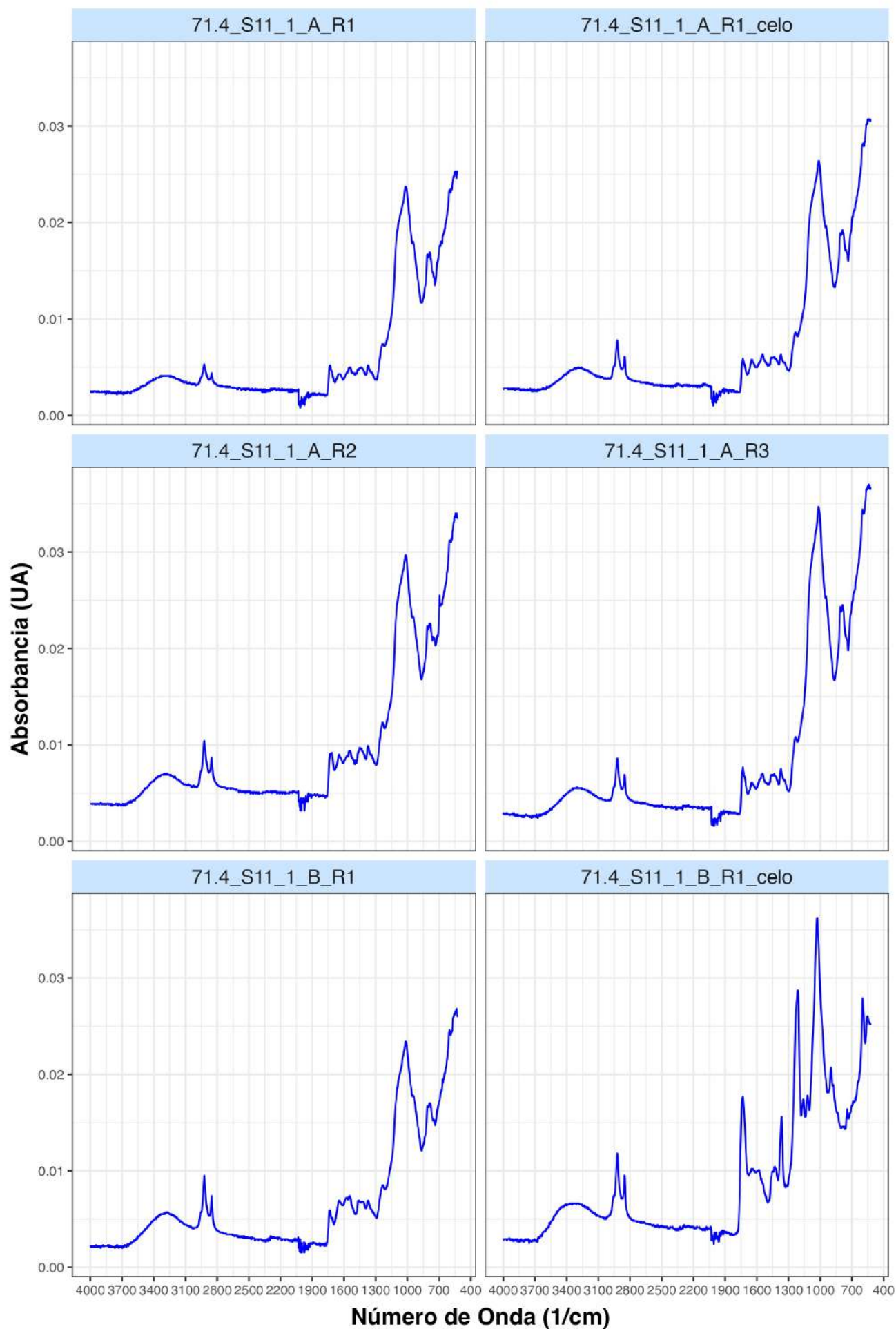
Espectros para Plano 71.3_S8 - Parte 1 de 2



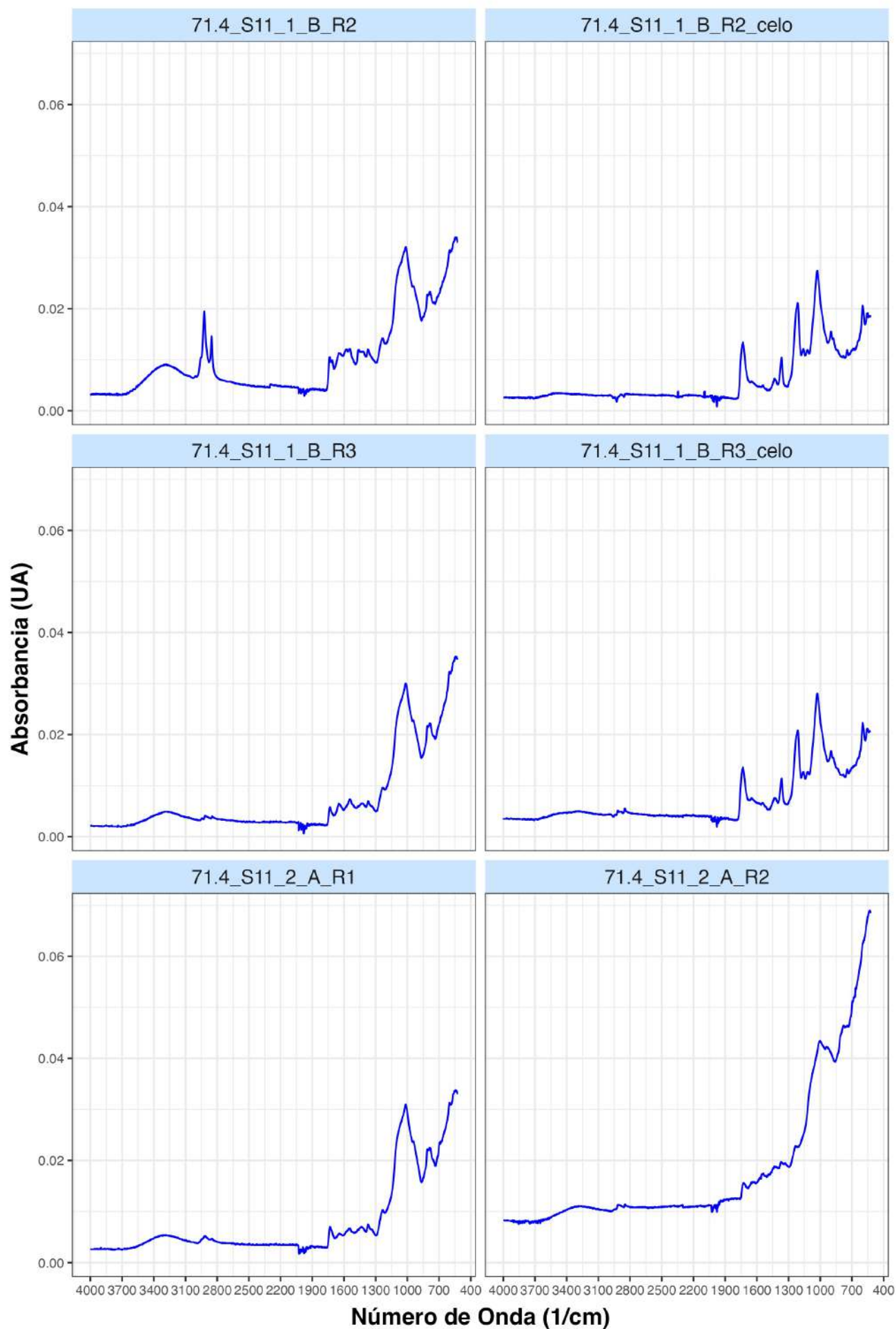
Espectros para Plano 71.3_S8 - Parte 2 de 2



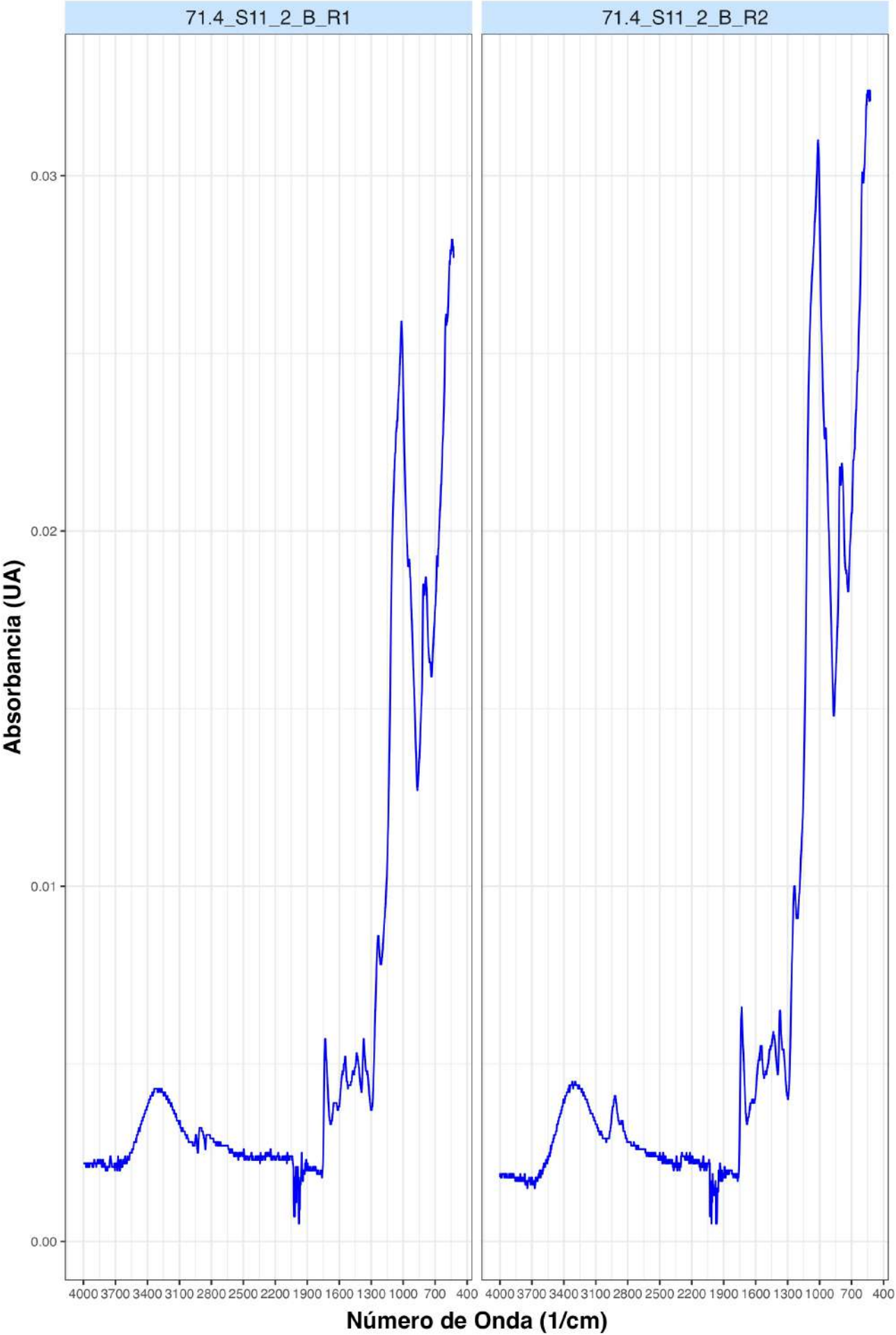
Espectros para Plano 71.4_S11 - Parte 1 de 3



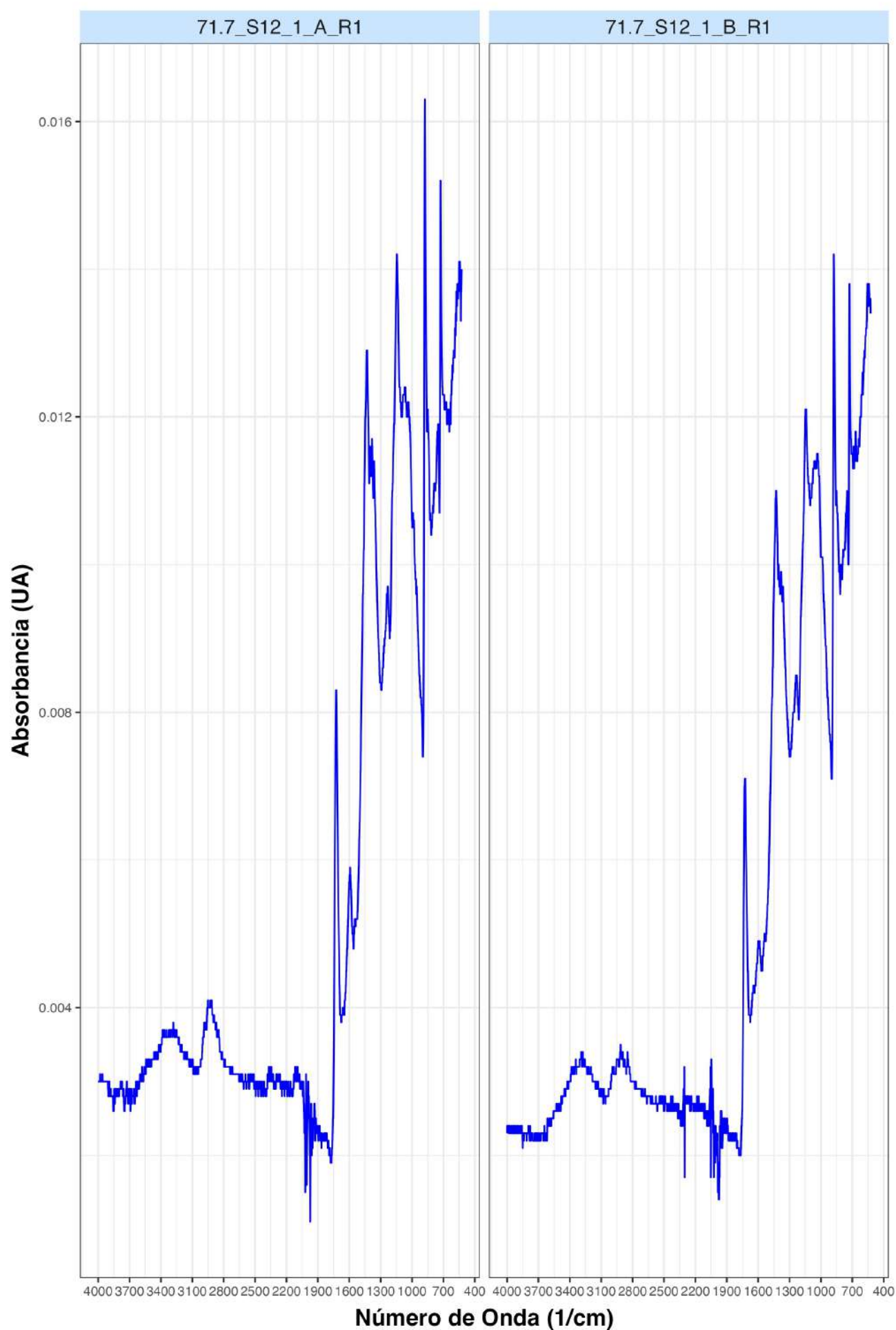
Espectros para Plano 71.4_S11 - Parte 2 de 3



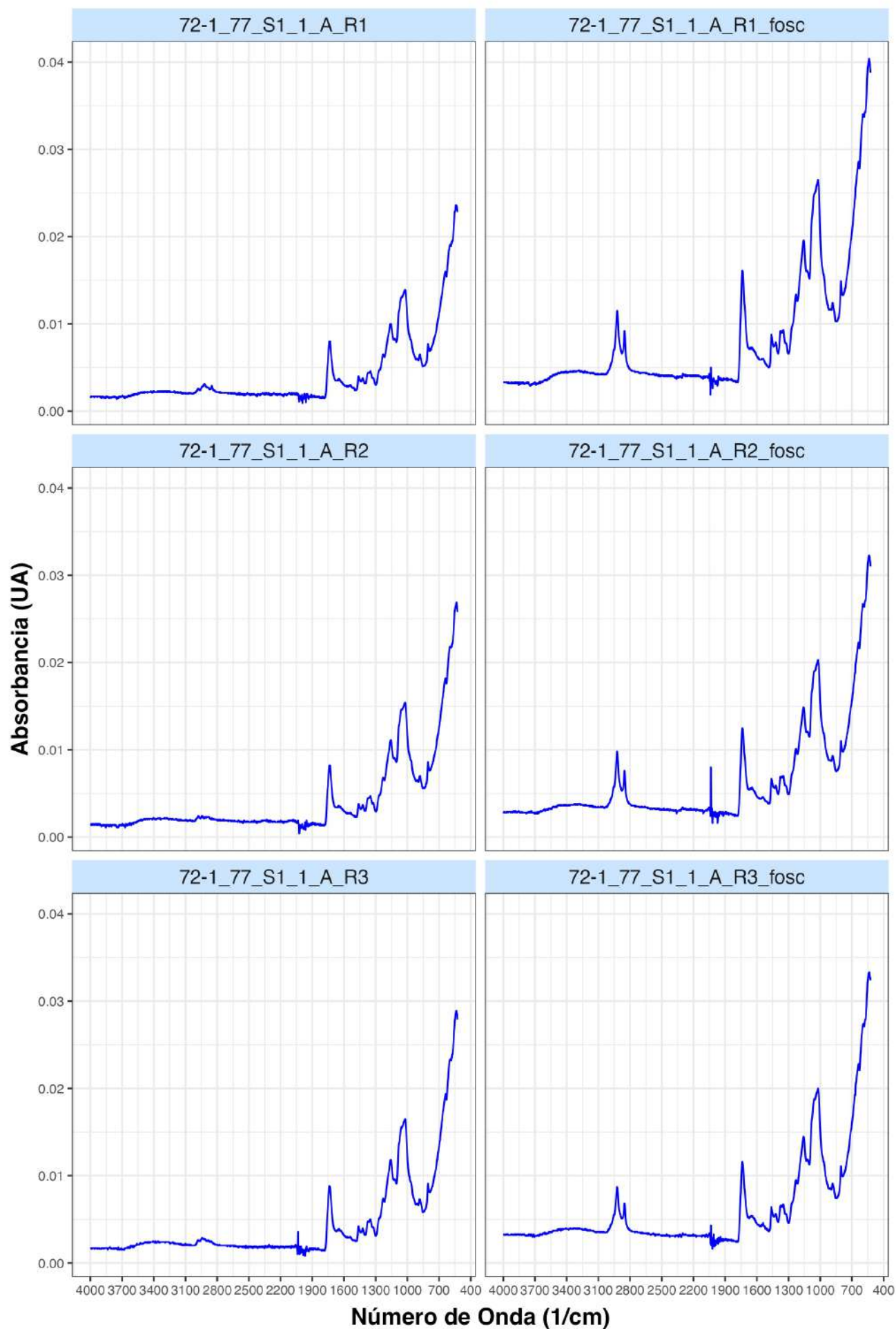
Espectros para Plano 71.4_S11 - Parte 3 de 3



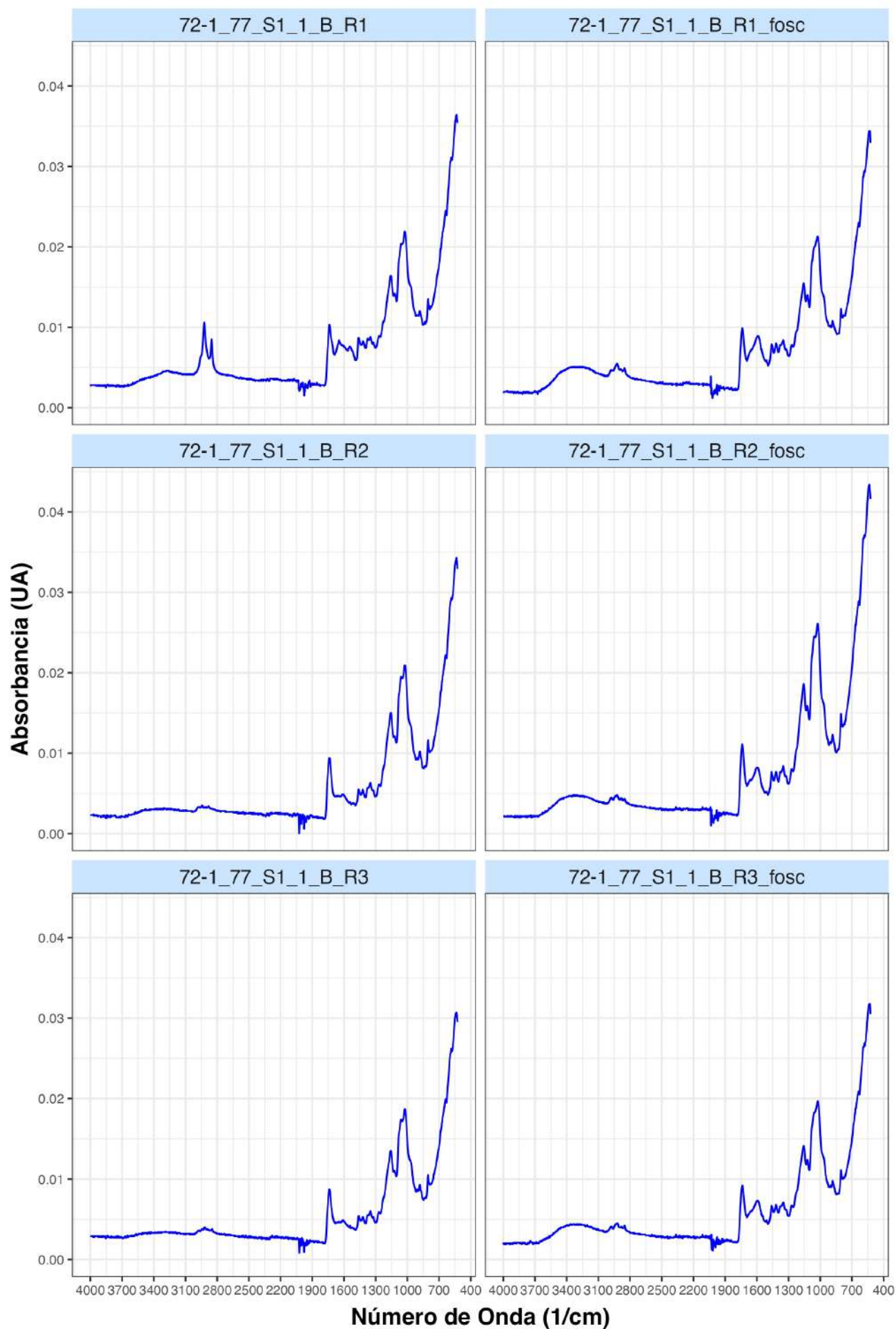
Espectros para Plano 71.7_S12 - Parte 1 de 1



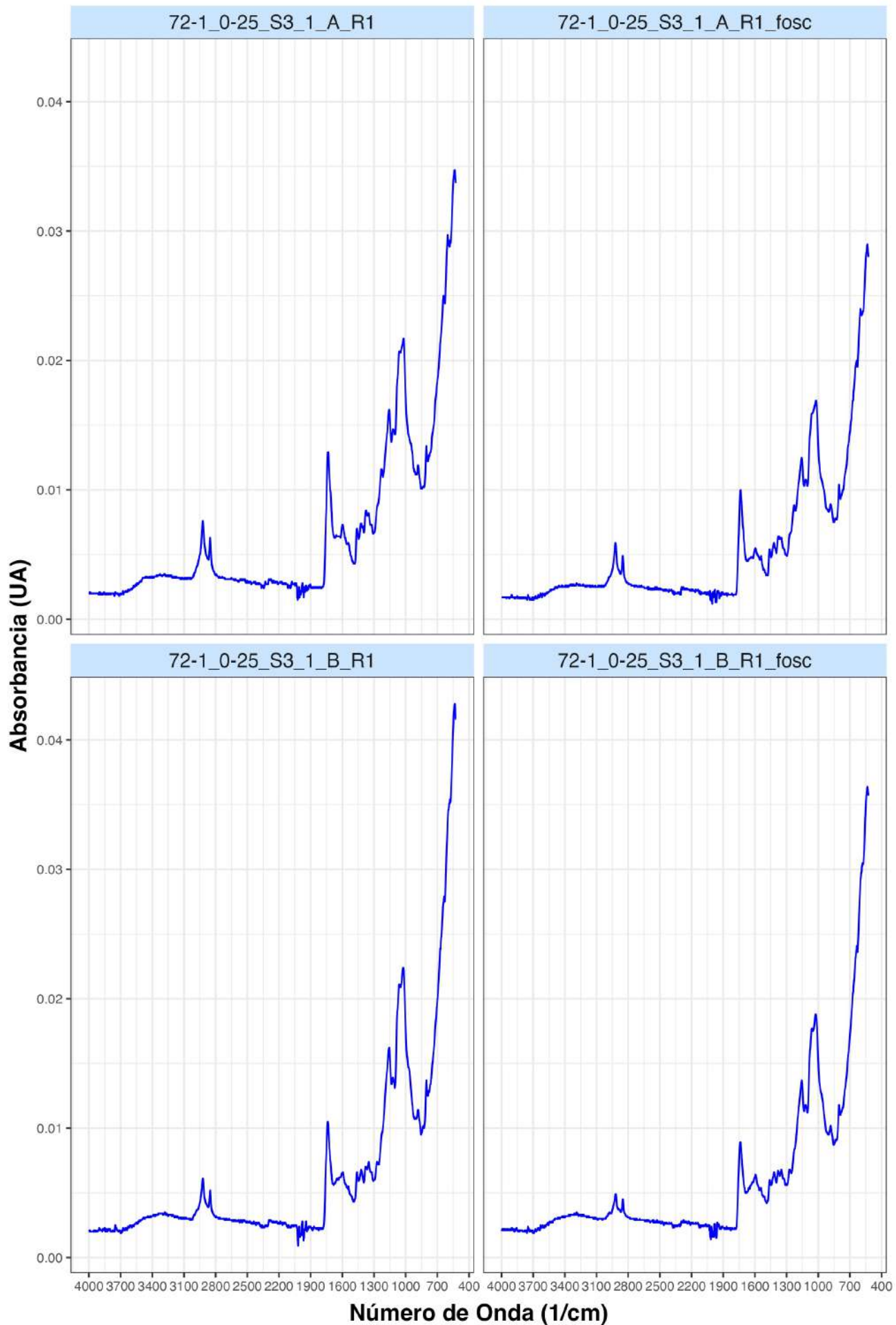
Espectros para Plano 72-1_77 - Parte 1 de 2



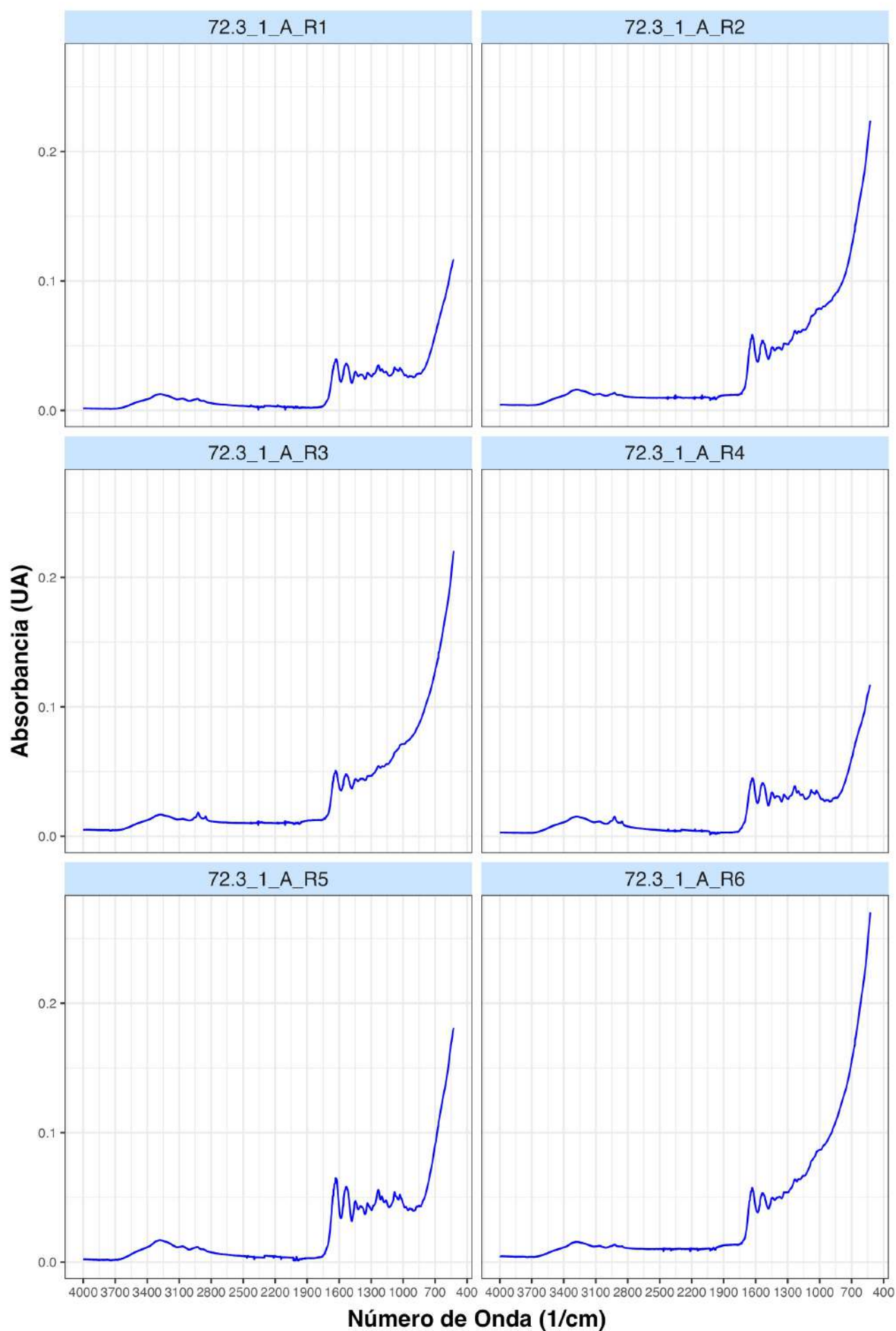
Espectros para Plano 72-1_77 - Parte 2 de 2



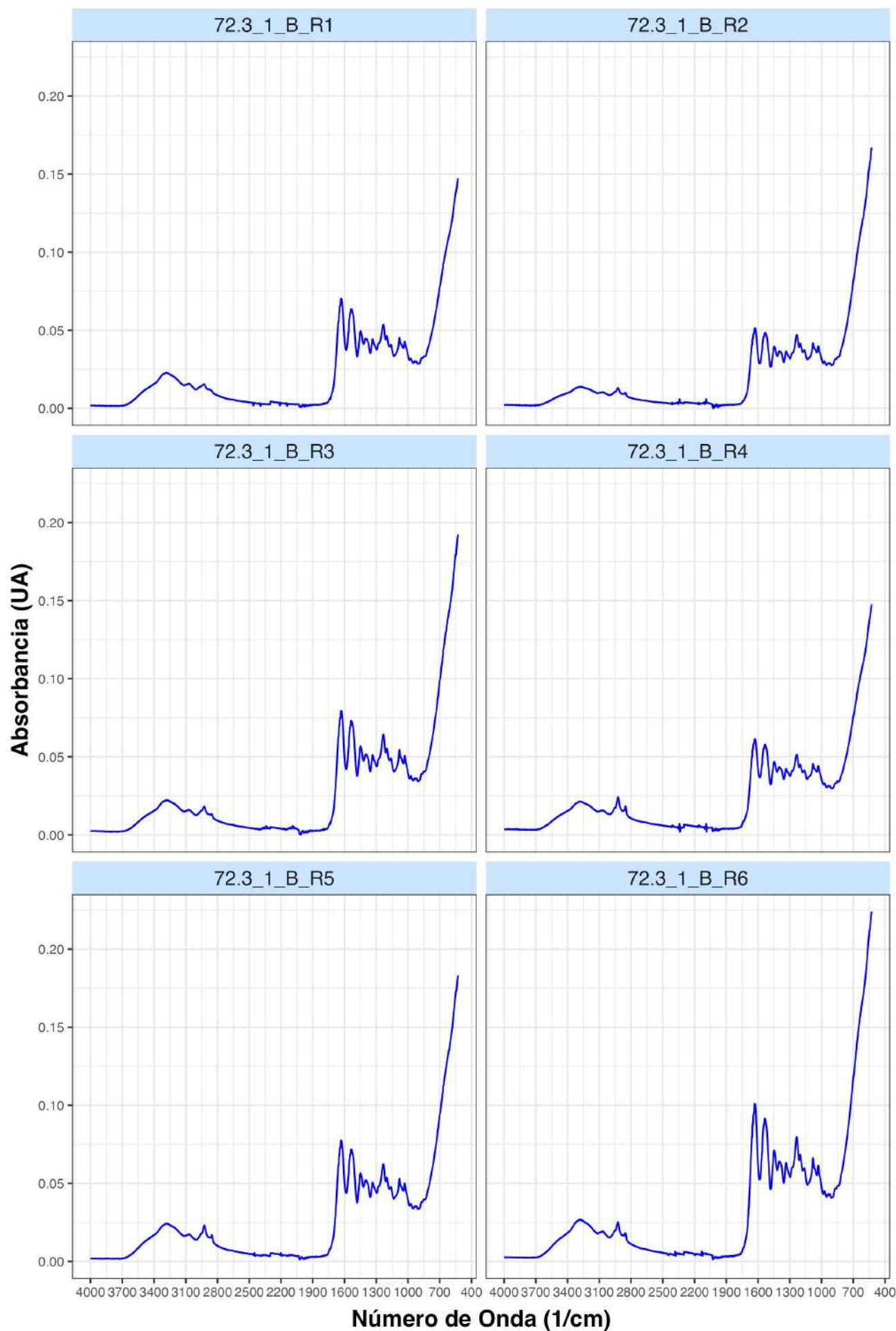
Espectros para Plano 72-1_S3 - Parte 1 de 1



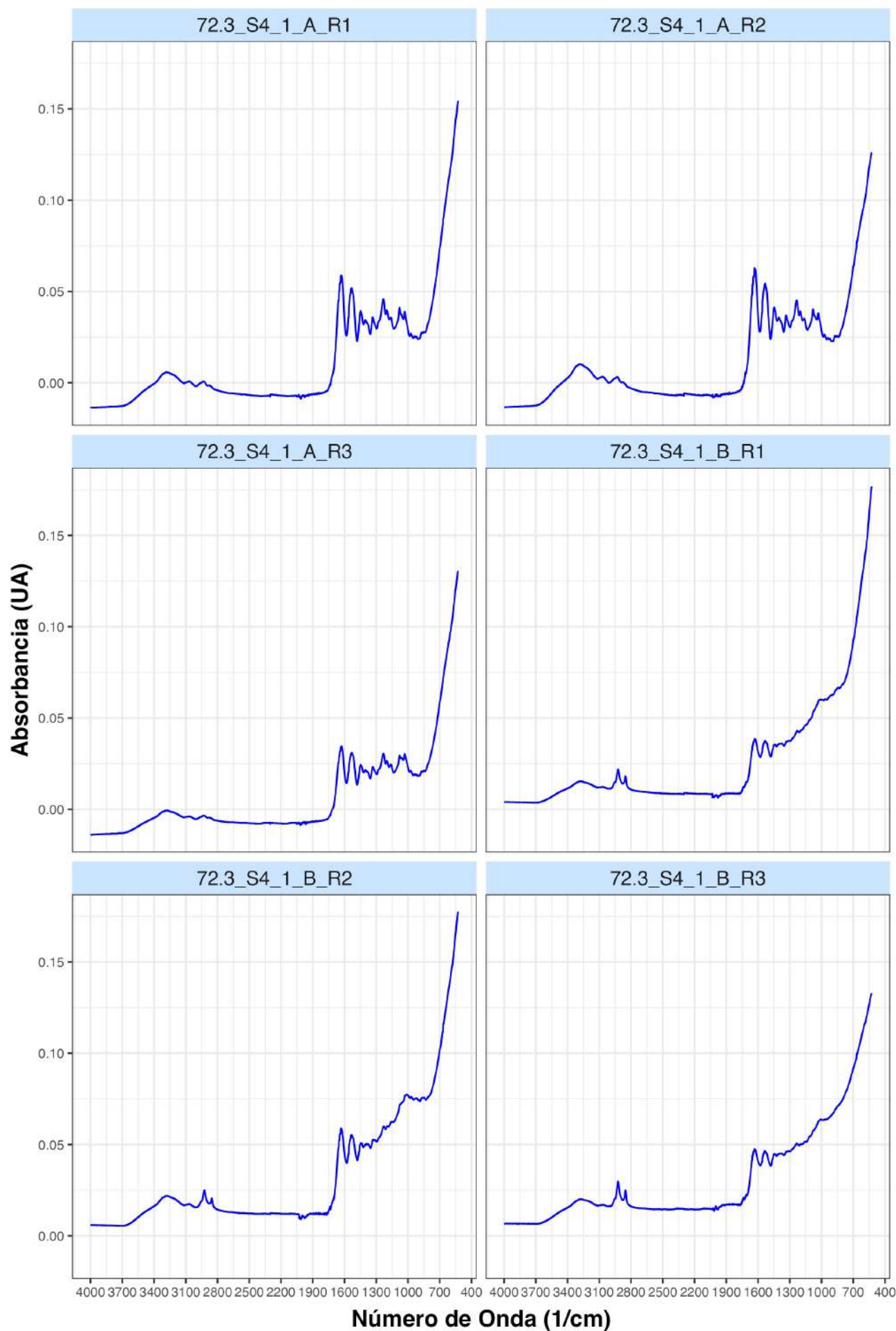
Espectros para Plano 72.3 - Parte 1 de 2



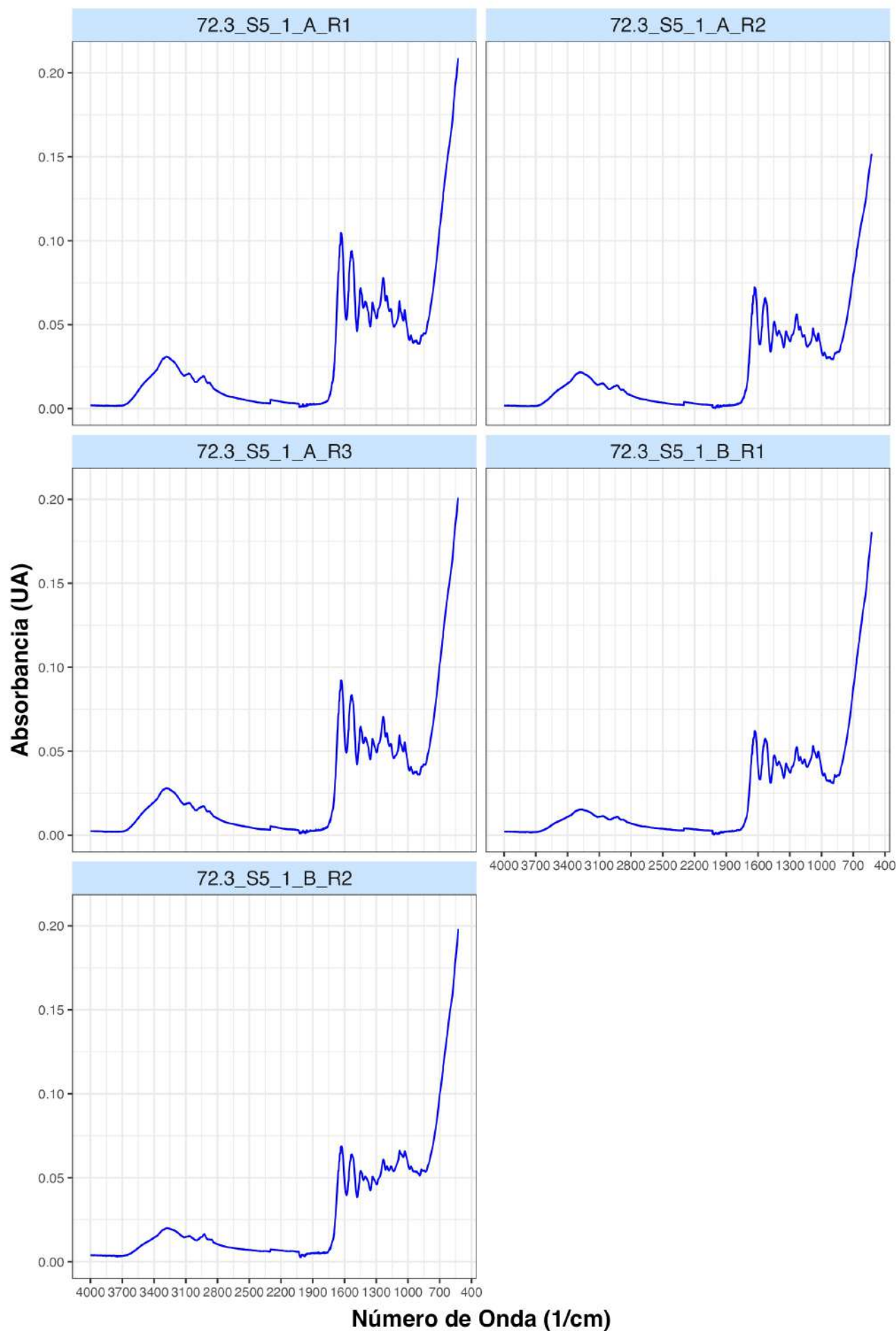
Espectros para Plano 72.3 - Parte 2 de 2



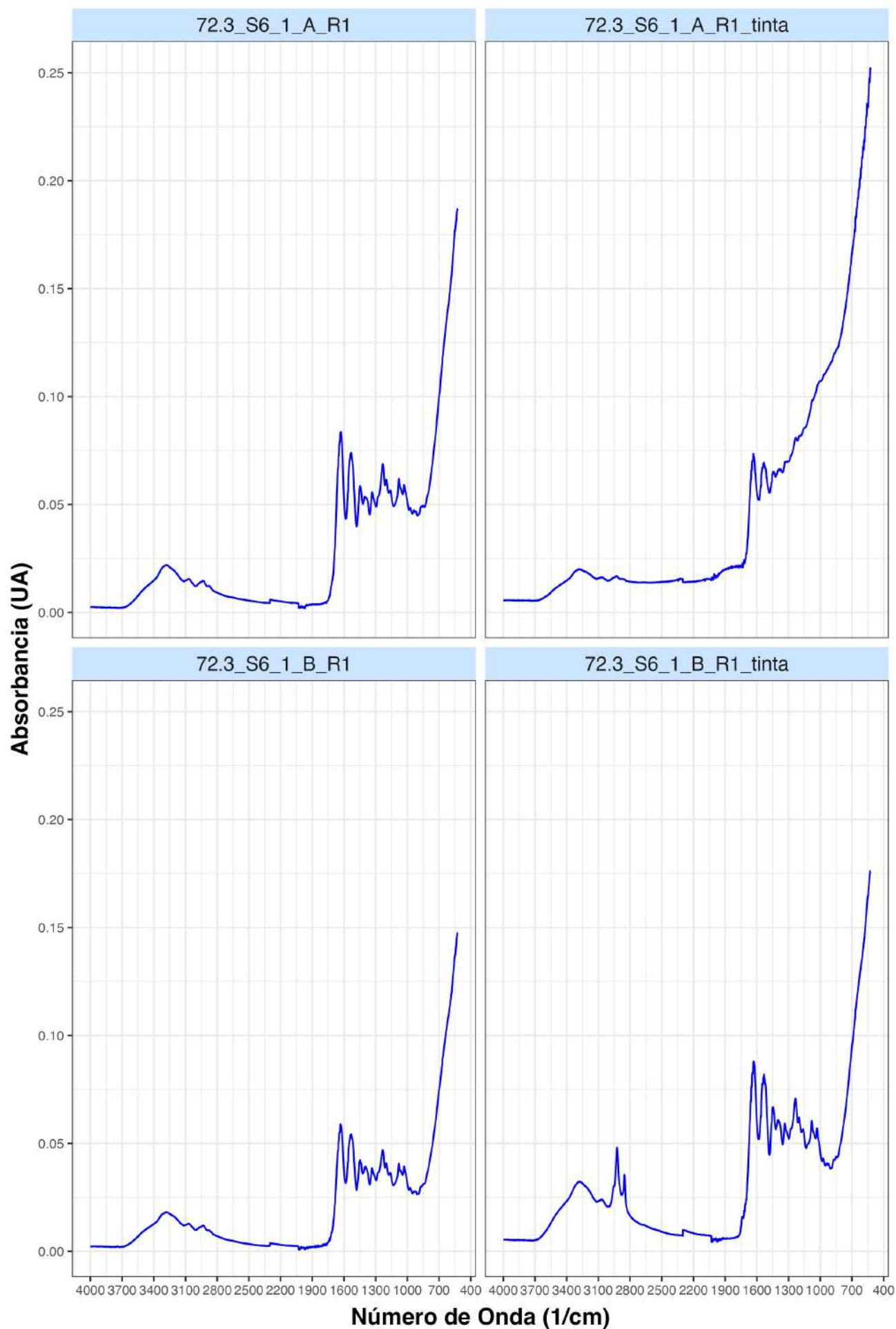
Espectros para Plano 72.3_S4 - Parte 1 de 1



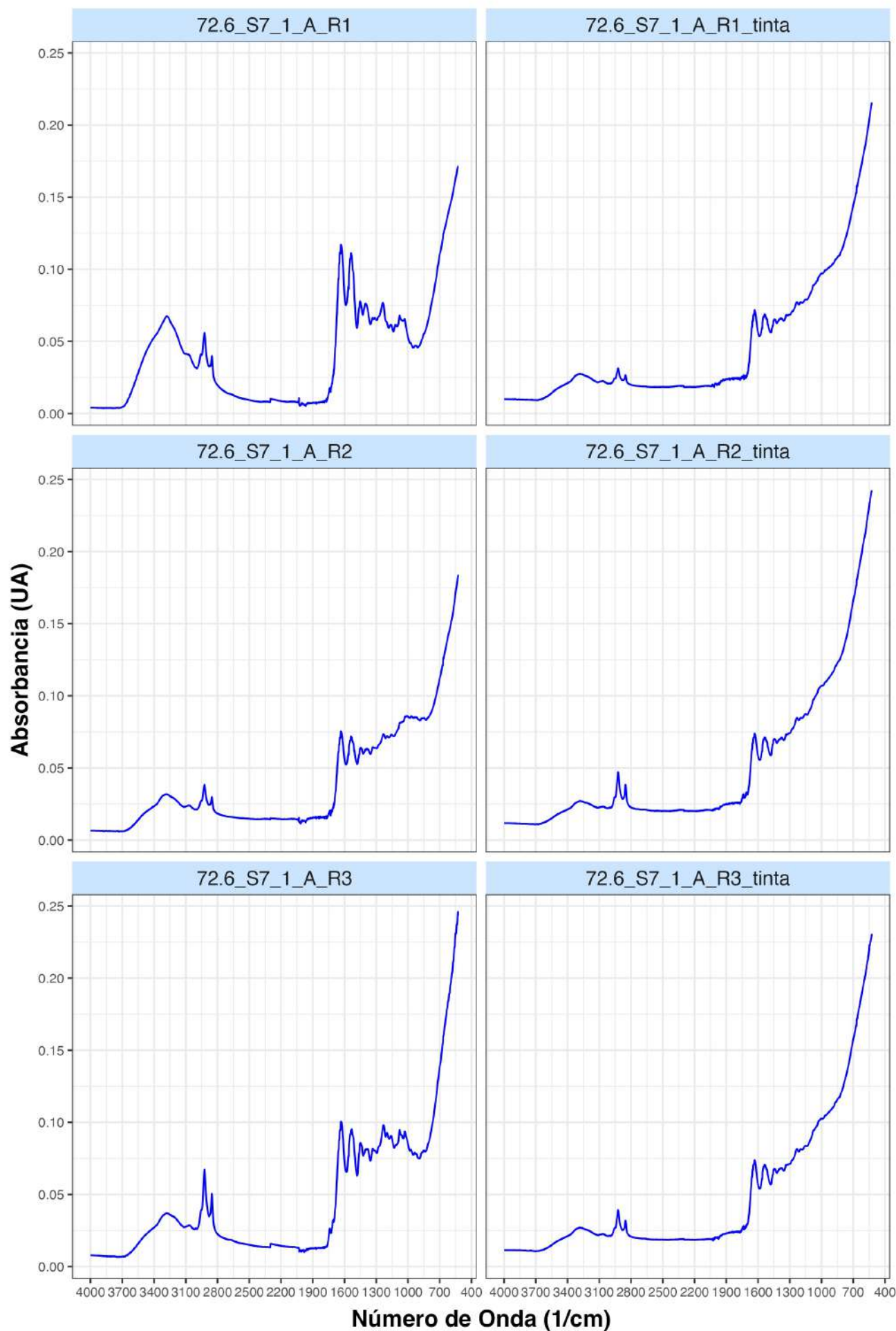
Espectros para Plano 72.3_S5 - Parte 1 de 1



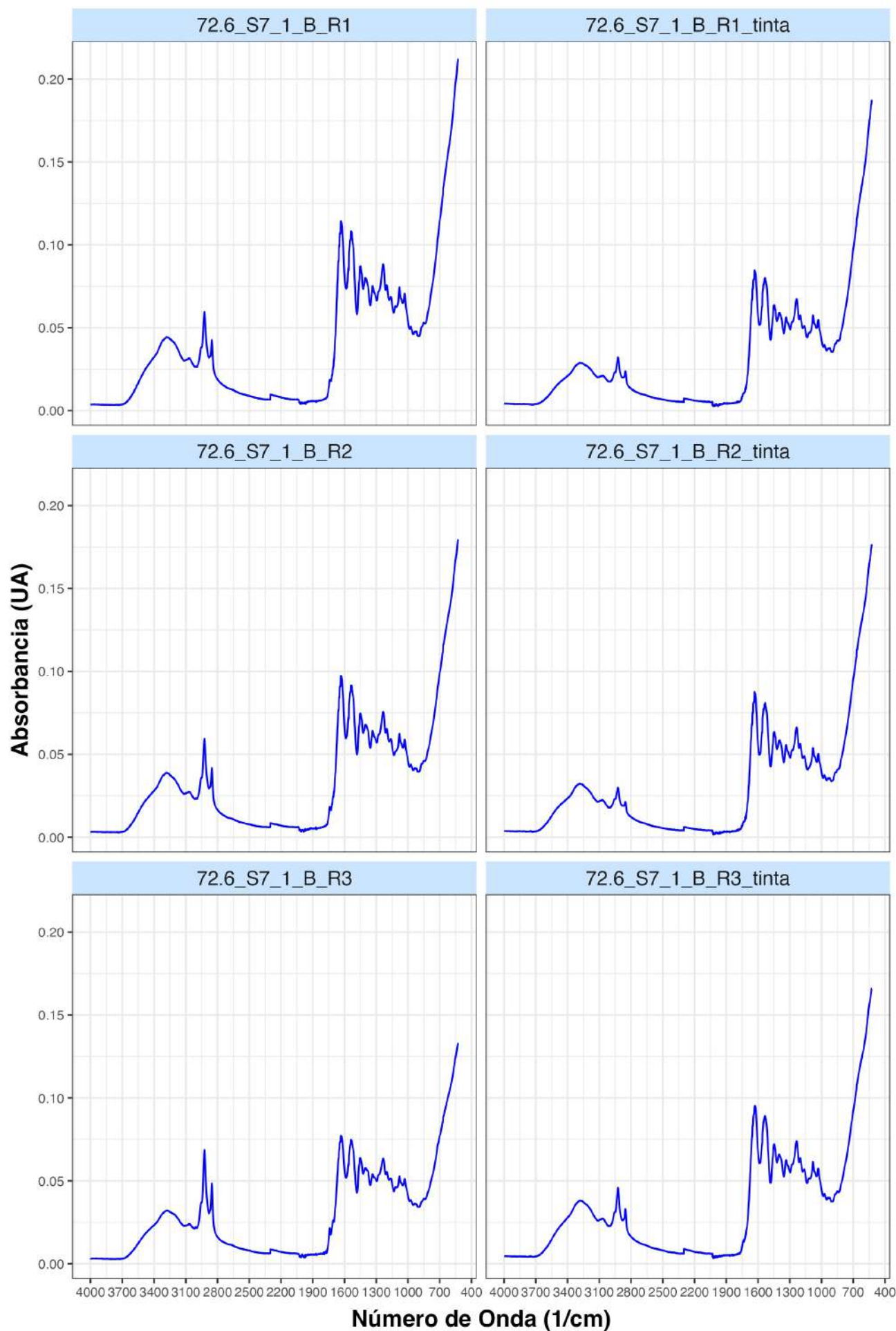
Espectros para Plano 72.3_S6 - Parte 1 de 1



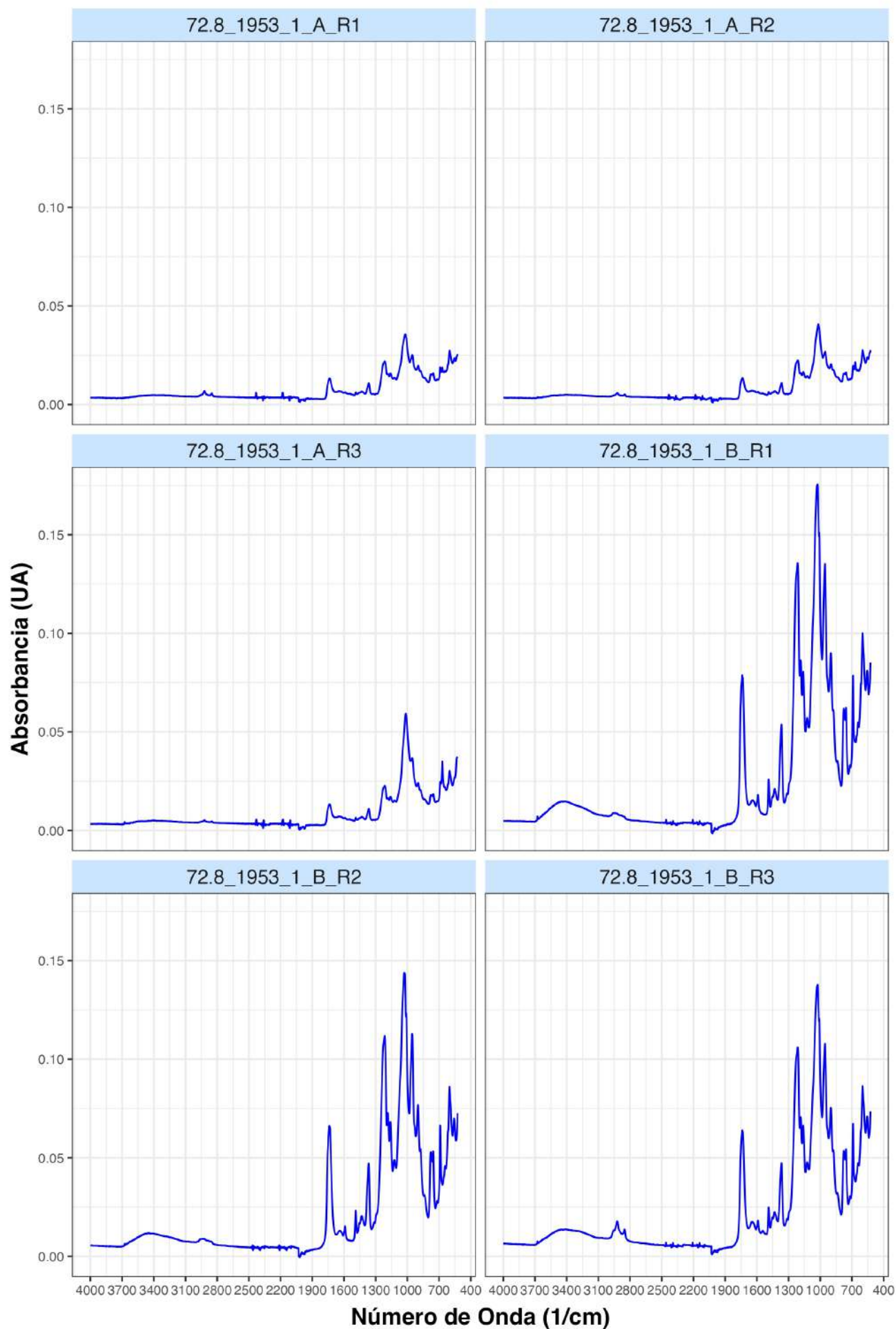
Espectros para Plano 72.6_S7 - Parte 1 de 2



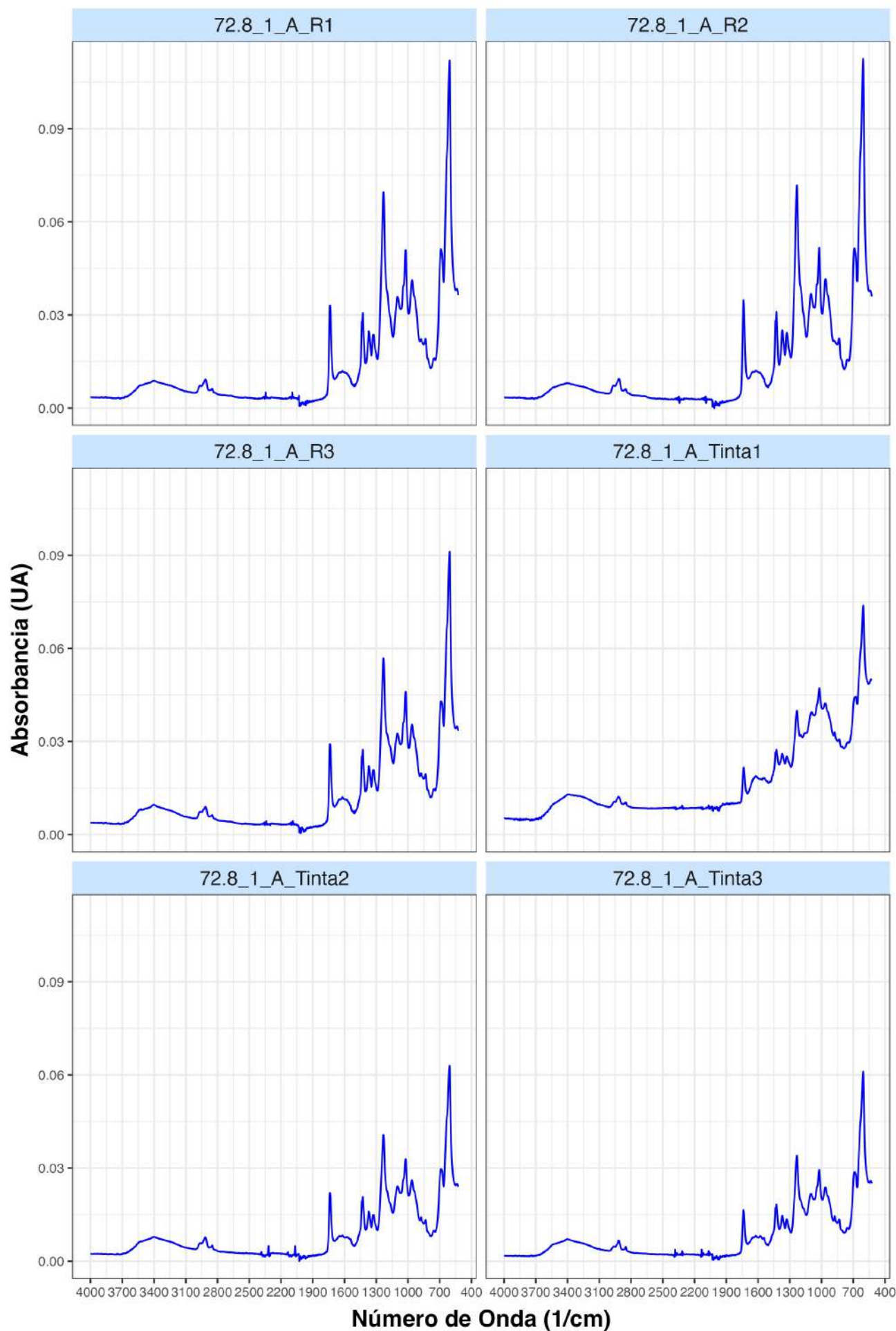
Espectros para Plano 72.6_S7 - Parte 2 de 2



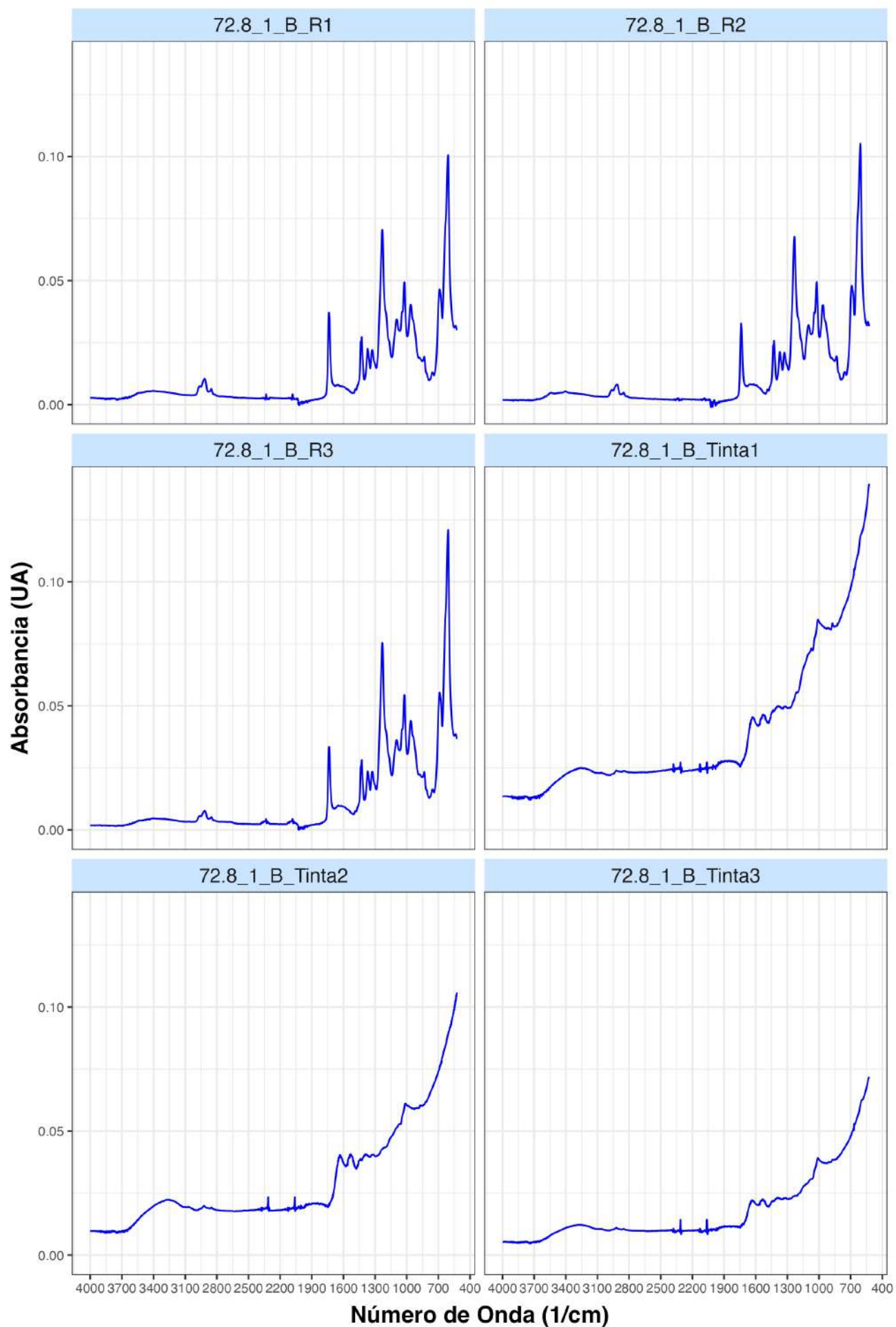
Espectros para Plano 72.8_1953 - Parte 1 de 1



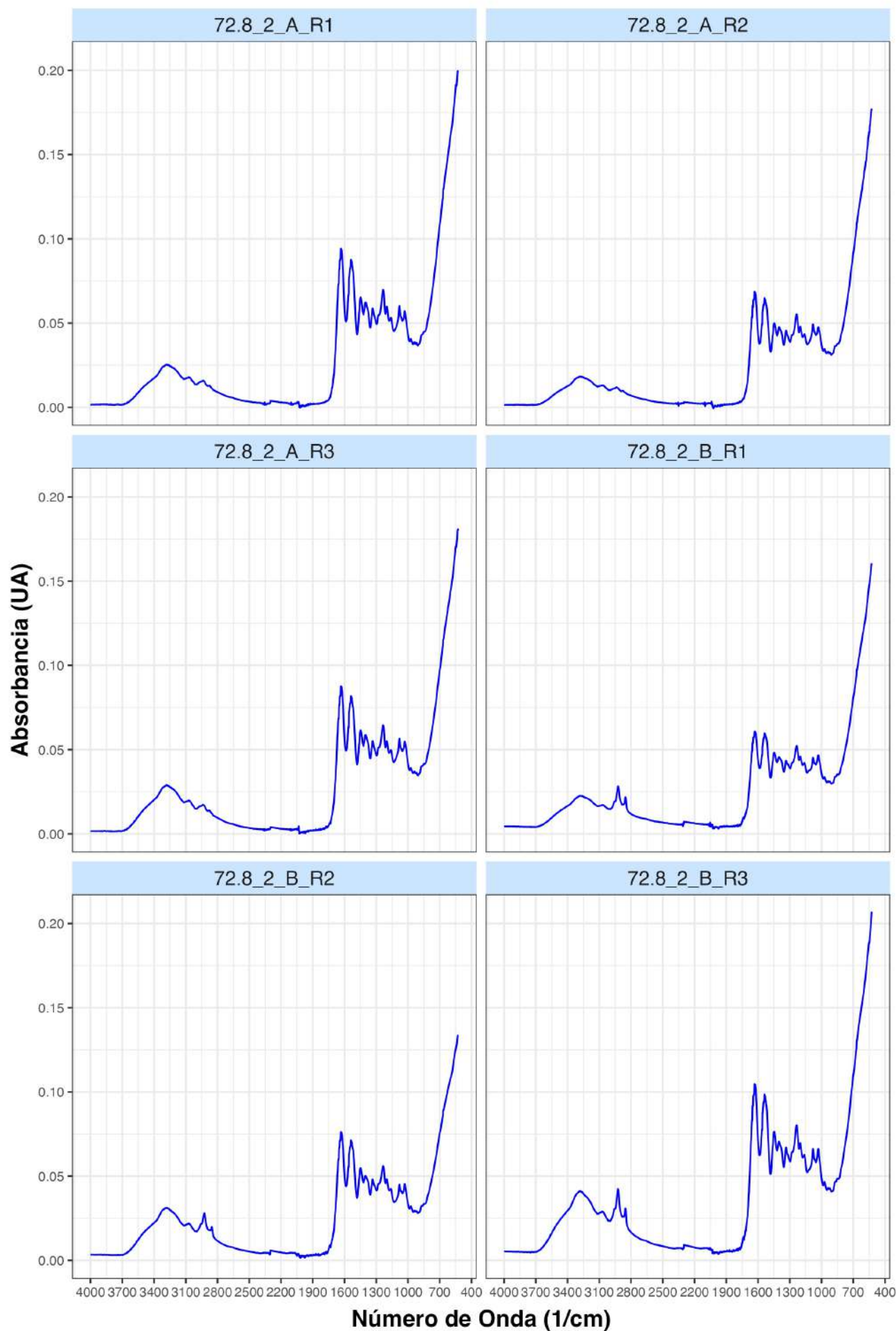
Espectros para Plano 72.8.1962 - Parte 1 de 3



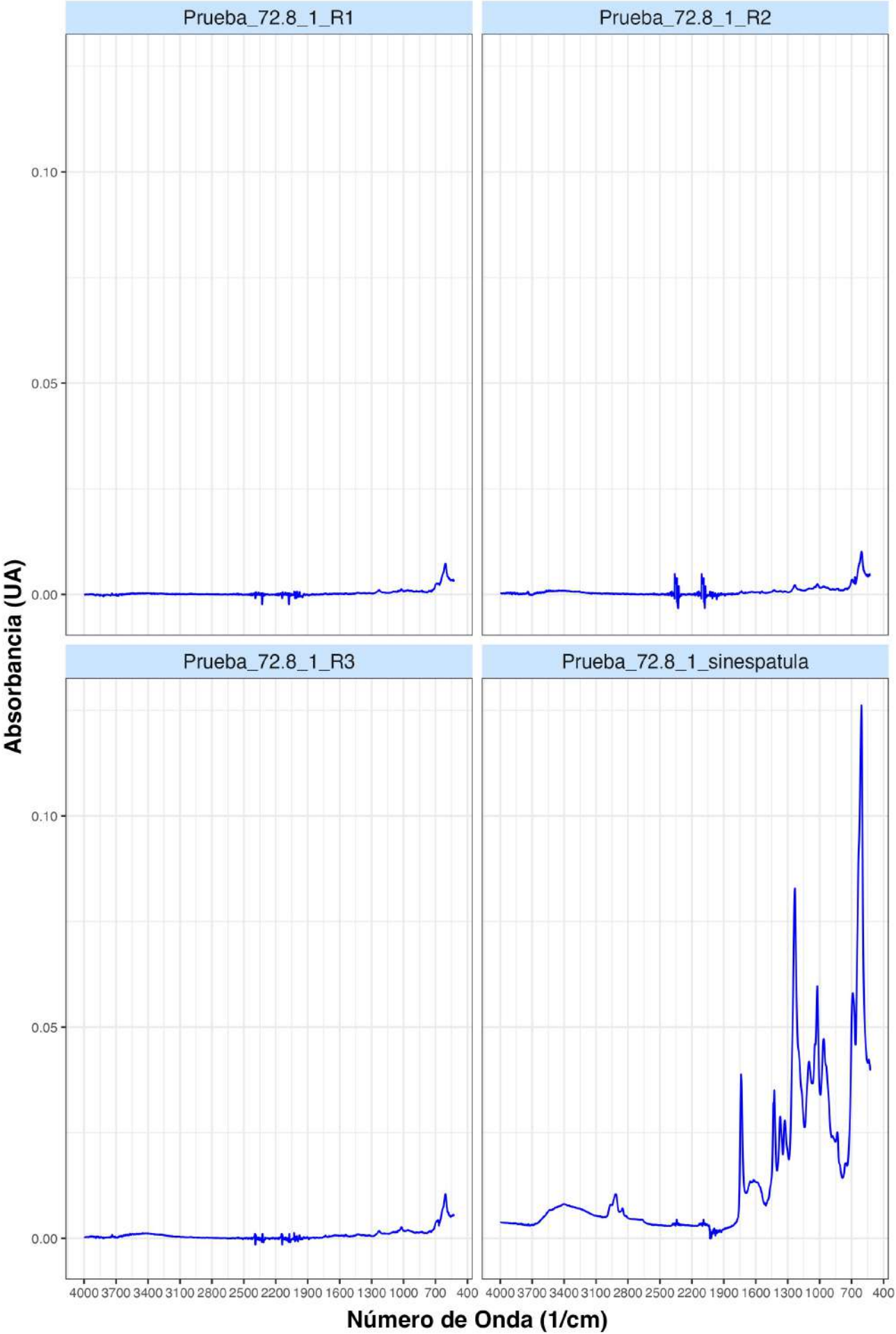
Espectros para Plano 72.8.1962 - Parte 2 de 3



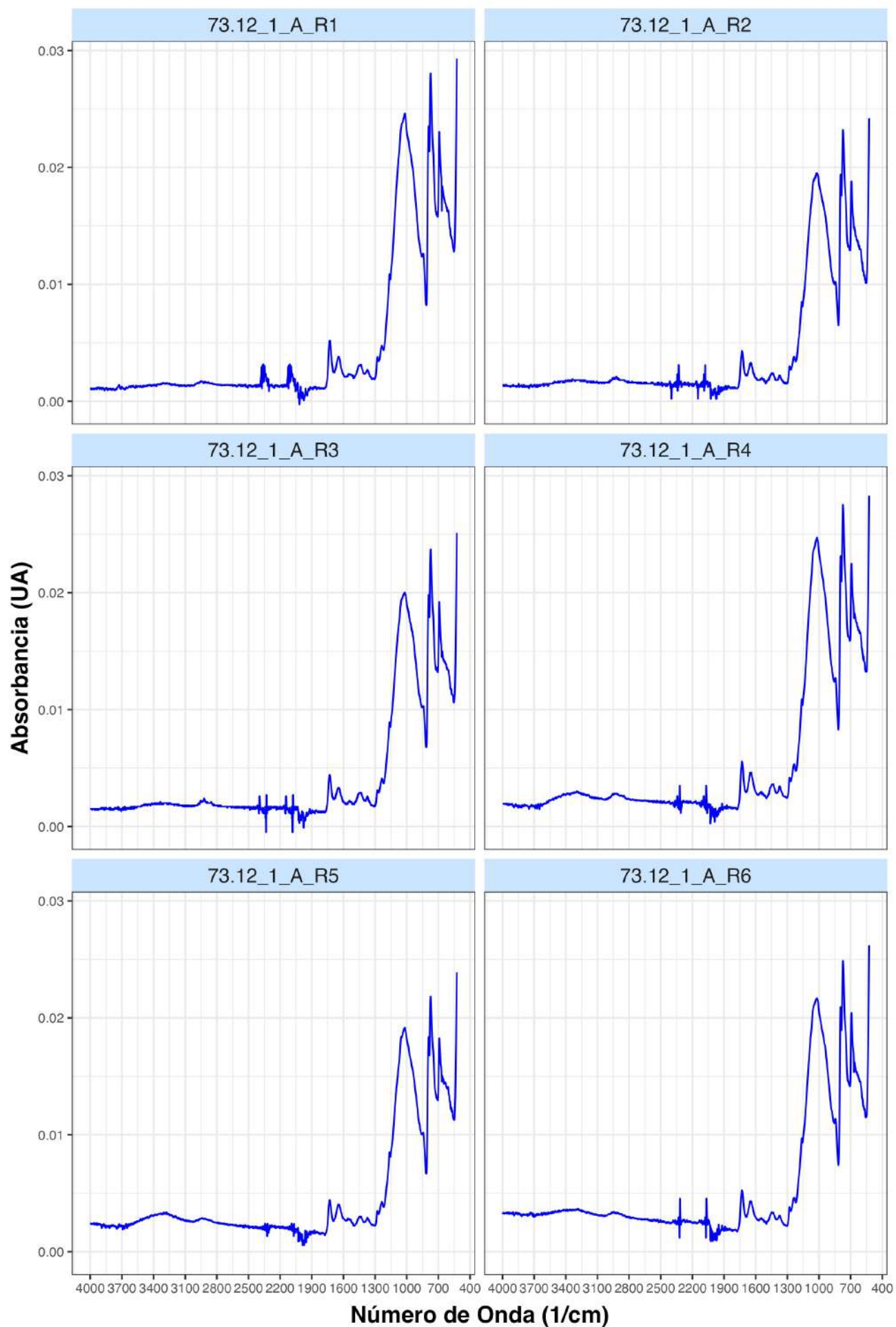
Espectros para Plano 72.8.1962 - Parte 3 de 3



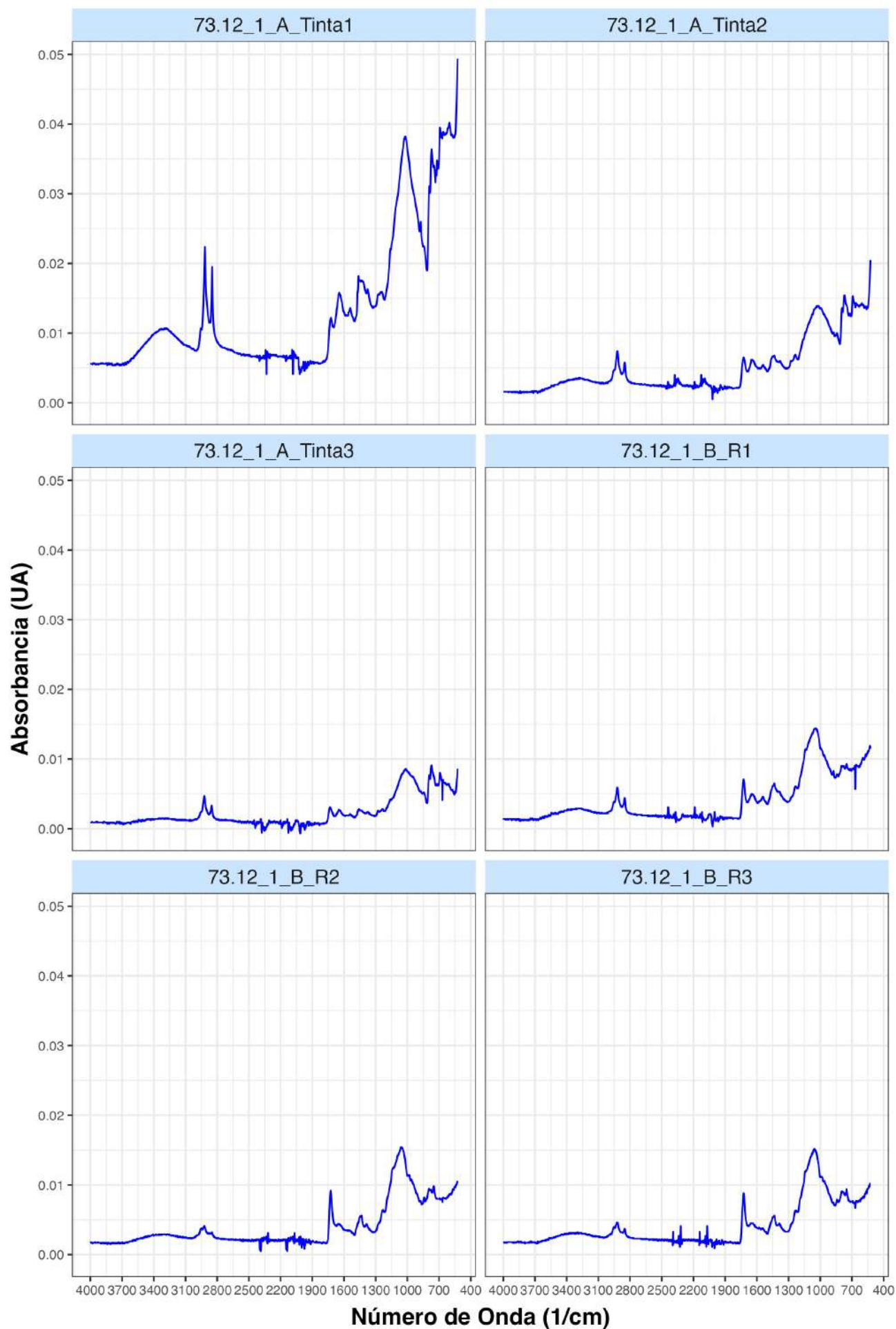
Espectros para Plano 72.8.1962p - Parte 1 de 1



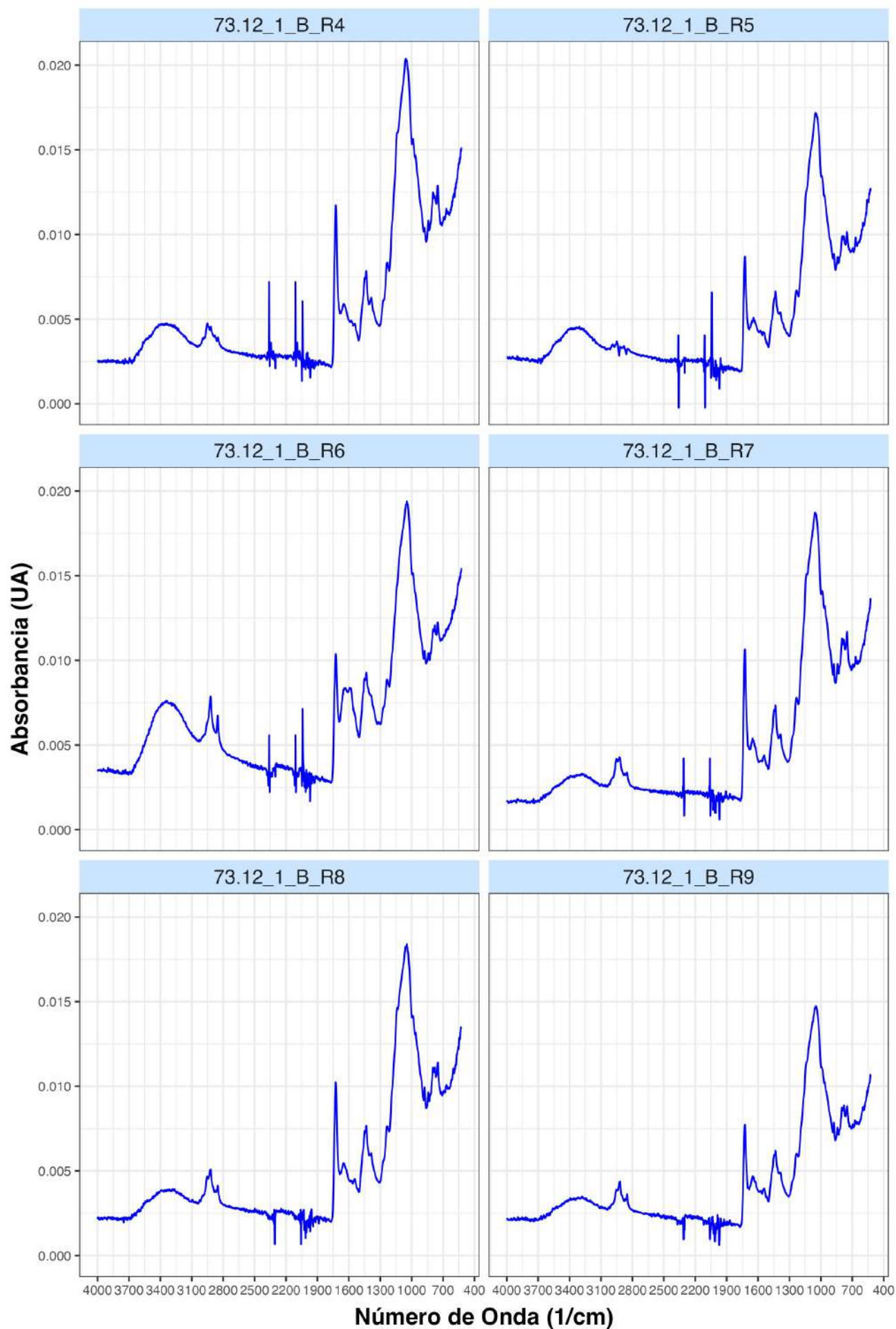
Espectros para Plano 73.12 - Parte 1 de 5



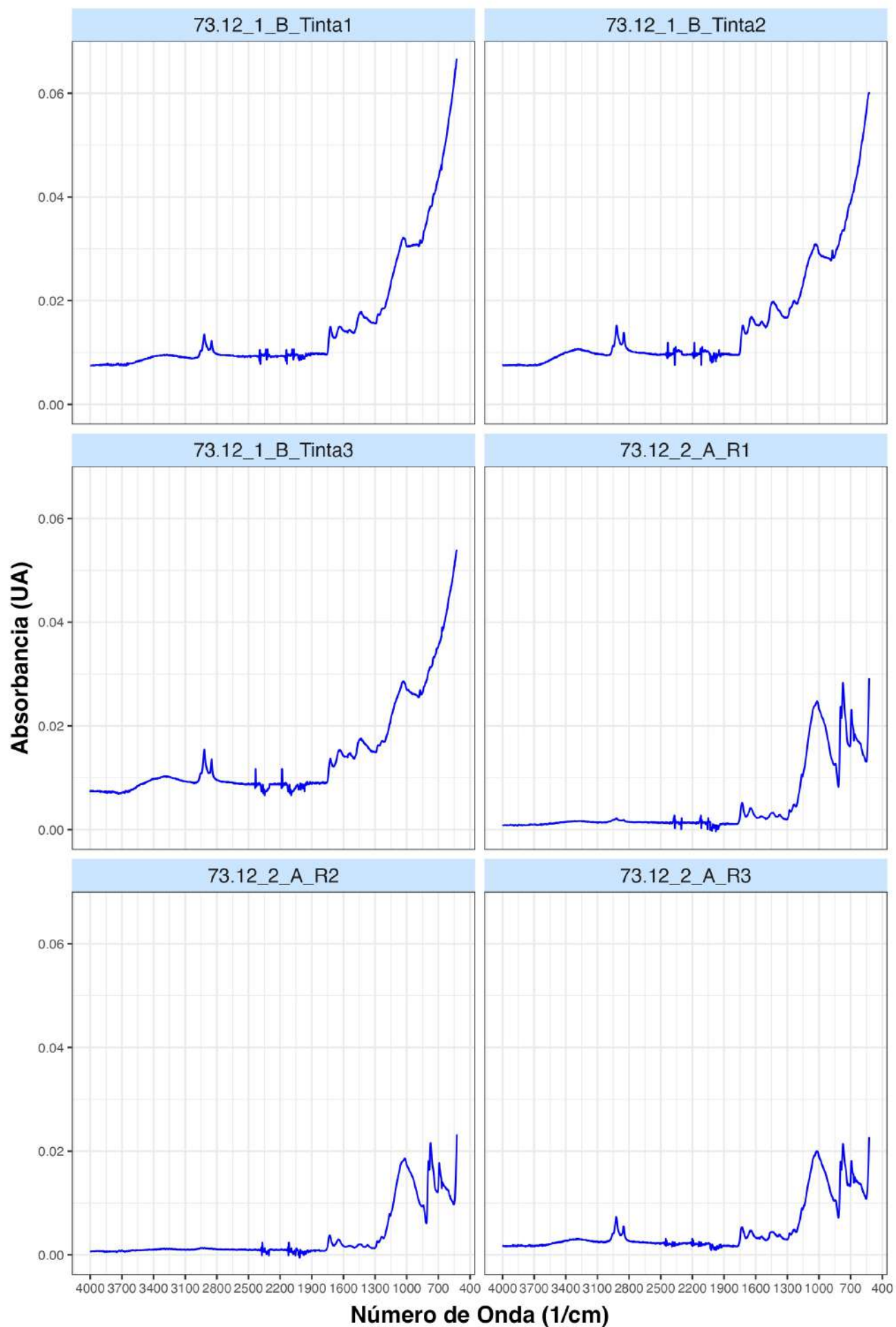
Espectros para Plano 73.12 - Parte 2 de 5



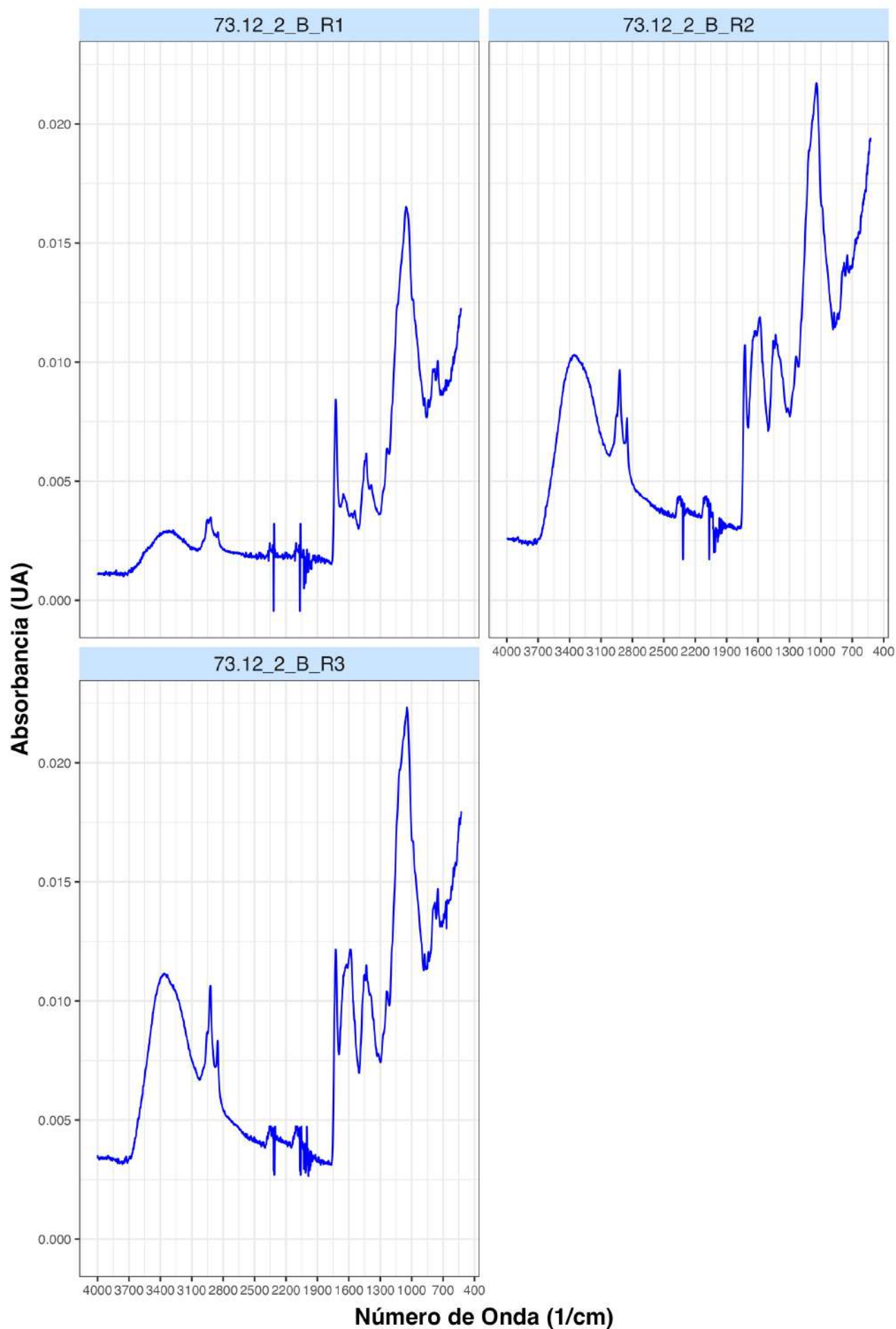
Espectros para Plano 73.12 - Parte 3 de 5



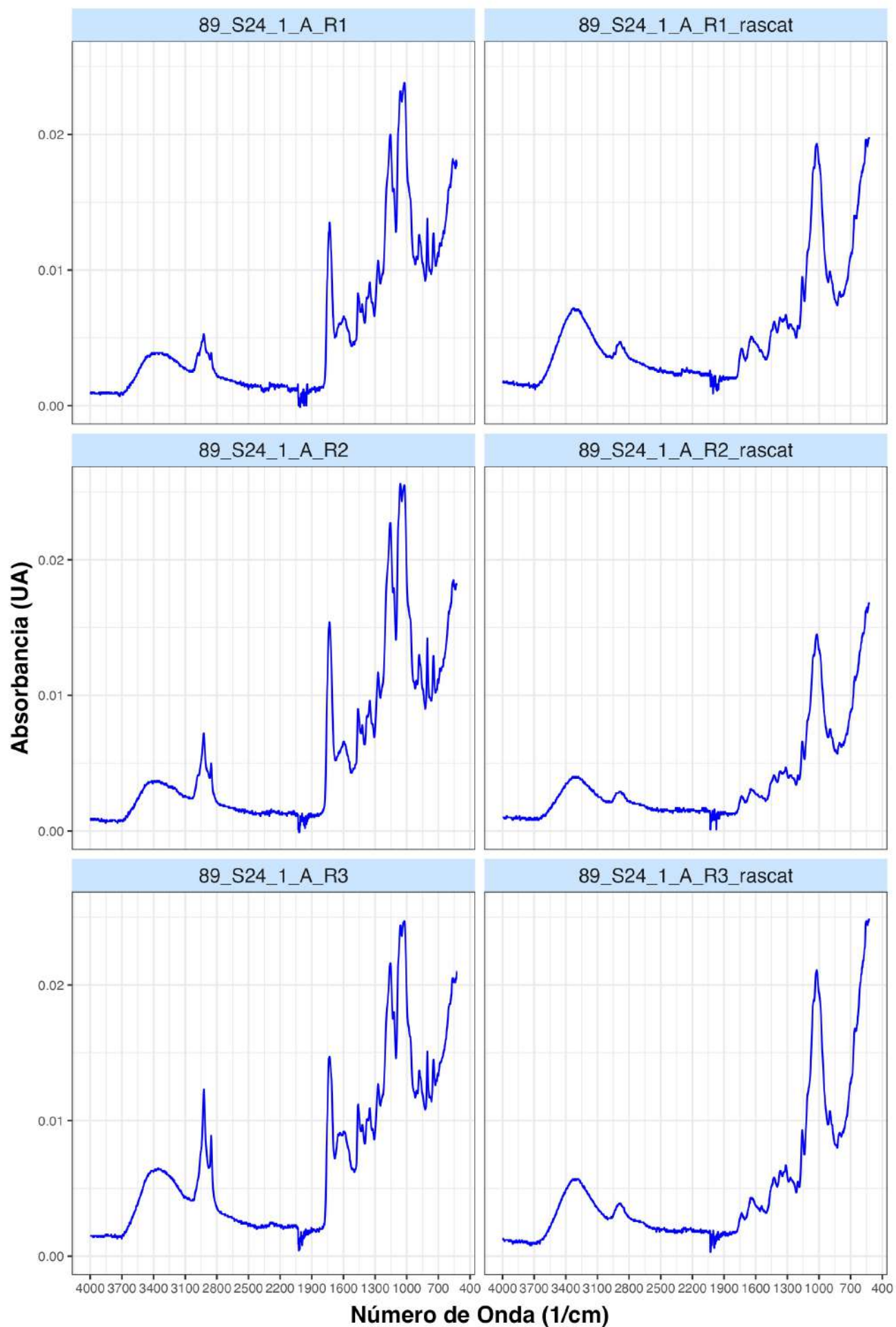
Espectros para Plano 73.12 - Parte 4 de 5



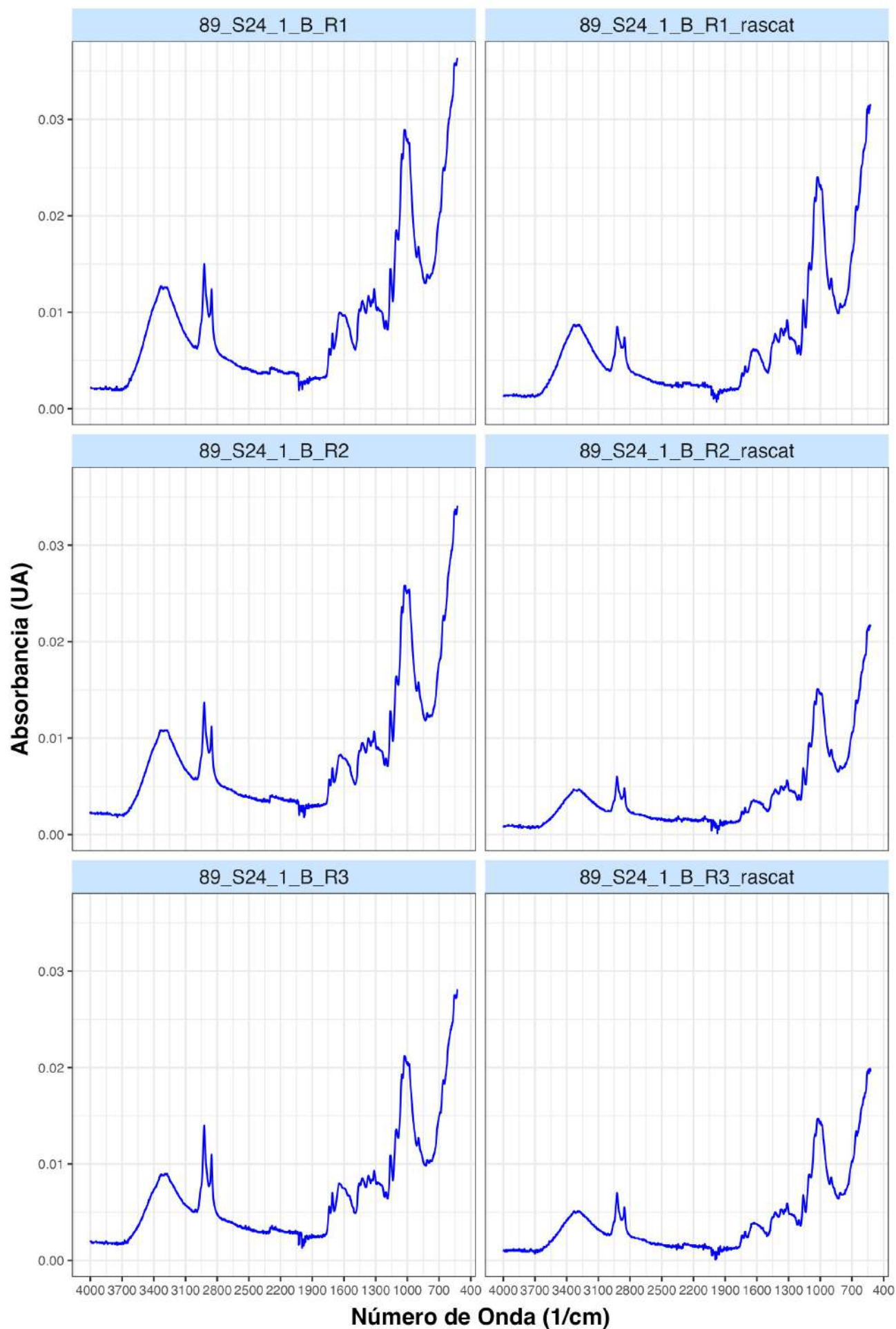
Espectros para Plano 73.12 - Parte 5 de 5



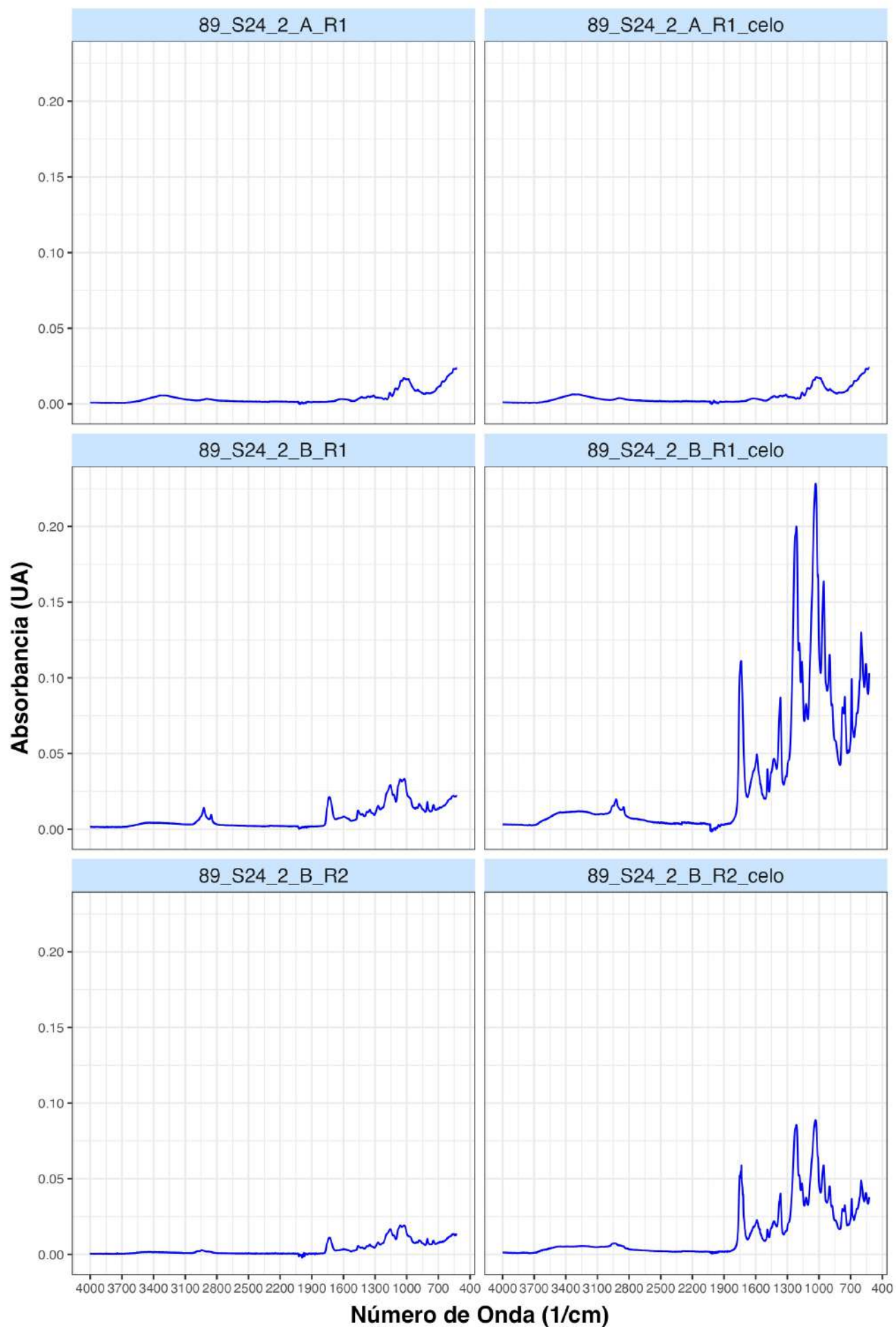
Espectros para Plano 89_S24 - Parte 1 de 4



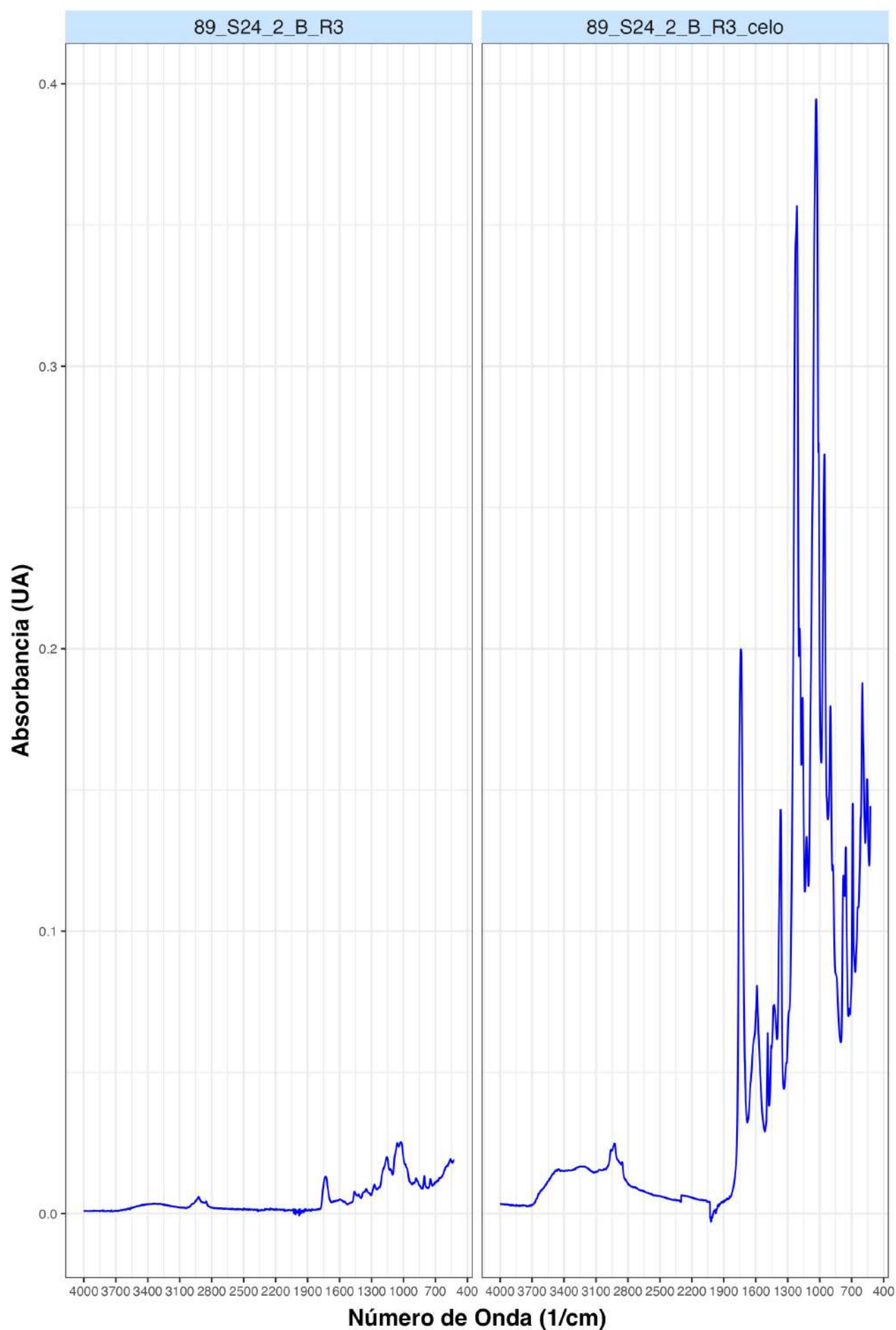
Espectros para Plano 89_S24 - Parte 2 de 4



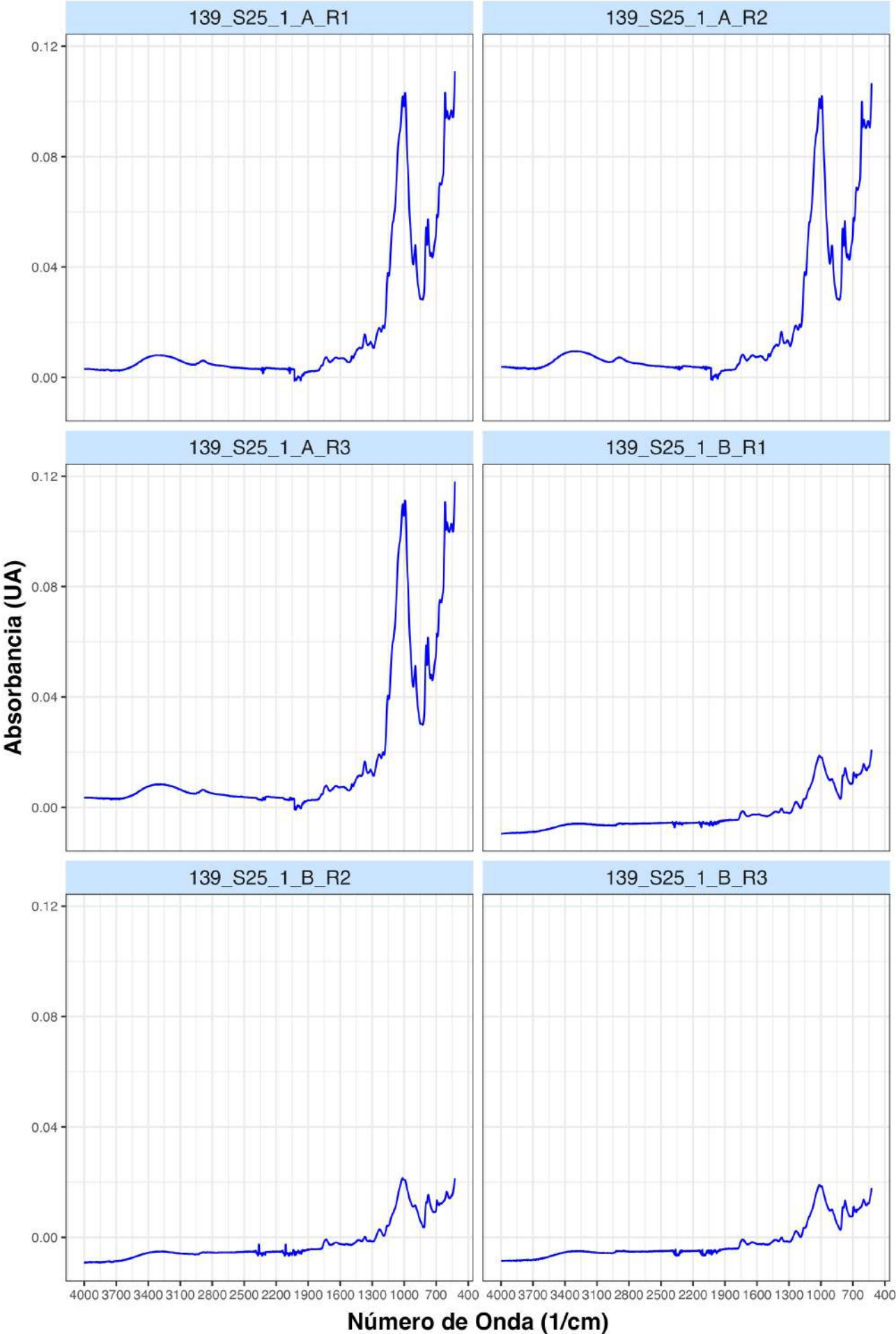
Espectros para Plano 89_S24 - Parte 3 de 4



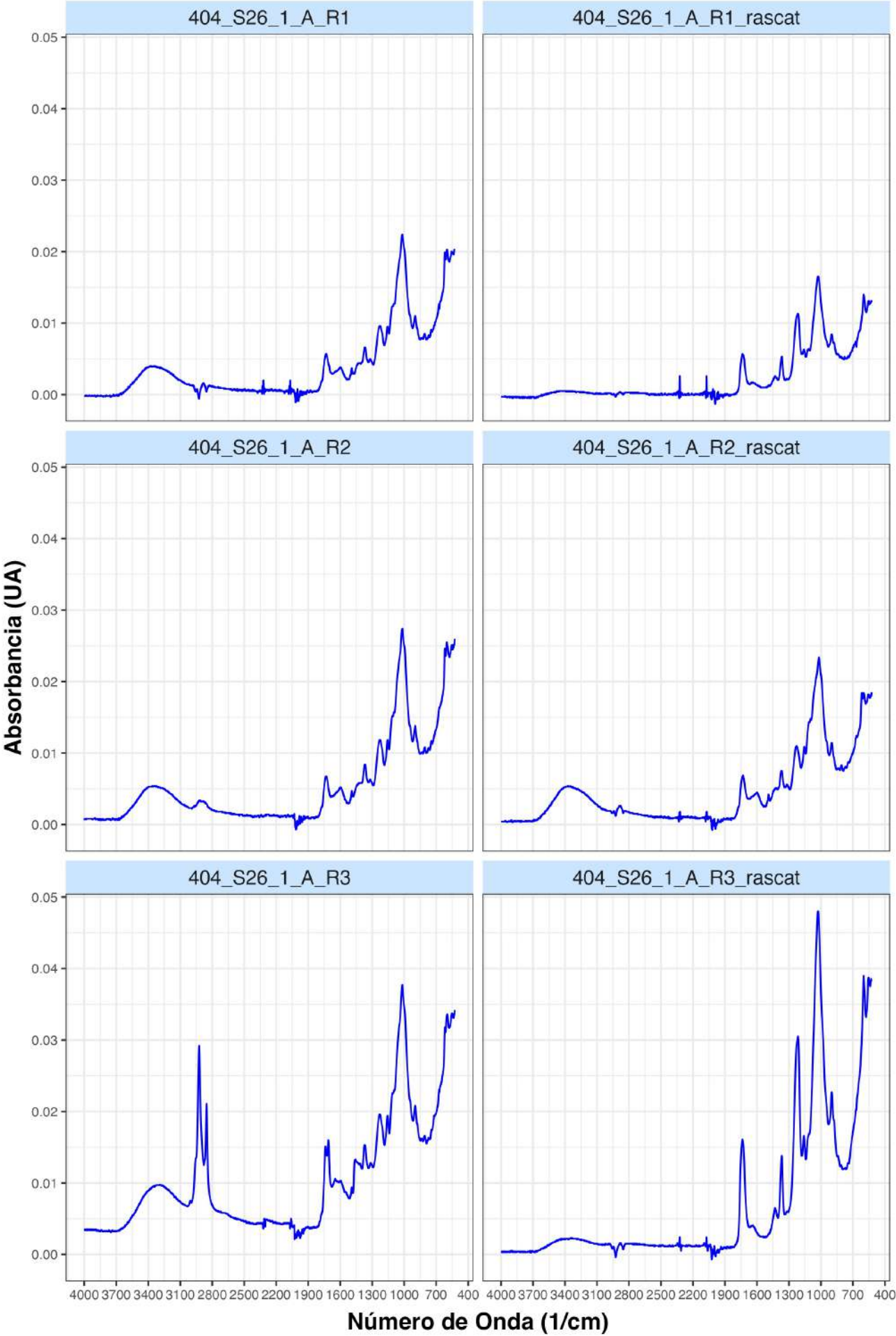
Espectros para Plano 89_S24 - Parte 4 de 4



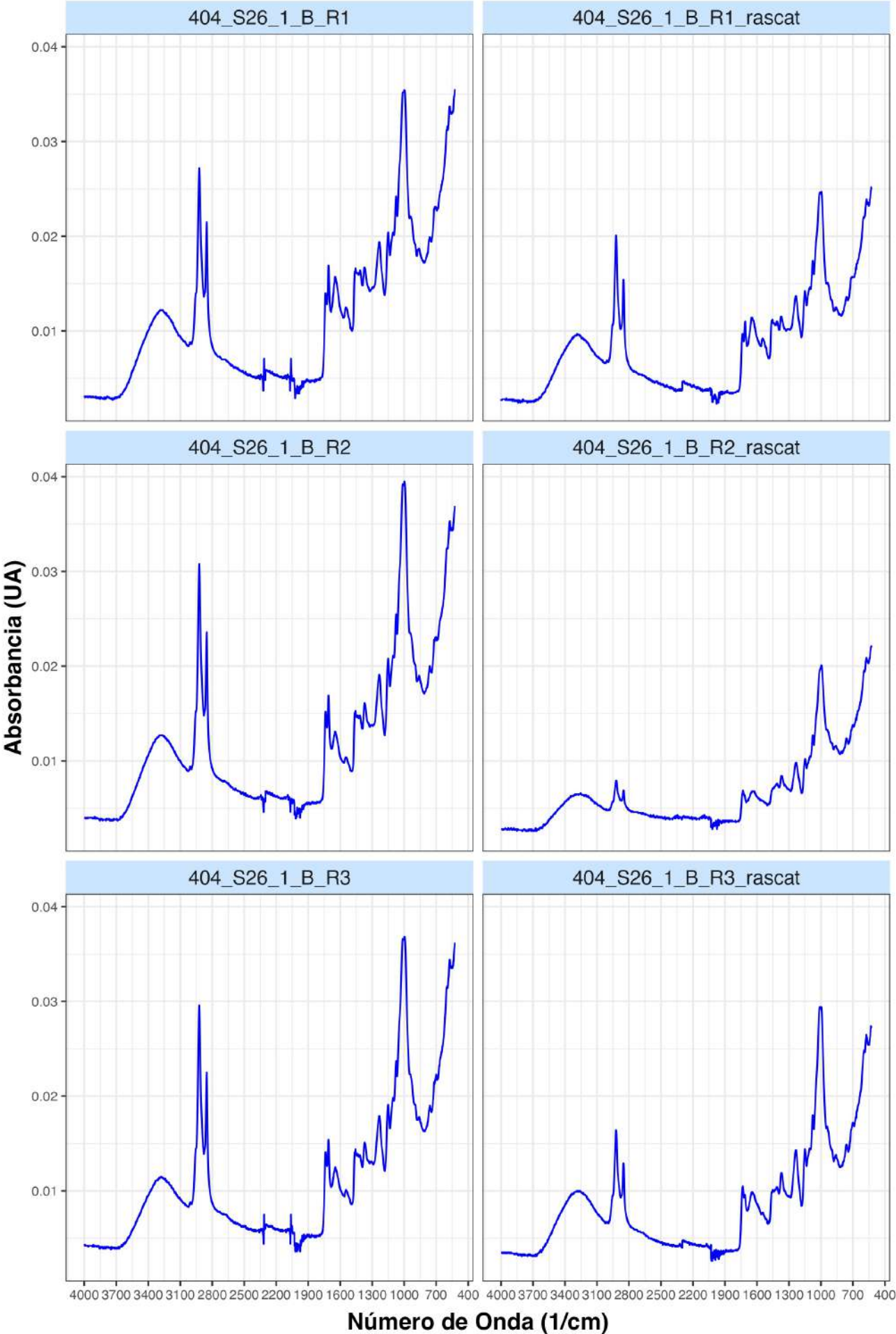
Espectros para Plano 139_S25 - Parte 1 de 1



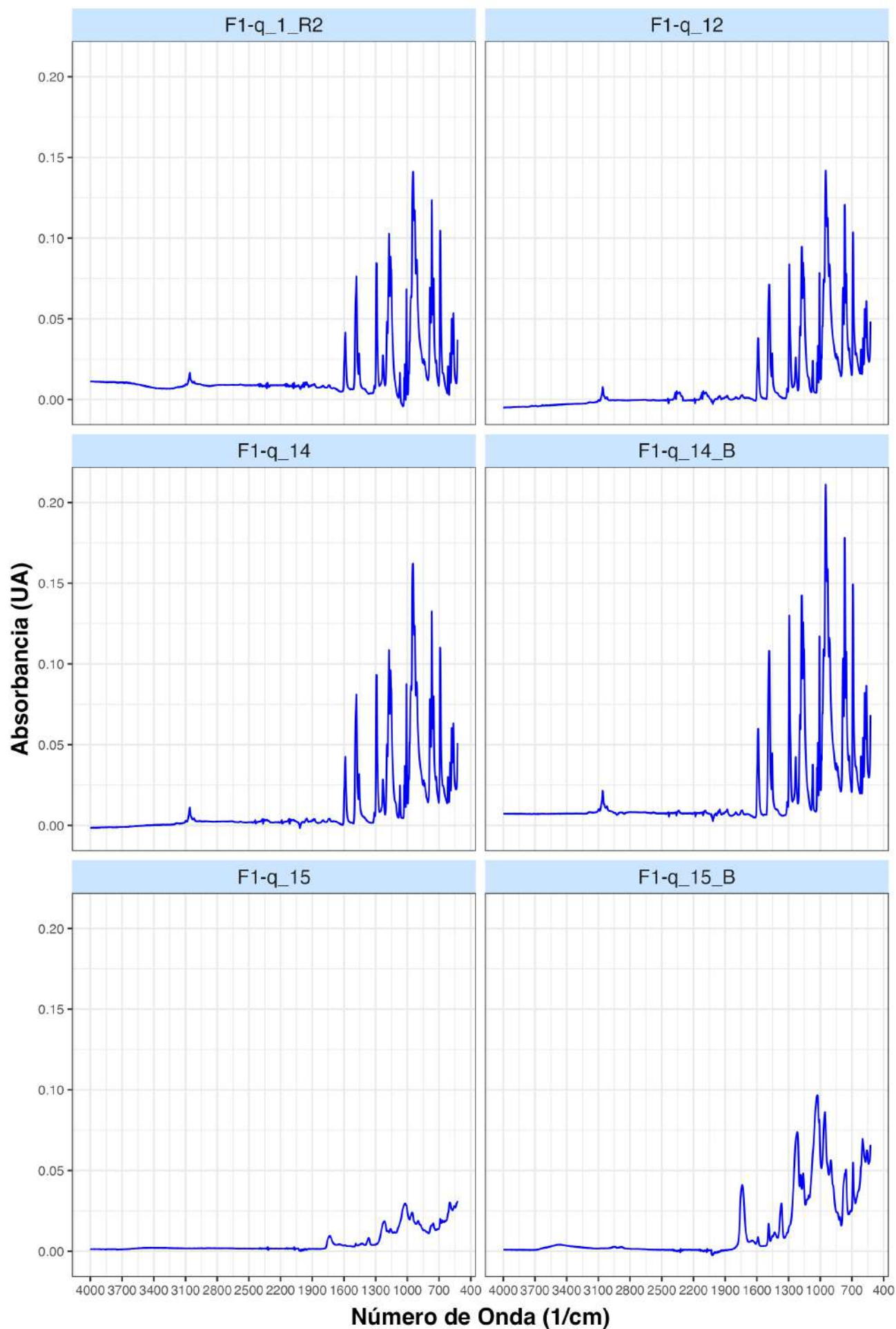
Espectros para Plano 404_S26 - Parte 1 de 2



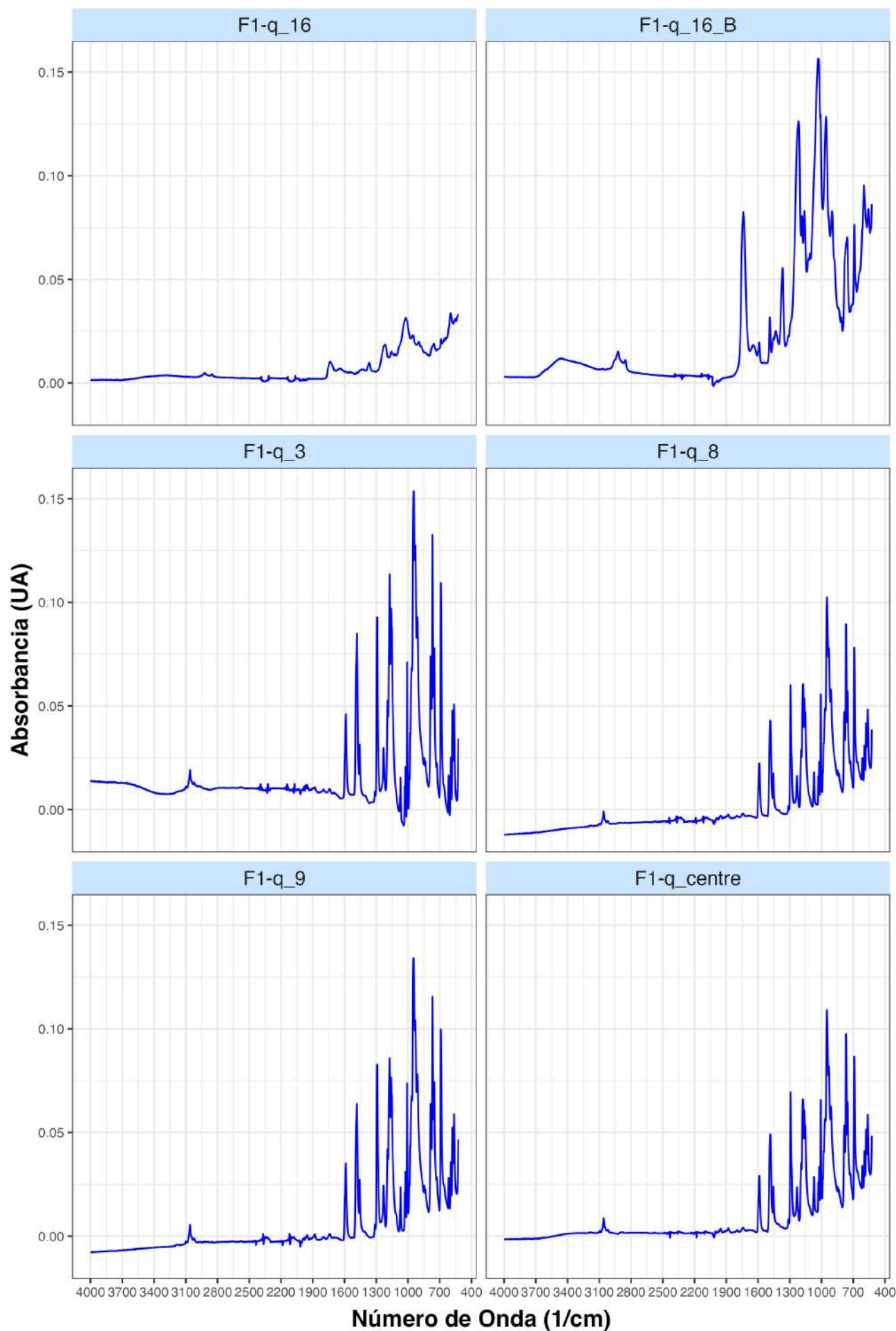
Espectros para Plano 404_S26 - Parte 2 de 2



Espectros para Plano F1-q - Parte 1 de 3



Espectros para Plano F1-q - Parte 2 de 3



Espectros para Plano F1-q - Parte 3 de 3

