



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

A La Plata évszakos hidrológiai változásainak összehasonlítása a GRACE modellek eredményeivel

Készítette:

Kiss Annamária, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem,
Építőmérnöki Kar, Földmérő- és Térinformatikai mérnök mesterképzési szak

Konzulens:

Dr. Földvály Lóránt, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem,
Általános- és Felsőgeodézia Tanszék

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	1
2. GRACE	1
3. Adatsorok	3
4. Előfeldolgozás	4
4.1. A GRACE mérések előzetes feldolgozása.....	4
4.2. A vízmérce adatok előzetes vizsgálata	6
5. Szezonális görbék illesztése	9
5.1. Vízállás adatok	9
5.2. GRACE adatsorok	11
5.3. Kiegyenlítés	11
6. Eredmények	13
6.1. A vízmérce adatsorok kiegyenlítésének eredményei.....	13
6.2. A GRACE adatsorok kiegyenlítésének eredményei.....	18
6.3. A vízmérce és GRACE illesztések összehasonlítása.....	23
6.4. Az egyes kiegyenlítési módszerek összehasonlítása a teljes vízgyűjtő területére	29
7. Összegzés.....	31
Irodalomjegyzék.....	33

1. Bevezetés

A Föld gravitációs erőterét a földfelszín feletti és alatti tömegeloszlás határozza meg. Mivel azonban ez a tömegeloszlás időben nem állandó, a Föld gravitációs tere is folyamatosan változik. A változást okozó legfontosabb tömegátrendeződések:

- az atmoszféra tömegátrendeződései
- a hidroszféra tömegtranszportjai: óceáni áramlatok, a víz körforgása, krioszféra változásai
- a geoszférában: a földkéreg mozgásai, lemeztektonikai folyamatok, köpenyáramlások, a földmag mozgásai.

A gravitációs tér változása természetesen maga után vonja a nehézségi erőter, így annak kiemelt szintfelületének, a Földünk elméleti alakját definiáló geoid időbeli változásait is (Földváry, 2008).

A földi gravitációs tér periodikus változásainak meghatározásához nyújtanak segítséget a GRACE gravimetriai műholdpáros mérési adatai. A GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) immáron több mint 10 éve szolgáltat hónapos felbontású geoidmodelleket, melyek feldolgozásával megállapíthatjuk a nagyobb kiterjedésű tömegátrendeződéseket eredményező folyamatok, így pl. a kontinentális vízkészlet éves és féléves periódusú változásait (Ilk et al., 2005).

A La Plata vízgyűjtője az ötödik legnagyobb területű vízgyűjtő a Földön, így számos folyójának köszönhetően jelentős víztömegváltozások helyszíneként szolgál (Wikipedia). A vízgyűjtőterület argentin folyóiról rendelkezésünkre áll több vízmérce adata a 2002 és 2008 közötti időszakról. Mivel a folyók lefolyásainak mennyisége alapvetően a vízgyűjtő területén összegyűlt víztömeg függvénye, a GRACE mérési eredmények és a vízszintadatok között összefüggéseket kerestünk. Jelen munka keretében összehasonlítottunk hidrológiai adatokat és űrgravimetriai mérésekből levezetett tömegváltozásokat, különös hangsúlyt fektetve az éves periódusra.

2. GRACE

A GRACE műholdpár 2002. március 17-én indult útjára a NASA és a DLR közös kezdeményezéseként. A GRACE két, teljesen azonos műholdból épül fel, melyek egymást mintegy 220 km-re követve keringenek a Föld körül identikus, közel poláris, majdnem kör alakú pályáikon. A GRACE a műholdak közötti távolság mikrométeres pontosságú folyamatos mérésének köszönhetően alkalmas a nehézségi erőter vizsgálatára. Ugyanis a műholdak közötti távolságnak a változásaiból következtetni lehet a műholdak pályájáért felelős nehézségi erőter térbeli változásaira. Természetesen ehhez szükséges a GRACE holdak helyzetének pontos ismerete is, mely a GNSS technika segítségével nagy pontossággal megoldható.

Indításkor a GRACE műholdakat 485 km-es pályamagasságra állították, ahol már szükséges számításba venni a légköri fékezőhatást, amit a mesterséges holdak fedélzetén elhelyezett gyorsulásmérőkkel határoznak meg.



1. ábra - A GRACE műholdak

A műholdak speciális elrendezésének és az alacsony keringési magasságnak köszönhetően különösen érzékenyek a nehézségi erőter nagyobb és közepes hullámhosszú komponenseire valamint annak időbeli változásaira. A GRACE mérési adatai alapján geoidmodelleket, lényegében a C_{lm} , S_{lm} gömbfüggvény-együtthatókat határoznak meg, melyeket a fejlesztők havi felbontásban tesznek közzé, 120 fok-, illetve rendszám értékig. A hónapos geoidmodellek tökéletes alapot nyújtanak a geoid éves- és féléves periódusú változásainak vizsgálataihoz. A nehézségi erőter változásait okozó tömegátrendeződések közül az atmoszféra hatását a megbízható globális atmoszféra-modellek felhasználásával a GRACE méréseiből eltávolítják. Szárazföldi területen a nagytömegű átrendeződések elsősorban a hidrológiai folyamatokhoz, pontosabban azok éves periódusaihoz köthetők, így ezek számszerűsíthetők az űrgravimetriai mérésekből (Földváry, 2004).

3. Adatsorok

A GRACE műholdak mérési adataiból számított együttthatók a CSR (a Texasi Egyetem Űrkutató Központja) által közzé tett adatbázisból érhetők el. Jelen munkában összesen 65 hónapnyi C_{lm} , S_{lm} gömbfüggvény-együtthatóval dolgoztunk, a 2002 áprilisa és 2007 novembere közötti időszakból.

Az összehasonlításhoz szükséges vízmérce adatok is jellemzően erre az időszakra állnak rendelkezésünkre, túlnyomóan napi mintavételezési sűrűséggel, de előfordul óránkénti és havi felbontású adatsor is. A rendelkezésünkre álló hidrológiai adatok a La Plata vízgyűjtő argentin területén lévő 7 folyója mentén elhelyezkedő 21 állomáson elhelyezett vízmércék regisztrálásából származnak. Az alábbi táblázatban az egyes állomások folyók szerinti bontásban, az adott folyó torkolatától becsült távolságok növekvő sorrendjében találhatók. Az adattípus szerinti megkülönböztetés a mintavételezés gyakoriságára vonatkozik.

FOLYÓ/Állomás	ID	Távolság (km)	Szélesség	Hosszúság	Adattípus	Időszak
BERMEJO						
Puerto Velaz	2610	35	-26°39' D	-58°37' NY	napos	2002.01.-2008.12.
El Colorado	2602	124	-26°20'04" D	-59°21'45" NY	napos	2002.01.-2008.12.
Pozo Sarmiento	693	783	-23°08'26" D	-64°11'49" NY	napos	2002.01.-2008.12.
Aguas Blancas	604	826	-22°43'30" D	-64°21'53" NY	napos	2002.01.-2008.12.
Balapuca	605	858	-22°29'33" D	-64°27'49" NY	napos	2002.01.-2008.12.
GUALEGUAYCHÚ						
Ruta Prov.	3030	76	-32°26'42" D	-58°33'18" NY	napos	2002.01.-2008.12.
IGUAZÚ						
Perfil Tipo	3440	28	-25°40' D	-54°25' NY	napos	2002.01.-2008.12.
PARANÁ						
Timbúes	3316	279	-32°43'11" D	-60°43'34" NY	órás	2003.01.-2007.12.
Chapetón	3005	430	-31°38'48" D	-60°16'44" NY	napos	2002.01.-2008.12.
Chapetón	3005	430	-31°38'48" D	-60°16'44" NY	hónapos	2001.12.-2007.09.
Corrientes	3805	940	-27°27'55" D	-58°50'57" NY	napos	2002.01.-2008.12.
Corrientes	3805	940	-27°27'55" D	-58°50'57" NY	hónapos	2001.12.-2007.08.
Itatí	3862	1007	-27°15'59" D	-58°14'38" NY	hónapos	2001.12.-2007.08.
Ita Cajón	3452	1542	-25°36' D	-54°35' NY	hónapos	2001.12.-2007.08.
PILCOMAYO						
La Paz	631	626	-22°22'38" D	-62°31'23" NY	napos	2002.01.-2008.12.
SALADO						
Ruta Prov.	3216	34	-31°29' D	-60°47' NY	napos	2002.01.-2008.12.
Puente Ruta Prov.	811	563	-28°30'13" D	-62°52'53" NY	napos	2004.06.-2008.12.
Suncho Corral	804	655	-27°56'25" D	-63°26'23" NY	napos	2004.06.-2008.12.
Canal de Dios	810	951	-25°37'36" D	-63°57'00" NY	napos	2002.01.-2008.12.
URUGUAY						
Santo Tomé	3860	720	-28°32' D	-56°01' NY	napos	2002.01.-2008.12.
Garruchos	3857	791	-28°10'37" D	-55°38'31" NY	napos	2002.01.-2008.12.
San Javier	3449	856	-27°52' D	-55°08' NY	napos	2002.01.-2008.12.
El Soberbio	3442	978	-27°17'55" D	-54°11'37" NY	napos	2002.01.-2008.12.

1. táblázat - A hidrológiai állomások adatai

4. Előfeldolgozás

Ahhoz, hogy a GRACE mérési eredményei összehasonlíthatók legyenek a vízszintadatokkal, a műholdas mérésekből számított geoidundulációkat át kellett alakítanunk a víztömegváltozásokat kifejező alakra. Az adatsorok kapcsolatának megteremtéséhez mind a vízszint-, mind a vízkészletváltozások idősorára szinuszos görbéket illesztettünk.

4.1. A GRACE mérések előzetes feldolgozása

A Föld elméleti alakját definiáló geoid globális meghatározásához elengedhetetlenek a gravimetriai műholdak mérési adatai. A geoidot legegyszerűbben a vonatkoztatási ellipszoidhoz viszonyítva adhatjuk meg, mégpedig a geoid-ellipszoid távolságokkal, a geoidundulációkkal (Wahr, 2007):

$$N(\theta, \phi) = a \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^l \tilde{P}_{lm}(\cos \theta) (C_{lm} \cos(m\phi) + S_{lm} \sin(m\phi)) \quad (1)$$

ahol:

- $N(\theta, \phi)$ az adott koordinátájú pontban a geoid ellipszoid feletti magassága,
- θ a földrajzi szélesség kiegészítő szöge, ϕ a földrajzi hosszúság,
- a a forgási ellipszoid fél nagytengelyének hossza ($a = 6\,378\,137$ m),
- $\tilde{P}_{lm}$ az úgynevezett normalizált Legendre-függvény, ahol l és m a gömbharmonikusok foka és rendje,
- C_{lm} és S_{lm} a gömbfüggvény-együtthatók.

A geoid (definíció szerint) az időben változó nehézségi erőter egyik kiemelt potenciálfelülete. A földfelszín közeli rétegekben lejátszódó folyamatok miatt azonban a nehézségi erőter időben változónak bizonyul. A gömbfüggvény-együtthatók időbeli változásai, azaz ΔC_{lm} és ΔS_{lm} értékei a GRACE mérési eredményeiből számíthatók. Ezek segítségével a felszíni tömegátrendeződések meghatározhatók (Wahr, 2007):

$$\Delta \sigma(\theta, \phi) = \frac{a \rho_{ave}}{3} \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^l \frac{2l+1}{1+k_l} \tilde{P}_{lm}(\cos \theta) [\Delta C_{lm} \cos(m\phi) + \Delta S_{lm} \sin(m\phi)] \quad (2)$$

ahol ρ_{ave} a Föld átlagos sűrűsége ($\rho_{ave} = 5517$ kg/m³) és k_l a földkéreg rugalmasságát jellemző Love-féle szám.

A Love-számok értékeit az alábbi táblázat felhasználásával, lineáris interpoláció útján lehet meghatározni, $l = 200$ fokig (Wahr, 2007).

l	k_l
0	+0.000
1	+0.027
2	-0.303
3	-0.194
4	-0.132
5	-0.104
6	-0.089
7	-0.081
8	-0.076
9	-0.072
10	-0.069
12	-0.064
15	-0.058
20	-0.051
30	-0.040
40	-0.033
50	-0.027
70	-0.020
100	-0.014
150	-0.010
200	-0.007

2. táblázat - A Love-számok néhány értéke

A $\Delta\sigma(\theta, \phi)$ értékeket a hidrológiai állomások helyén határoztuk meg $l = 30$ fokig, elkerülendő a GRACE mérési pontatlanságait magasabb foks számokon.

A GRACE műholdak pályájának nyomvonala azonban túlzottan befolyásolja a mérésekből meghatározott geiodmodellt, így ezt a hatást utólagos simítással osztják szét a környező területekre. A hatás csökkentésére Gauss-féle szűrőt alkalmaztunk $r = 700$ km-es sugárral, ami összhangban van a GRACE felbontásával és a 30 fokig és rendig számított sorral (Wahr, 2007). Az előző egyenlet így az alábbi formára bővül:

$$\overline{\Delta\sigma}(\theta, \phi) = \frac{a\rho_{ave}}{3} \sum_{l,m} \frac{2l+1}{1+k_l} W_l \tilde{P}_{lm}(\cos \theta) [\Delta C_{lm} \cos(m\phi) + \Delta S_{lm} \sin(m\phi)] \quad (3)$$

ahol:

$$W_0 = 1 \quad (4)$$

$$W_1 = \frac{1 + e^{-2b}}{1 - e^{-2b}} - \frac{1}{b} \quad (5)$$

$$W_{l+1} = -\frac{2l+1}{b}W_l + W_{l-1} \quad (6)$$

$$b = \frac{\ln(2)}{1 - \cos(r/a)} \quad (7)$$

Ahhoz viszont, hogy a GRACE és a vízmérce adatok érdemben összehasonlíthatóak legyenek, szükséges a felszíni tömegátrendeződéseknek a vízszintre gyakorolt hatásának kiszámítása, melyet egy egyszerű osztással meg lehet oldani (Ilk et al., 2005):

$$\Delta h(\theta, \phi) = \frac{\overline{\Delta \sigma}(\theta, \phi)}{\rho_w} \quad (8)$$

ahol $\Delta h(\theta, \phi)$ a vízmérce-állomások helyén számított víztömegváltozásnak megfelelő vízoszlop magasság méterben, $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$ pedig a víz sűrűsége. Viszont azt figyelembe kell venni, hogy a GRACE szűrés utáni ~670 km-es térbeli felbontása miatt nem tekinthetjük az állomások pontjaira számított vízkészletváltozásokat olyan egyértelmű értékeknek, mint a vízszintadatokat.

4.2. A vízmérce adatok előzetes vizsgálata

A vízmérce adatok felhasználhatósága a vizsgálat céljaira erősen függ a hidrológiai állomás helyétől. A vízgyűjtő egyes területein ugyanis intenzív a vízszabályozás. Értelemszerűen egy-egy duzzasztó utáni folyószakaszon nem várhatunk éves periódusú vízszintingadozást, hiszen a vízállást alapvetően a szabályozás alakítja ki.



2. ábra - A La Plata vízgyűjtője a vízmérce állomásokkal

A La Plata területének és folyóinak a fenti szempont alapján végzett vizsgálata az alábbi eredményekre vezetett:

- A La Plata területe alatt helyet foglaló Guaraní a Föld egyik legnagyobb víztározó rendszere, mely jelentősen befolyásolja a felette futó folyók vízszintjeit. Alapvetően a felszín alatti víz hozzájárul a folyó vízhozamához, annak így egy alap vízszintet biztosítva; viszont például áradás időszakában a folyó vize a tározóba kerül, így vízszintje kiegyenlítődik. A La Plata déli területét az utóbbi években szárazság jellemezte, melynek következtében a folyók tápláltak vízzel a Guaraní tározóját. Összességében a felszín alatti víztározó jelenléte miatt több folyó vízszintjeinek adatsorából hiányzik a periodikus ismétlődés (Wikipedia).
- A Paraná felső folyásának kedvezőtlen eredményeiért a fentebb említett Guaranin kívül a folyón létesített nagy gátak (Itaipú, Yaciretá), víztározók, valamint az Iguazú-vízesés tehetősk felelőssé. Ezek ugyanis mind felborítják a természetes ciklust (Wikipedia).

- Az Uruguay folyó állomásaira is hatással van a Guarani, valamint e folyó mentén is létesítettek két nagy gátat: a Salto Grande és az Itá gátakat, ezek mellett a Moconá-vízesés is befolyásolja a vízjárást (Wikipedia).
- A Salado folyását is befolyásolja a Guarani, valamint a Cabra Corral gát és egyéb víztározók, öntözési csatornák, folyószabályozások (Wikipedia).
- Perfil Tipo állomás közvetlenül az Iguazú-vízesés közelében helyezkedik el, valamint a Guarani erre a területre is kiterjed, így a folyó vízszintjeire nem érdemes szinuszos görbe illesztését megkísérelni.
- Az Uruguay mellékfolyójának, a Guauguaychúnak 3030-as állomása is egy az egyben a víztározó területére esik, így a mérési eredmények ez esetben is nagy szórást mutatnak.
- A Bermejo és Pilcomayo folyók az összes fenti vízállást befolyásoló tényező hatásai alól mentesek, nincsenek szabályozva, nagyobb gátakat, víztározókat sem létesítettek rajtuk, valamint a Guarani sem érinti folyásuk útját.

A vízszintmérési adatok vizsgálatával arra a következtetésre jutottunk, hogy ott érdemes a gravimetriai műholdas adatokkal összehasonlítást végezni, ahol a mérési adatok elviekben tükrözhetik a víz természetes körforgásának éves ciklusát. Ezen állomások esetében a vízmérce adatsorra jó eséllyel illeszthető periodikus görbe, mely nagy valószínűséggel a GRACE mérési adataiból számított tömegváltozások okozójaként azonosítható.

Vizsgálatainkat így a továbbiakban a Bermejo és Pilcomayo folyók 6 állomására korlátozzuk.

5. Szezonális görbék illesztése

A vízmérce és a GRACE adatsorok különbözőségéből adódóan eltérő módszereket találtunk ideálisnak a kiegyenlítéshez, melyet minden esetben iteratív úton oldottunk meg. Az alábbiakban az alkalmazott eljárásokat ismertetem.

5.1. Vízállás adatok

A Bermejo és Pilcomayo folyók állomásainak adatsorai jól tükrözik a vízszintek éves változásait, bár még ezen esetekben is szembetűnő, hogy ha a legkisebb négyzetek módszerével kívánunk azokra görbéket illeszteni, a javítások nem lesznek normális eloszlásúak. Ezért szükség volt olyan kiegyenlítési módszert keresnünk, melynek nem feltétele a maradék ellentmondások normális eloszlása. A robusztus becslési eljárások elve ugyan hasonlít a legkisebb négyzetek módszerére, azonban a durva hibák jelenlétére kevésbé érzékenyek, így egy-egy kiugró érték nem torzítja el a becslést (Tóth, 2004; Závoti, 1999). A robusztus kiegyenlítés ugyanis visszacsatoló súlyozással a javítások függvényében a durva hibásnak vélt adatok súlyait fokozatosan csökkenti, így minél inkább kiugró egy érték, annál kisebb súllyal fog részt venni a kiegyenlítésben, azaz kevésbé befolyásolja annak eredményét (Soha, 1986).

A mi esetünkben azt tapasztaltuk, hogy a vízállások maximumainál több, az átlagnál jóval magasabb érték is megjelenik. Két különböző súlyfüggvény felvételével kapott eredményeket elemeztünk. Az egyik súlyfüggvény a hibák négyzetének reciprokfüggvénye:

$$p = \frac{1}{v^2} \quad (9)$$

Ez a függvény azonban 0 értékű hibánál végtelen nagy súlyt eredményez, így szükség van a súlyfüggvény egy általunk választott értékben történő limitálására. Ezt úgy oldottuk meg, hogy az adott iterációs lépésben éppen aktuális hibák szórását (σ_v) meghaladó hibák esetében az azokra eső súlyt meghagytuk $\frac{1}{v^2}$ -nek, az annál kisebb hibáknál pedig $\frac{1}{\sigma_v^2}$ súlyt vettünk fel. Így a súlyfüggvény alakja:

$$p = \begin{cases} \frac{1}{v^2}, & \text{ha } |v| > \sigma_v \\ \frac{1}{\sigma_v^2}, & \text{ha } |v| \leq \sigma_v \end{cases} \quad (10)$$

A másik esetben a súlyfüggvény exponenciális:

$$p = \exp[-k_1 \left| \frac{v}{\sigma_v} \right|^{k_2}] \quad (11)$$

ahol a geodéziai gyakorlatban elterjedt értékeket használtuk: $k_1 = 0,05$; $k_2 = 4,4$ (Soha, 1986).

Itt nem volt szükség módosításokra, ugyanis az exponenciális függvény 0 értékű hibánál $p = 1$ súlyt ad, míg a nagyobb javításokra 0 és 1 közötti súlyértéket vesz fel.

Mindkét robusztus eljáráshoz a következő összefüggést használtuk a szinuszos görbe illesztéséhez (Földváry és Mészáros, 2009):

$$f(t) = A + Bt + C \sin(\omega_\epsilon t + \Phi_C) + D \sin(\omega_f t + \Phi_D) \quad (12)$$

ahol

- A az eltolás értéke
- B a lineáris trend
- C az éves amplitúdó
- Φ_C az éves fázis
- D a féléves amplitúdó
- Φ_D a féléves fázis
- t az aktuális időpont évben kifejezve (év+hónap/12+nap/365).
- $\omega_\epsilon = 1$ és $\omega_f = 1/2$, az éves-, illetve féléves periódusok.

5.2. GRACE adatsorok

A gravimetriai műholdas mérésekből átlagosan havonta kaptunk egy-egy vízkészletszintet, azaz jóval kevesebb adat áll rendelkezésünkre, mint a napi mintavételezésű hidrológiai állomások esetén. A GRACE adatok javításait normális eloszlásúnak feltételezve a legkisebb négyzetek módszerével végeztük el a kiegyenlítést. Ahhoz, hogy az illesztés az éves és féléves periódusú változásokat tükrözze, a következő összefüggést használtuk a kiegyenlítéshez:

$$f(t) = A + Bt + \frac{1}{\text{sinc}(1/12)} C \sin(\omega_{\epsilon} t + \Phi_C) + \frac{1}{\text{sinc}(1/6)} D \sin(\omega_f t + \Phi_D) \quad (13)$$

A képletben szereplő $A, B, C, \Phi_C, D, \Phi_D, t, \omega_{\epsilon}, \omega_f$ megegyeznek az 5.1. fejezetben írtakkal.

Az amplitúdók szorzója a szinusz kardinálisz függvény reciproka, mely a GRACE mérések átlagolódását hivatott korrigálni. Ugyanis azzal, hogy a GRACE modellekben egy-egy körülbelül hónapnyi időtartam mérései átlagolódnak, a periodikus változás a valódi értékénél kisebb változásként jelenik meg. A jelenséget az N darab mintavételezési periódus esetén $\frac{1}{\text{sinc}(1/N)}$ szorzóval lehet figyelembe venni. Mivel az éves periódusra 12 mérés jut, ott $(1/12)$; a féléves periódus pedig 6 részre lett bontva, így annak esetében $(1/6)$ a szinusz kardinálisz függvény argumentuma (Földvály, 2012).

5.3. Kiegyenlítés

Az adatsorok kiegyenlítése során tehát több új módszert is alkalmaztunk:

- vízmérce adatok robusztus kiegyenlítése:
 - reciprok súlyfüggvény
 - exponenciális súlyfüggvény felvételével
- GRACE adatok kiegyenlítése legkisebb négyzetek módszerével, az átlagolódásra korrigált formulával.

Érdekességként a kapott eredményeket összehasonlítottuk a diplomamunkám végeredményével. Ott ugyanis mindkét adatsorra ugyanazt a legkisebb négyzetes kiegyenlítést alkalmaztuk, tehát normálisnak feltételeztük a vízszintadatok eloszlását, valamint a GRACE méréseiből adódó átlagolódás hatását sem vettük figyelembe.

A kiegyenlítéshez az 5.1. és 5.2. pontok alapján adottak:

- a diagonális súlymátrixok: az átlójukban a reciprok- vagy az exponenciális súlyfüggvényből kapott értékek, illetve GRACE adatoknál egységmátrix
- az ismeretlen paraméterek vektora:

$$x = \begin{pmatrix} A \\ B \\ C \\ \Phi_C \\ D \\ \Phi_D \end{pmatrix}$$

A szükséges A alakmátrix elemeit a paraméterek parciális deriváltjaiból számíthatjuk; míg az l tisztatag vektor a mérési eredményeket, tehát a vízszintállásokat, illetve a GRACE méréseiből kapott vízoszlop magasságban kifejezett vízkészletváltozásokat tartalmazza.

A rendelkezésünkre álló adatokkal felírható a normálegyenlet (Detreköi, 1991):

$$x = (A^T * P * A)^{-1} (A^T * P * l) \quad (14)$$

Az $(A^T * P * A)$ normálmátrixot magas kondíciószáma miatt az úgynevezett Moore-Penrose pszeudoinverzrel invertáltuk, a szinguláris érték felbontás (SVD) alkalmazásával.

Mivel az illesztéshez használt egyenlet a paraméterek szempontjából nem lineáris, a kiegyenlítést iteratív úton oldottuk meg. Önkényes előzetes értékek felvételével indítottunk, majd a kiegyenlítésből nyert paraméterek a következő iterációs lépés előzetes értékeit adták. Addig folytattuk az iterálást, míg az $(n-1)$ -edik lépésből kapott érték és az n -edik lépés eredményeinek eltérése már elhanyagolható volt.

A kiegyenlítések elvégzése során azt is megfigyeltük, hogy az egyes iterációs lépésekben mekkora az eredeti adatsor és az illesztett görbe közötti korreláció értéke, valamint a robusztus eljárásoknál hogyan alakul a javítások konvergenciája.

6. Eredmények

A különféle alkalmazott kiegyenlítési eljárások eredményeit elsőként a hidrológiai adatsorra, majd a GRACE mérési eredményeire részletezem, végül pedig összehasonlítom a kapott eredményeket. Az illesztések statisztikáit és grafikonjait helyszűke miatt csupán a Bermejo és Pilcomayo folyók állomásainál mutatom be, de a számításokat valamennyi állomásra elvégeztük. Ennek eredményeit a 6.4. pontban ismertetem, de hidrológiailag értelmetlen jellegük miatt csak a módszertannal kapcsolatos észrevételeimet részletezem.

6.1. A vízmérce adatsorok kiegyenlítésének eredményei

A vízmérceadatokra illesztett szinuszos görbék adataiból jól látszik, hogy az egy folyó mentén elhelyezkedő állomásoknál mért éves amplitúdó a folyó torkolatához közeledve növekszik. Ez megfelel annak a jelenségnek, hogy a lehullott csapadék a folyó mentén egyre nagyobb víztömeget eredményez, így a torkolat felé haladva a vízszint fokozatosan magasabb lesz. Azt is megfigyelhetjük, hogy a fázisok annál nagyobbak, minél messzebb található az állomás a torkolattól, azaz az éves periódus a torkolathoz közel hamarabb jelenik meg, mint a folyók felső folyásánál.

Ha a robusztus eljárásokat vetjük össze a legkisebb négyzetek módszerével, látható, hogy a két robusztus kiegyenlítés a folyók felső folyásánál nagyon hasonló értékeket ad, míg a legkisebb négyzetes módszer ezektől eltérő eredményeket produkál. Az éves fázisok az első két esetben egyértelműen növekednek a torkolattól mért távolsággal, viszont legkisebb négyzetek módszere szerinti kiegyenlítés az ugyancsak torkolattól távolabbi állomásoknál már nem ad ilyen szembetűnő eredményt. Az éves amplitúdók a felső folyásnál a robusztus esetekben kisebbek, azaz a kiugró maximális értékek tényleg nem torzították el annyira a kiegyenlítést, mint az eredeti esetben. A korrelációk természetesen a legkisebb négyzetek módszerével végzett kiegyenlítésnél lettek pár századdal magasabbak, mivel ez a módszer alapvetően a javítások minimalizálására törekszik, akkor is, ha ez torzítja a becslés végeredményét.

Az alábbi táblázatokban az egyes kiegyenlítési módszerek eredményeit foglaltam össze.

Állomásnév	ID	Távolság (km)	Éves vízmérce amplitúdó (m)	Éves vízmérce fázis (nap)	Vízmérce korreláció
BERMEJO folyó					
Puerto Velaz	2610	35	2,522	359,2	0,8937
El Colorado	2602	124	2,330	359,7	0,8825
Pozo Sarmiento	693	783	0,783	1,2	0,7771
Aguas Blancas	604	826	0,450	2,0	0,8202
Balapuca	605	858	0,803	2,3	0,8447
PILCOMAYO folyó					
La Paz	631	626	0,501	7,7	0,7197

3. táblázat - Vízmérce illesztés robusztus módszerrel, exponenciális súlyfüggvénnyel

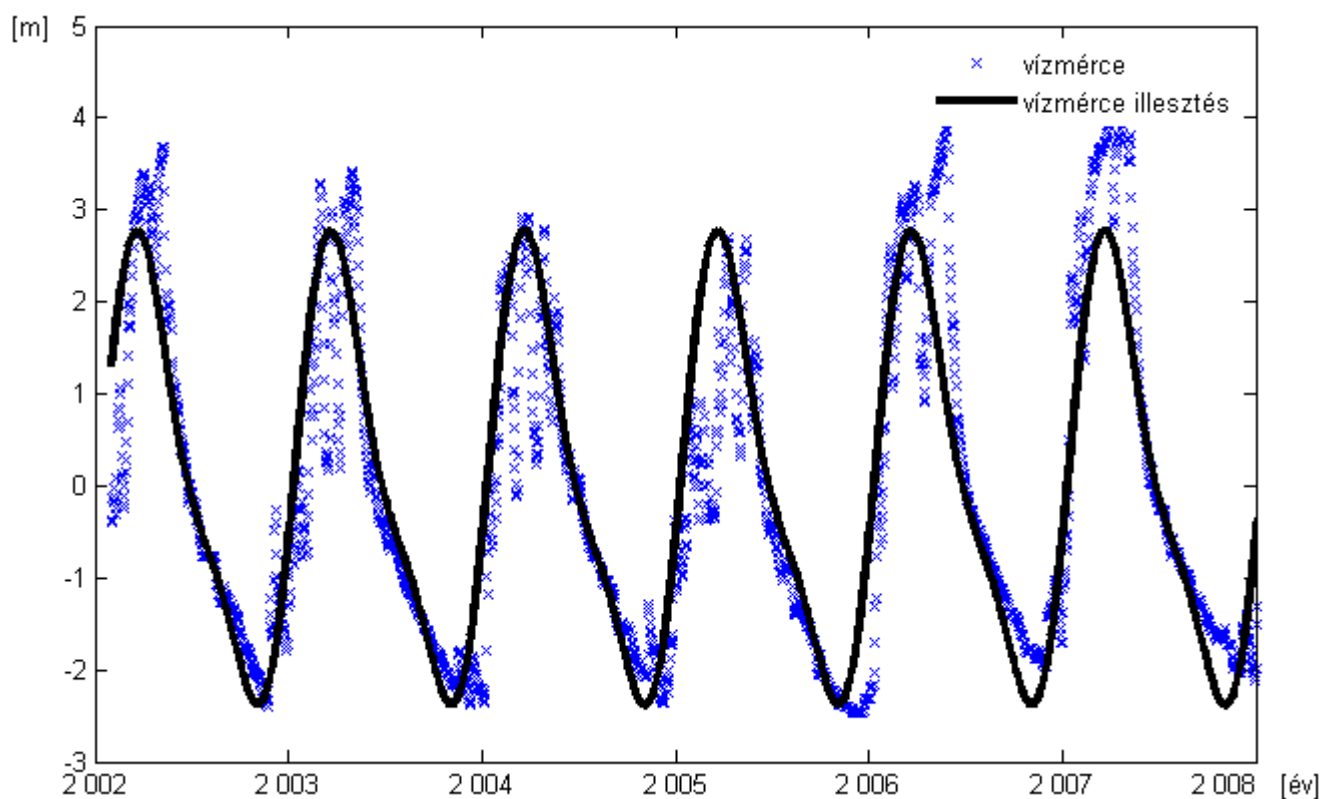
Állomásnév	ID	Távolság (km)	Éves vízmérce amplitúdó (m)	Éves vízmérce fázis (nap)	Vízmérce korreláció
BERMEJO folyó					
Puerto Velaz	2610	35	2,526	359,4	0,8928
El Colorado	2602	124	2,336	360,0	0,8821
Pozo Sarmiento	693	783	0,786	1,1	0,7771
Aguas Blancas	604	826	0,455	2,1	0,8201
Balapuca	605	858	0,810	2,4	0,8446
PILCOMAYO folyó					
La Paz	631	626	0,511	7,7	0,7190

4. táblázat - Vízmérce illesztés robusztus módszerrel, reciprok súlyfüggvénnyel

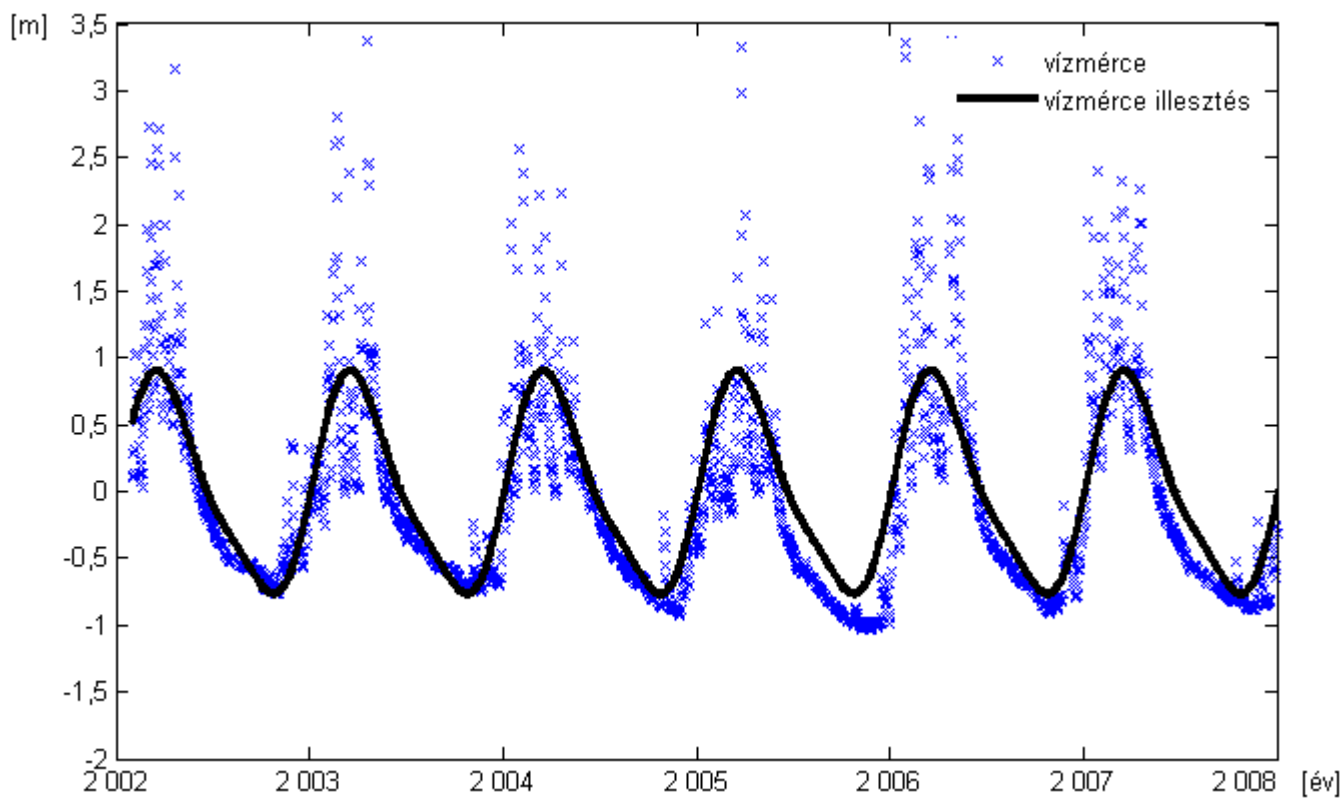
Állomásnév	ID	Távolság (km)	Éves vízmérce amplitúdó (m)	Éves vízmérce fázis (nap)	Vízmérce korreláció
BERMEJO folyó					
Puerto Velaz	2610	35	2,522	360,2	0,8970
El Colorado	2602	124	2,334	361,6	0,8869
Pozo Sarmiento	693	783	0,956	364,8	0,7793
Aguas Blancas	604	826	0,527	364,7	0,8195
Balapuca	605	858	0,916	364,5	0,8425
PILCOMAYO folyó					
La Paz	631	626	0,678	6,7	0,7225

5. táblázat - Vízmérce illesztés legkisebb négyzetek módszerével (diplomamunka)

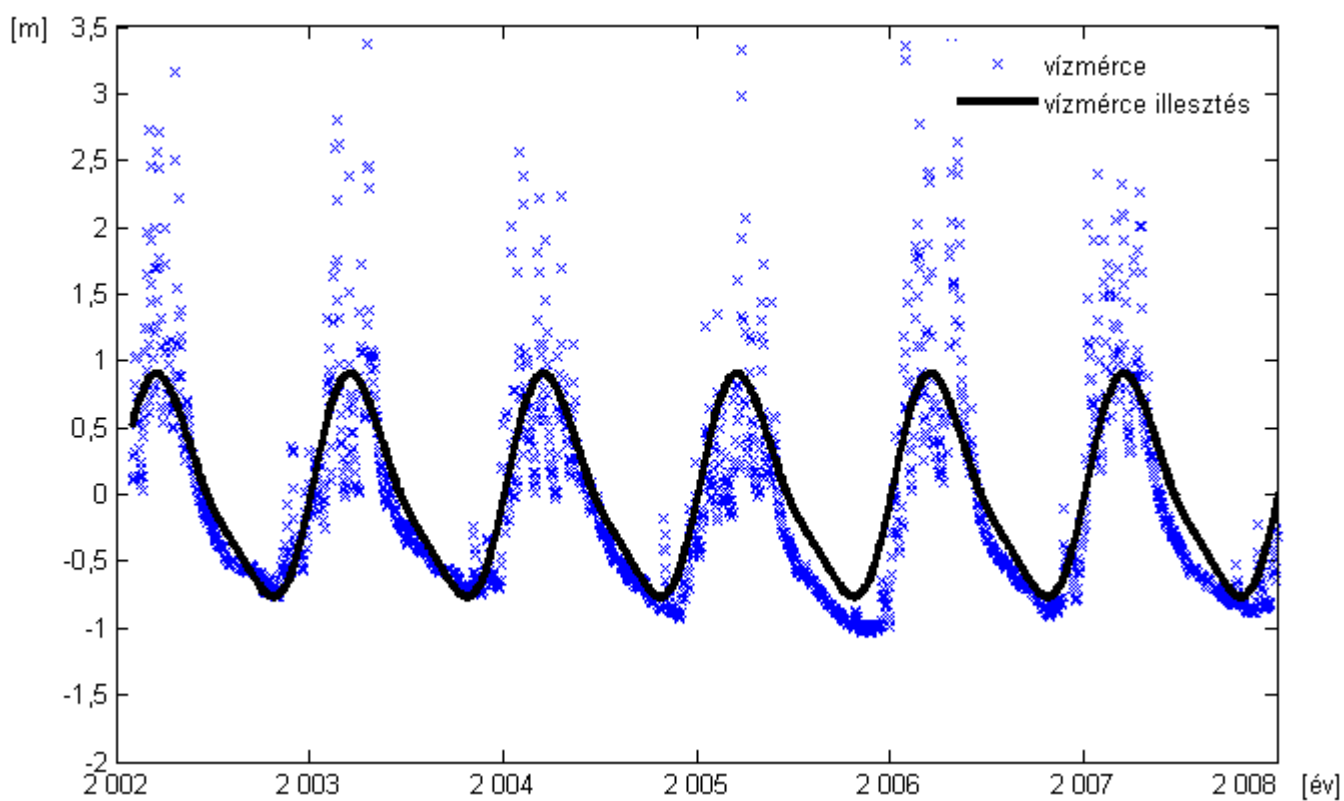
Mivel az egyes módszerek eredményei közötti eltérések az ábrázolásban nem szembetűnőek, ezért a következő grafikonokon csak az exponenciális robusztus illesztések eredményeit szemléltettem.



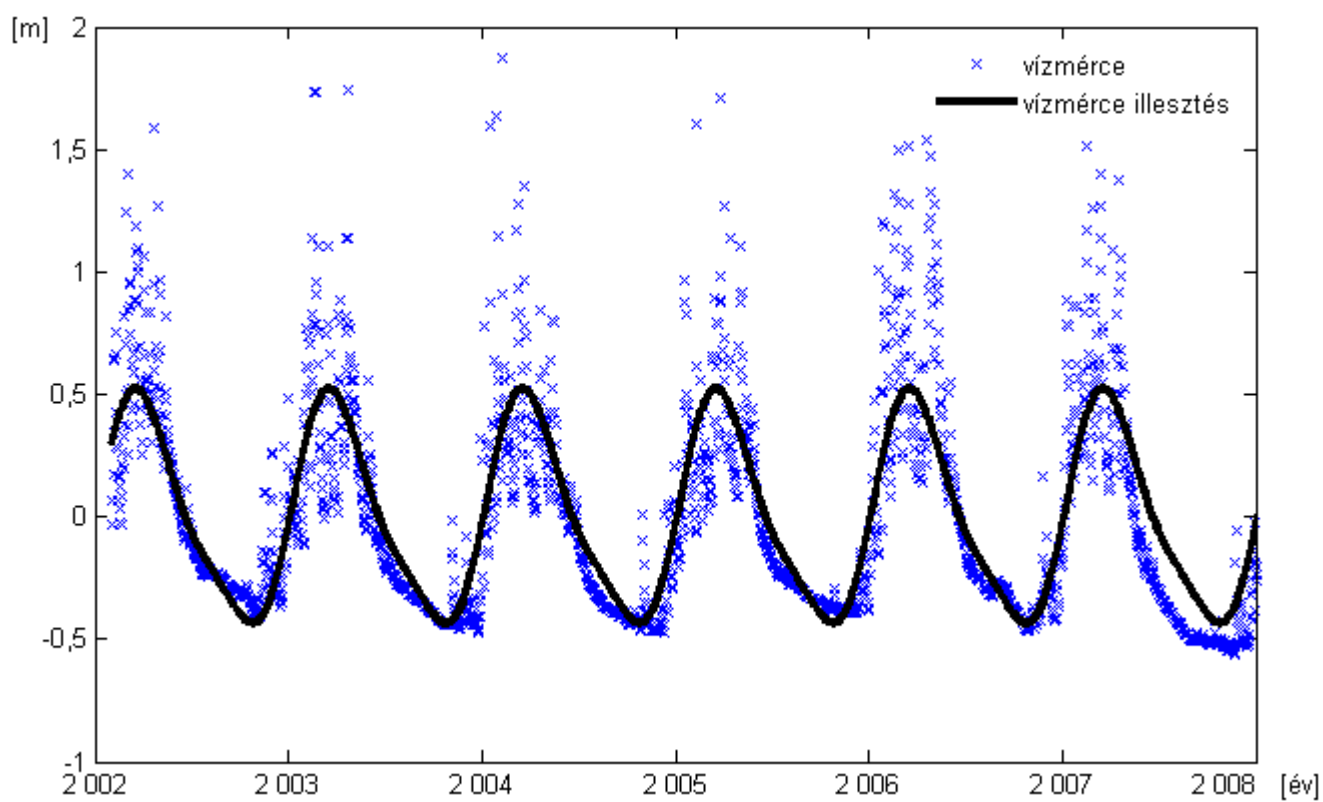
3. ábra - Vízmérce illesztés, Puerto Velaz, ID: 2610



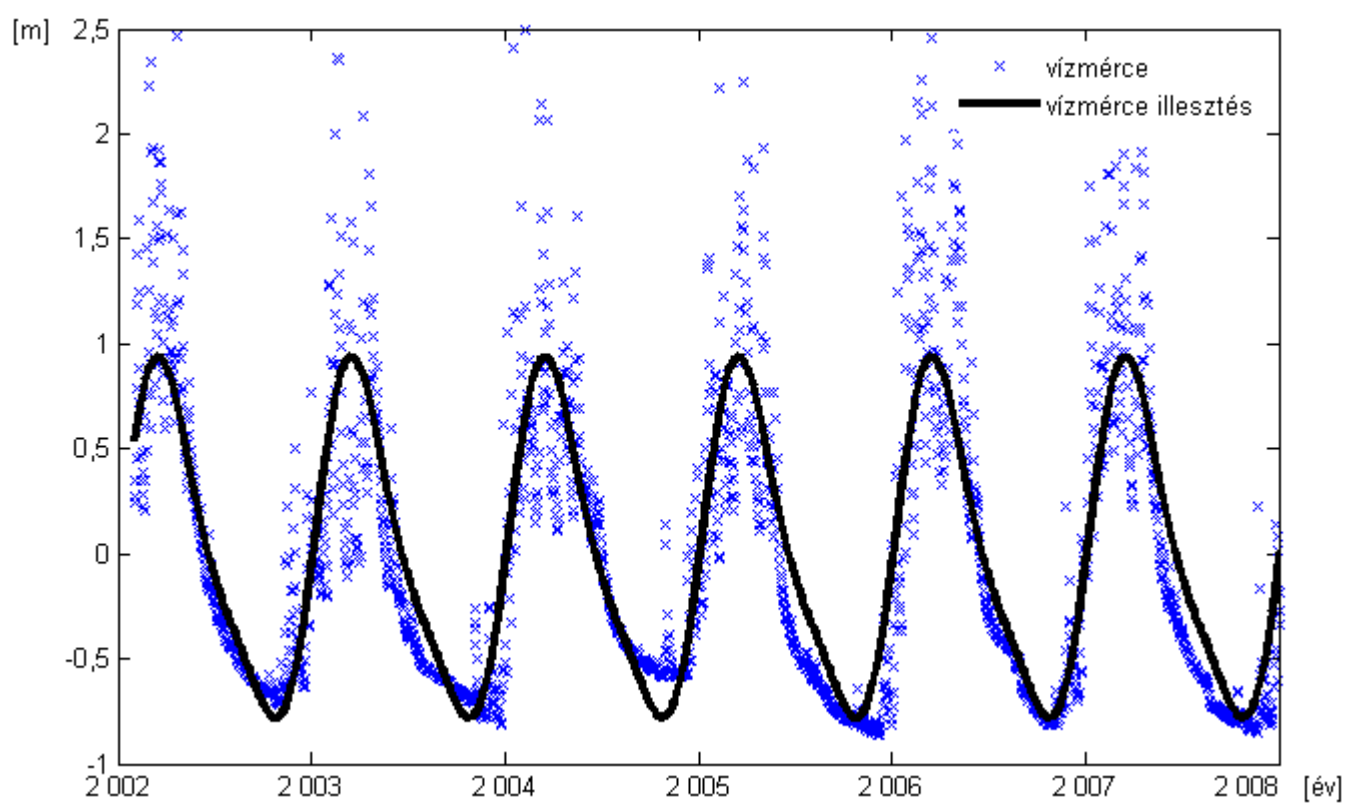
4. ábra - Vízmérce illesztés, El Colorado, ID: 2602



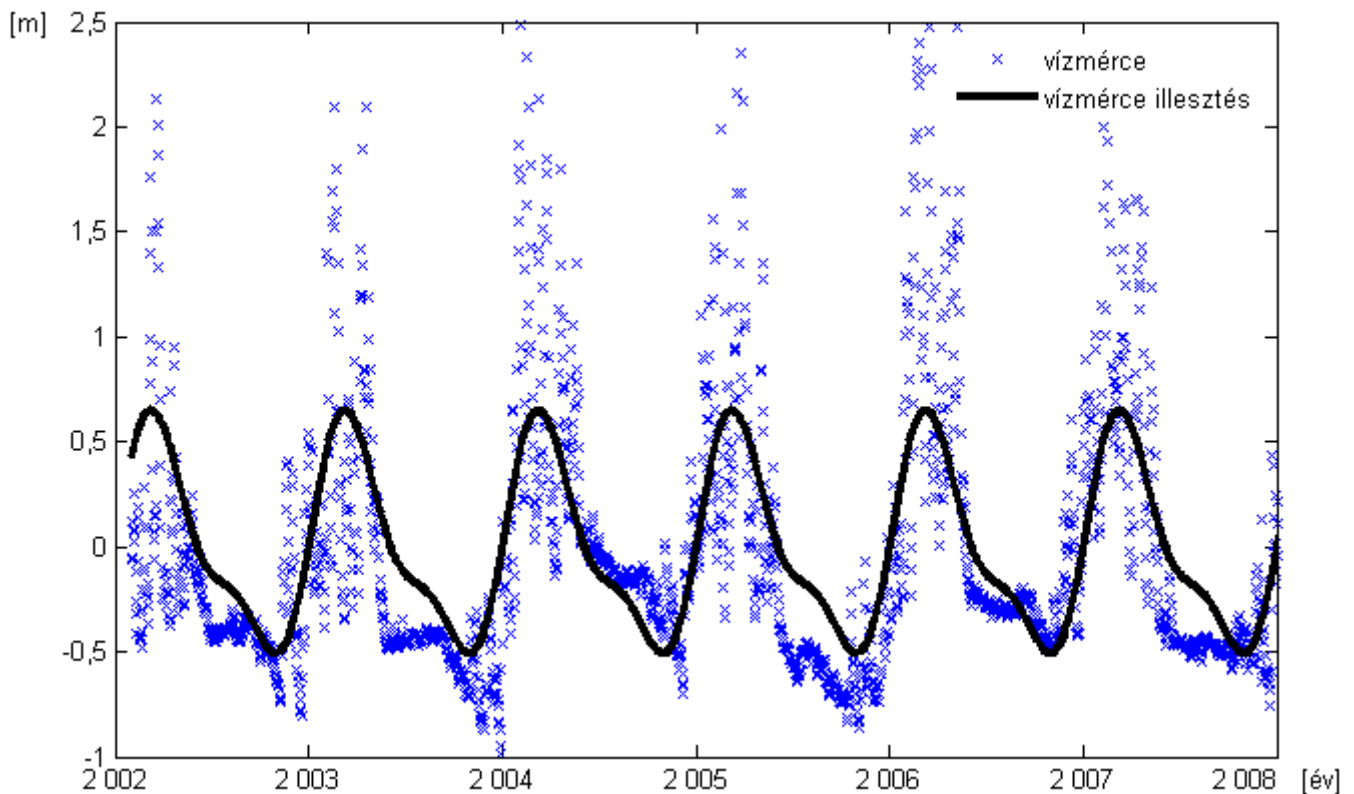
5. ábra - Vízmérce illesztés, Pozo Sarmiento, ID: 693



6. ábra - Vízmérce illesztés, Aguas Blancas, ID: 604



7. ábra - Vízmérce illesztés, Balapuca, ID: 605



8. ábra - Vízmérce illesztés, La Paz, ID: 631

6.2. A GRACE adatsorok kiegyenlítésének eredményei

A GRACE méréseiből számított vízkészletváltozásokra történő illesztés azt mutatja, hogy ellentétben a vízszintadatokkal, az éves amplitúdók annál nagyobbak, minél messzebb van egy állomás a folyó torkolatától. Ennek magyarázata lehet, hogy a GRACE a teljes vízkészlet változását érzékeli, nem csupán a felszíni lefolyást jellemző vízszintjét, ami (ezek szerint) a folyók felső folyásánál nagyobb. A folyók alsó folyásánál az összképet zavarhatják az összetettebb hidrológiai folyamatok, beleértve a párolgással, elszivárgással és az éves ciklussal kilépő víztömegeket, valamint az egyéb beáramló vizek (mellékfolyók, felszín alatti vizek) eltérő periódusainak módosító hatását.

A fázisok alakulása az eredeti legkisebb négyzetes vízmércés illesztéshez képest nem változott. A korrelációk értékeiből látszik, hogy a GRACE illesztése a folyók felső folyásánál sokkal sikeresebb, mint a torkolathoz közel. Az is látható, hogy az átlagolódás hatását figyelembe vevő új kiegyenlítés az amplitúdókat növelte, viszont a korrelációk tekintetében érdemi változásokat nem eredményezett.

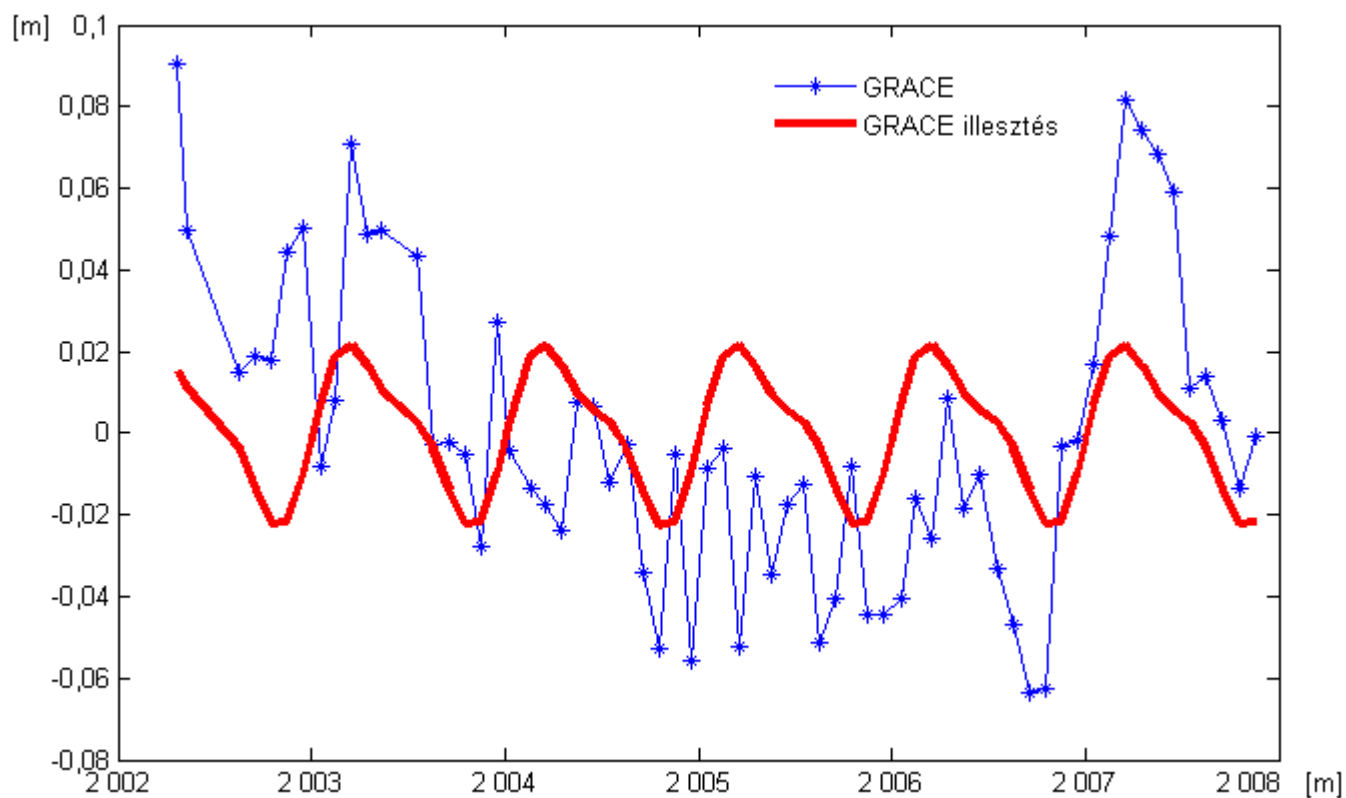
Állomásnév	ID	Távolság (km)	Éves GRACE amplitúdó (m)	Éves GRACE fázis (nap)	GRACE korreláció
BERMEJO folyó					
Puerto Velaz	2610	35	0,0193	355,1	0,3801
El Colorado	2602	124	0,0211	358,3	0,4064
Pozo Sarmiento	693	783	0,0452	0,8	0,7703
Aguas Blancas	604	826	0,0483	0,3	0,7927
Balapuca	605	858	0,0501	0,0	0,8037
PILCOMAYO folyó					
La Paz	631	626	0,0568	364,8	0,8109

6. táblázat - GRACE illesztés legkisebb négyzetek módszerével (átlagolódásra korrigálva)

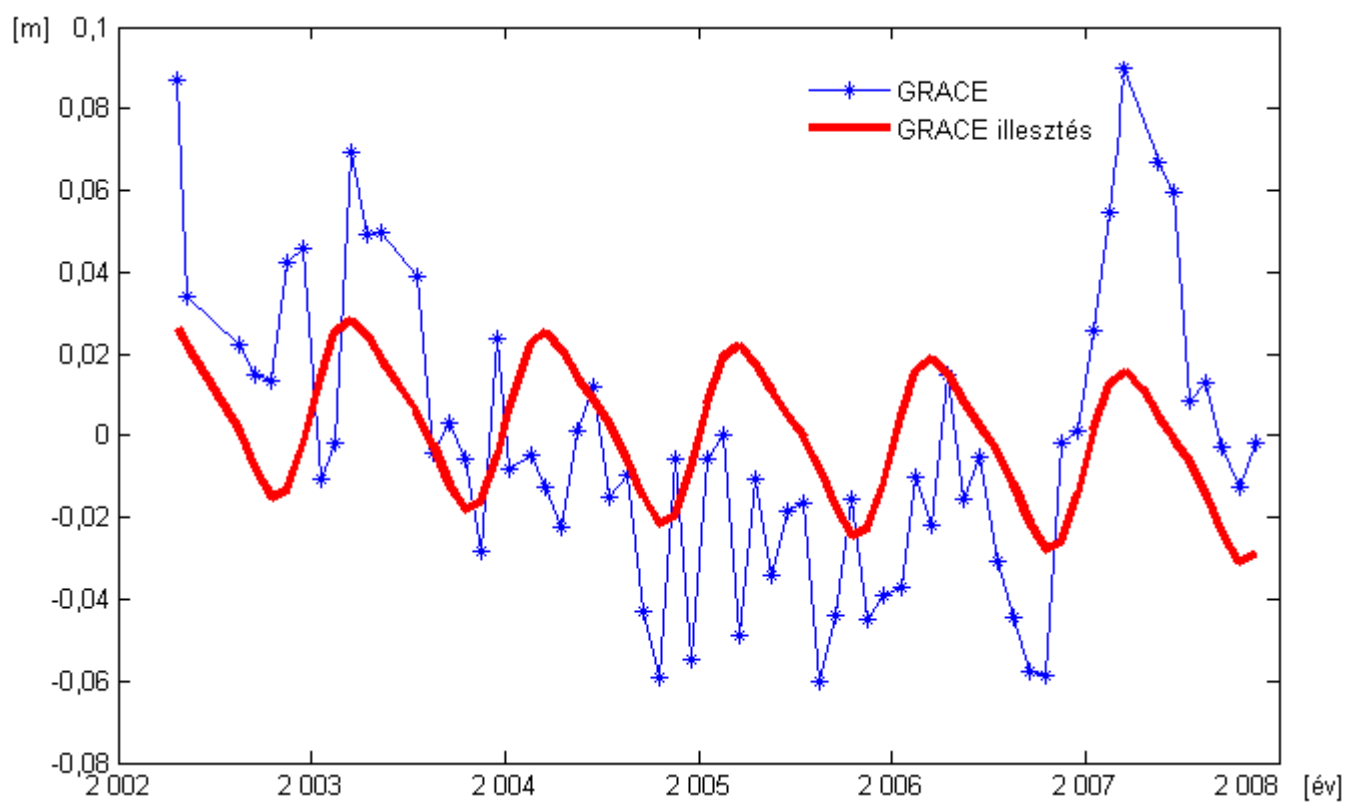
Állomásnév	ID	Távolság (km)	Éves GRACE amplitúdó (m)	Éves GRACE fázis (nap)	GRACE korreláció
BERMEJO folyó					
Puerto Velaz	2610	35	0,0191	355,1	0,3801
El Colorado	2602	124	0,0209	358,3	0,4064
Pozo Sarmiento	693	783	0,0447	0,8	0,7703
Aguas Blancas	604	826	0,0478	0,3	0,7927
Balapuca	605	858	0,0495	0,0	0,8037
PILCOMAYO folyó					
La Paz	631	626	0,0561	364,8	0,8109

7. táblázat - GRACE illesztés legkisebb négyzetek módszerével (diplomamunka)

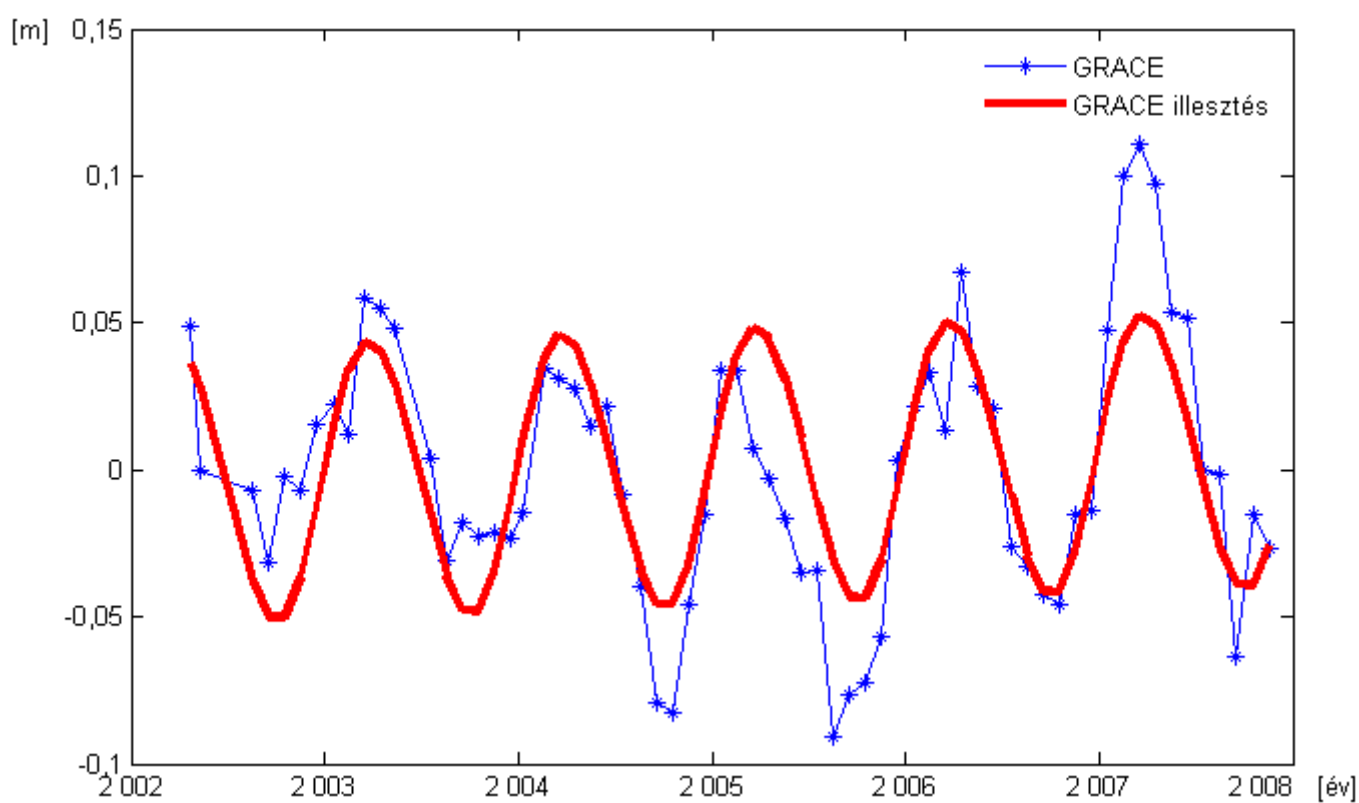
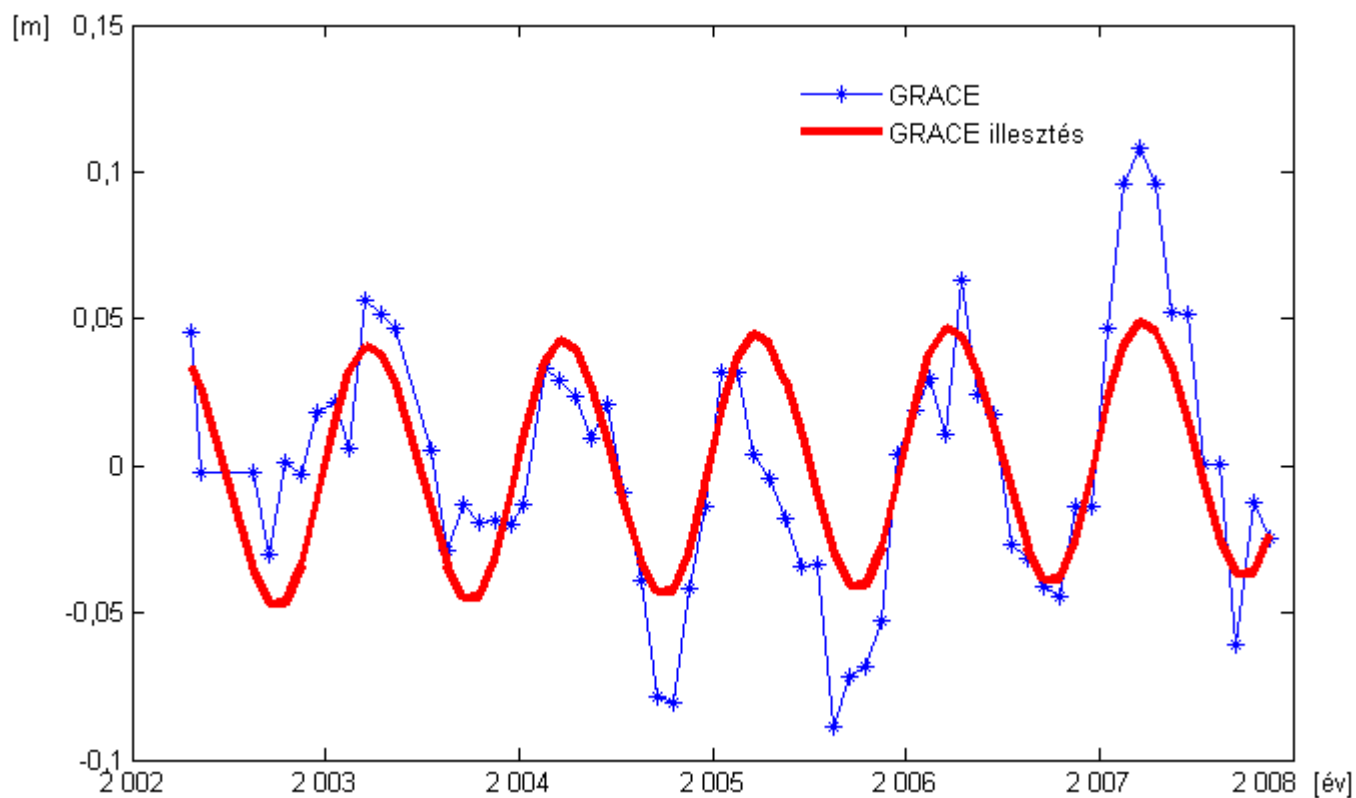
A következő ábrák az átlagolódás hatását figyelembe vevő GRACE illesztéseket szemléltetik.

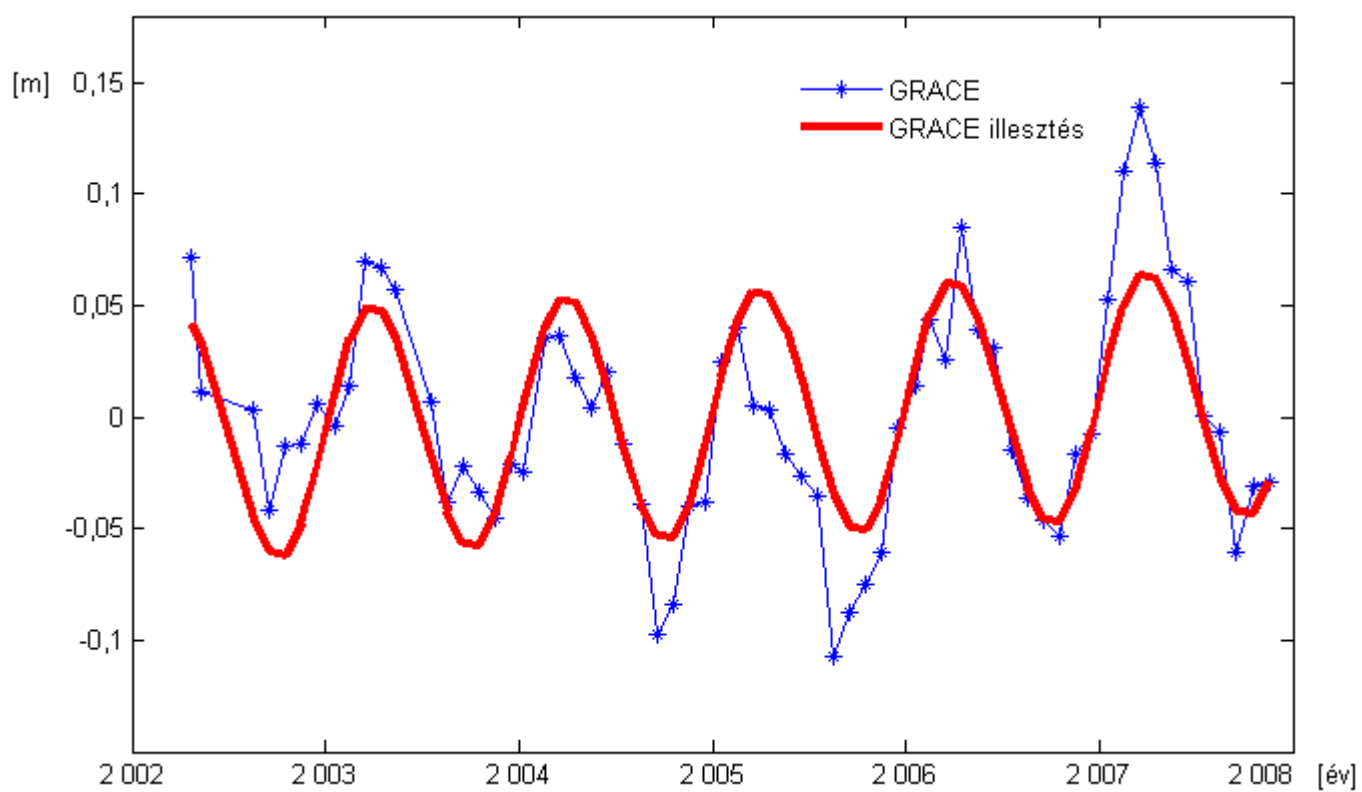
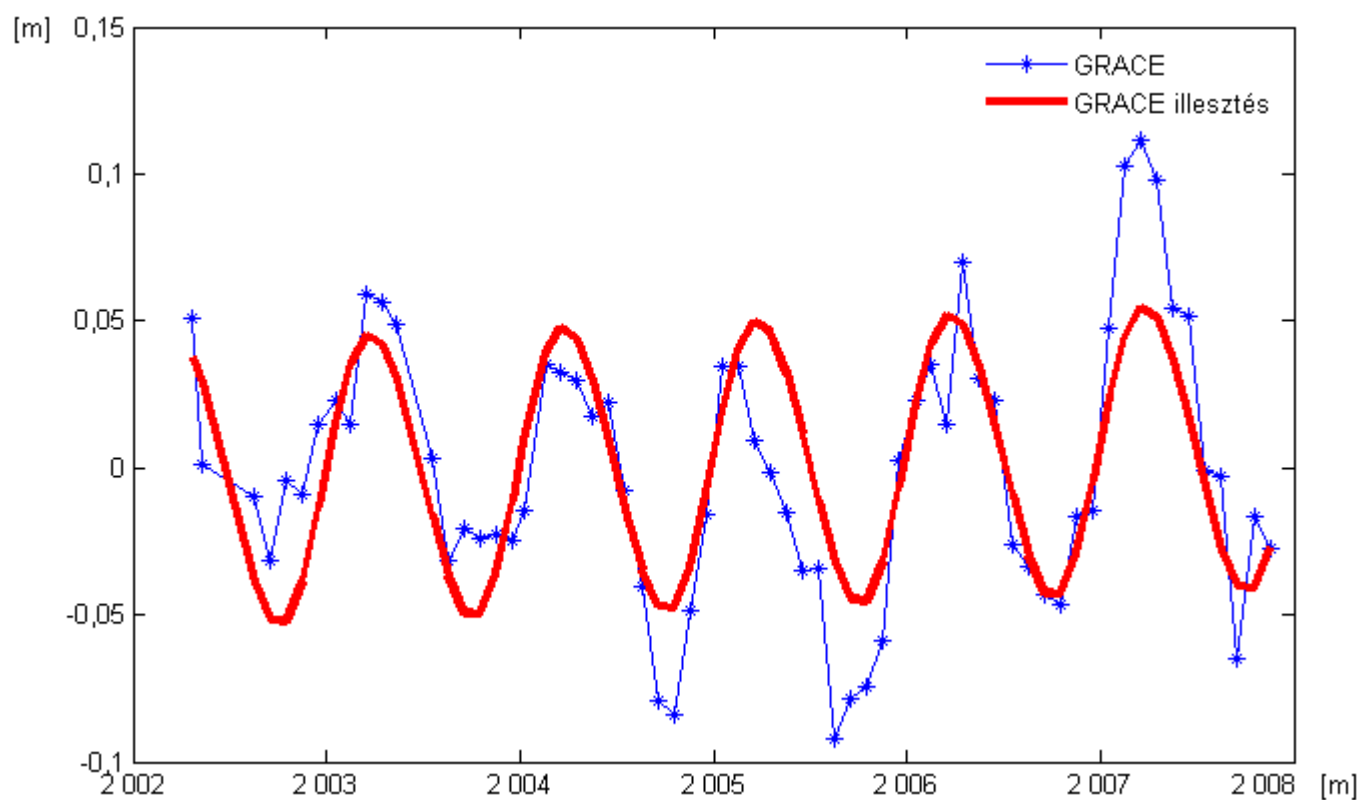


9. ábra - GRACE illesztés, Puerto Velaz, ID: 2610



10. ábra - GRACE illesztés, El Colorado, ID: 2602





6.3. A vízmérce és GRACE illesztések összehasonlítása

A vízmércéknél használt különböző kiegyenlítési módszerek és az átlagolódás hatását figyelembe vevő GRACE kiegyenlítések eredményeinek összevetésénél azonnal feltűnik, hogy a GRACE adatokból nyert amplitúdók sokkal alacsonyabbak, mint a vízmércék esetében. Míg a valódi vízállásokra illesztett görbék legalacsonyabb és legmagasabb pontjai között akár több méteres különbség is előfordul, addig a kiegyenlített GRACE amplitúdók csupán pár centiméteresek. Erre többféle magyarázatot is találtunk:

- A GRACE műholdak felbontásukból adódóan nagyobb területekre átlagolt tömegátrendeződéseket észlelnek. Ezzel szemben a vízmércék mérési eredményei pontbelieknek tekinthetők, ahol a víztömeg a folyó keresztmetszetének szélességében halad. Ebből következik, hogy a vízszint valamilyen mértékű megváltozása a GRACE felbontásának megfelelően egy több száz km-es területre vonatkoztatva jóval kisebbnek érződik.
- A GRACE mérései függőlegesen integrált tömegekre vonatkoznak, a hidrológiai folyamatok tekintetében ez azt jelenti, hogy a teljes vízkészletváltozást észlelik a műholdak. Ezek a vízkészletváltozások viszont a vízháztartási egyenletből:

$$dS/dt = P - ET - R \quad (15)$$

a P csapadék, ET párolgás és R lefolyás különbségeiből adódnak. Mivel a vízmércék a lefolyást mérik, így valójában azok a GRACE méréseiből számított változásoknak csak egy részét képezik (Wahr, 2007). A teljes vízháztartás azonban körülbelüli egyensúlyban van, tehát a dS/dt hányados jóval kisebb, mint a vízállás változása.

Ahhoz, hogy az illesztések kapcsolatát vizsgálni tudjuk, valamint a szemléletesebb megjelenítés érdekében szorzótényezőket alkalmaztunk. Állomásonként meghatároztuk a vízmérce és GRACE illesztések amplitúdóinak hányadosát, majd ezzel beszoroztuk a GRACE görbéket, így skálázott GRACE illesztéseket kaptunk. Bár a GRACE amplitúdók csökkennek a folyótorkolathoz közeledve, míg a vízállások egyre magasabbak az alsó szakasz állomásainál, a két mennyiség hányadosa mégis növekedni fog, mivel a vízmércék amplitúdóinak magas értékei sokkal meghatározóbbak e szempontból. A skálatényező értéke a folyók kezdeténél alacsonyabb, 10-20 körüli; a torkolatnál azonban már jóval nagyobb a GRACE és a vízmérce mérésekből származó amplitúdók eltérése.

Az összehasonlítás érdemi eredménye azonban a fázisok eltéréseiben mutatkozik meg. Állomásonként meghatároztuk a vízmérce és a GRACE fázisainak különbségét; amely pozitív, hogyha a vízmérce fázisa nagyobb, tehát ha a GRACE késleltetve észleli a változást. A Pilcomayo és Bermejo folyók állomásainál a fáziskülönbségek csupán pár naposak, ami kifejezetten jó eredménynek mondható, ha figyelembe vesszük, hogy a GRACE méréseiből számított vízkészletváltozások csupán havonta adnak egy-egy új értéket. Ahogy várni lehetett, a vízmérce korrelációk magasabb értékűek, de jelentős elmaradása a GRACE-nek csak a folyók torkolatához közel jellemző, a felső folyás 0,7-0,8-as korrelációi igen magasnak mondhatók.

Ha a robusztus eljárások és a legkisebb négyzetek módszere közötti kapcsolatot vizsgáljuk, akkor észrevehető, hogy a két robusztus eljárás nagyon hasonló eredményeket ad az összes mennyiségre, bár az exponenciális súlyfüggvény egy hajszálnyival kisebb szorzótényezőt és fáziskülönbségeket eredményez. Ezzel szemben a diplomamunkámban használt régebbi módszer a szorzótényezők szempontjából mindig alulmarad, mindössze a folyótorkolattól távoli állomások fáziseltérései alacsonyabbak, mint a robusztus esetekben.

Az alábbi táblázatokban összefoglaltam a vízmércék és a GRACE adatsorainak kiegyenlítésére használt különféle eljárások eredményeit. Mivel a szezonális hidrológiai folyamatok alapvetően éves jelleget mutatnak, a módszerek összehasonlítását csak erre a periódusra végeztem el.

Állomásnév	ID	Távolság (km)	Éves szorzótényező	Éves fázis-különbség (nap)	Vízmérce korreláció	GRACE korreláció
BERMEJO folyó						
Puerto Velaz	2610	35	130,67	4,1	0,8937	0,3801
El Colorado	2602	124	110,44	1,5	0,8825	0,4064
Pozo Sarmiento	693	783	17,32	0,3	0,7771	0,7703
Aguas Blancas	604	826	9,31	1,8	0,8202	0,7927
Balapuca	605	858	16,02	2,2	0,8447	0,8037
PILCOMAYO folyó						
La Paz	631	626	8,82	7,9	0,7197	0,8109

8. táblázat - Illesztések összehasonlítása (vízmérce: robusztus kiegyenlítés exponenciális súlyfüggvénnyel)

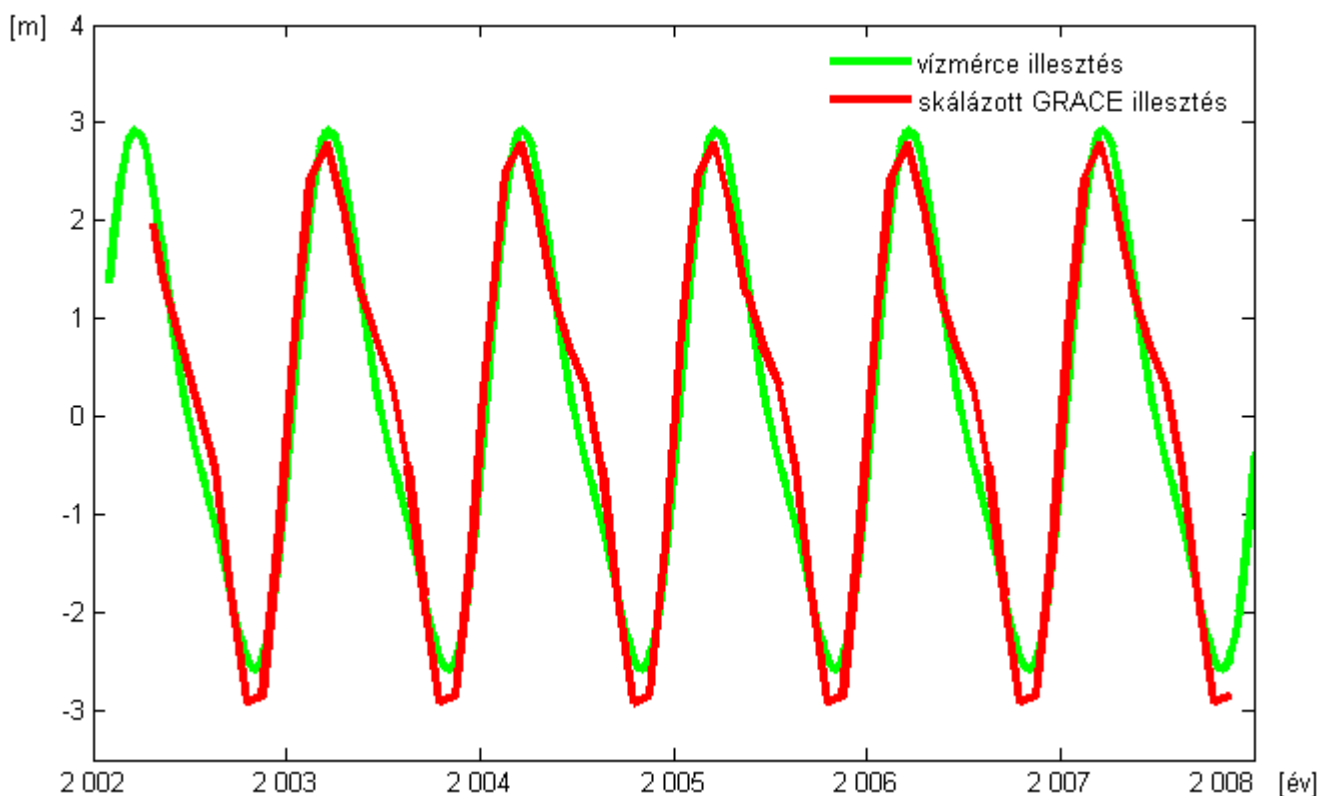
Állomásnév	ID	Távolság (km)	Éves szorzótényező	Éves fázis-különbség (nap)	Vízmérce korreláció	GRACE korreláció
BERMEJO folyó						
Puerto Velaz	2610	35	130,87	4,4	0,8928	0,3801
El Colorado	2602	124	110,70	1,7	0,8821	0,4064
Pozo Sarmiento	693	783	17,38	0,3	0,7771	0,7703
Aguas Blancas	604	826	9,42	1,9	0,8201	0,7927
Balapuca	605	858	16,17	2,4	0,8446	0,8037
PILCOMAYO folyó						
La Paz	631	626	8,99	7,9	0,7190	0,8109

9. táblázat - Illesztések összehasonlítása (vízmérce: robusztus kiegyenlítés reciprok súlyfüggvénnyel)

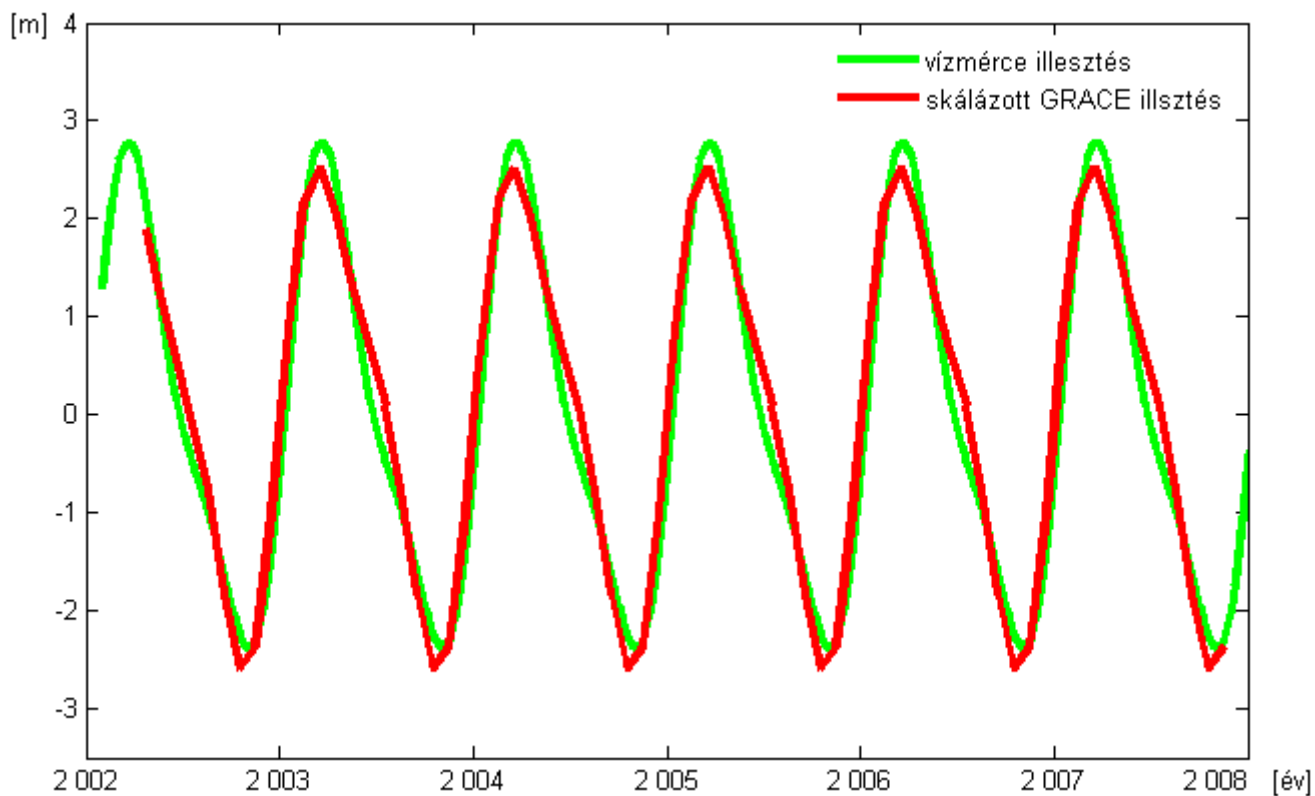
Állomásnév	ID	Távolság (km)	Éves szorzótényező	Éves fázis- különbség (nap)	Vízmérce korreláció	GRACE korreláció
BERMEJO folyó						
Puerto Velaz	2610	35	132,03	5,1	0,8970	0,3801
El Colorado	2602	124	111,66	3,3	0,8869	0,4064
Pozo Sarmiento	693	783	21,38	-1,0	0,7793	0,7703
Aguas Blancas	604	826	11,03	-0,6	0,8195	0,7927
Balapuca	605	858	18,50	-0,5	0,8425	0,8037
PILCOMAYO folyó						
La Paz	631	626	12,09	6,9	0,7225	0,8109

10. táblázat - Illesztések összehasonlítása (vízmérce: legkisebb négyzetek módszere szerinti kiegyenlítés)

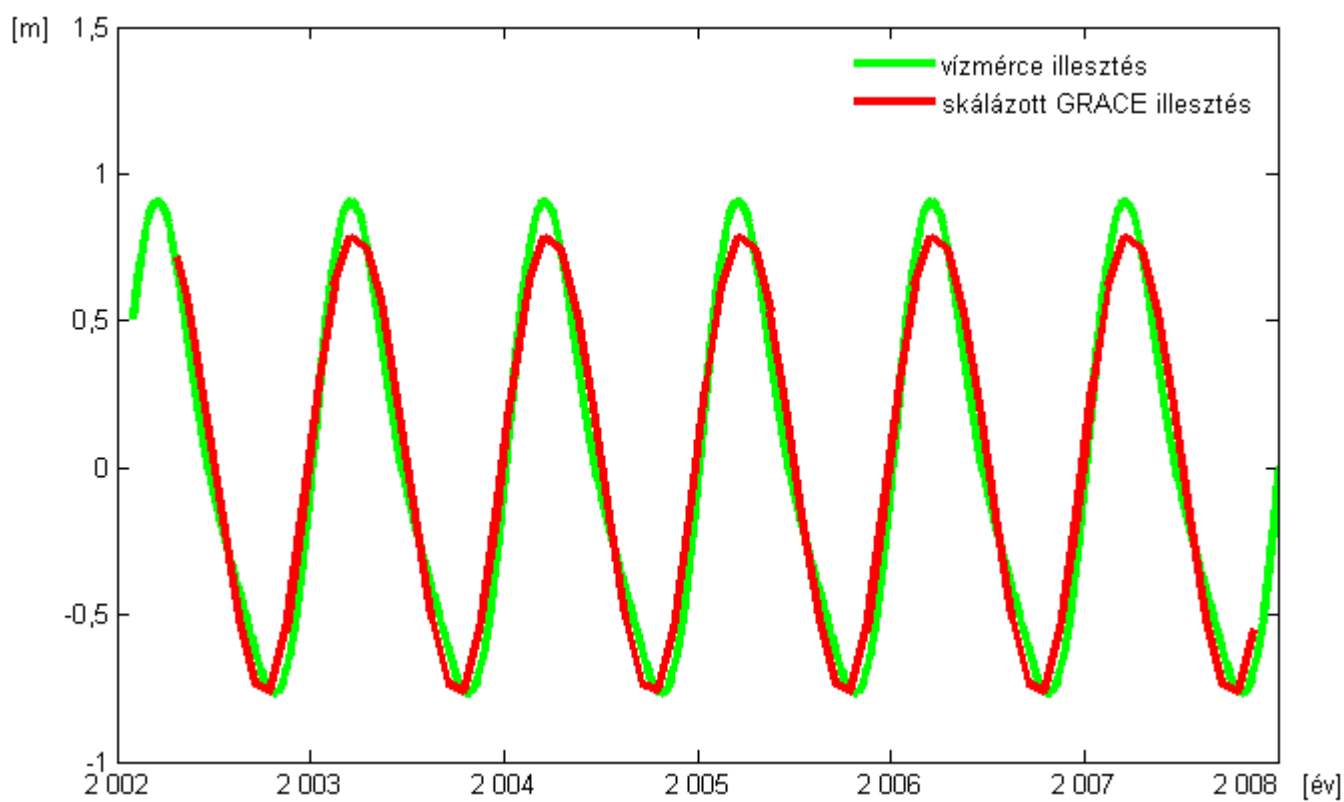
A következő grafikonokon a vízmércék exponenciális súlyfüggvénnyel megoldott robusztus kiegyenlítésének és az átlagolódás hatását figyelembe vevő GRACE kiegyenlítésnek a skálázott eredményeit mutatom be.



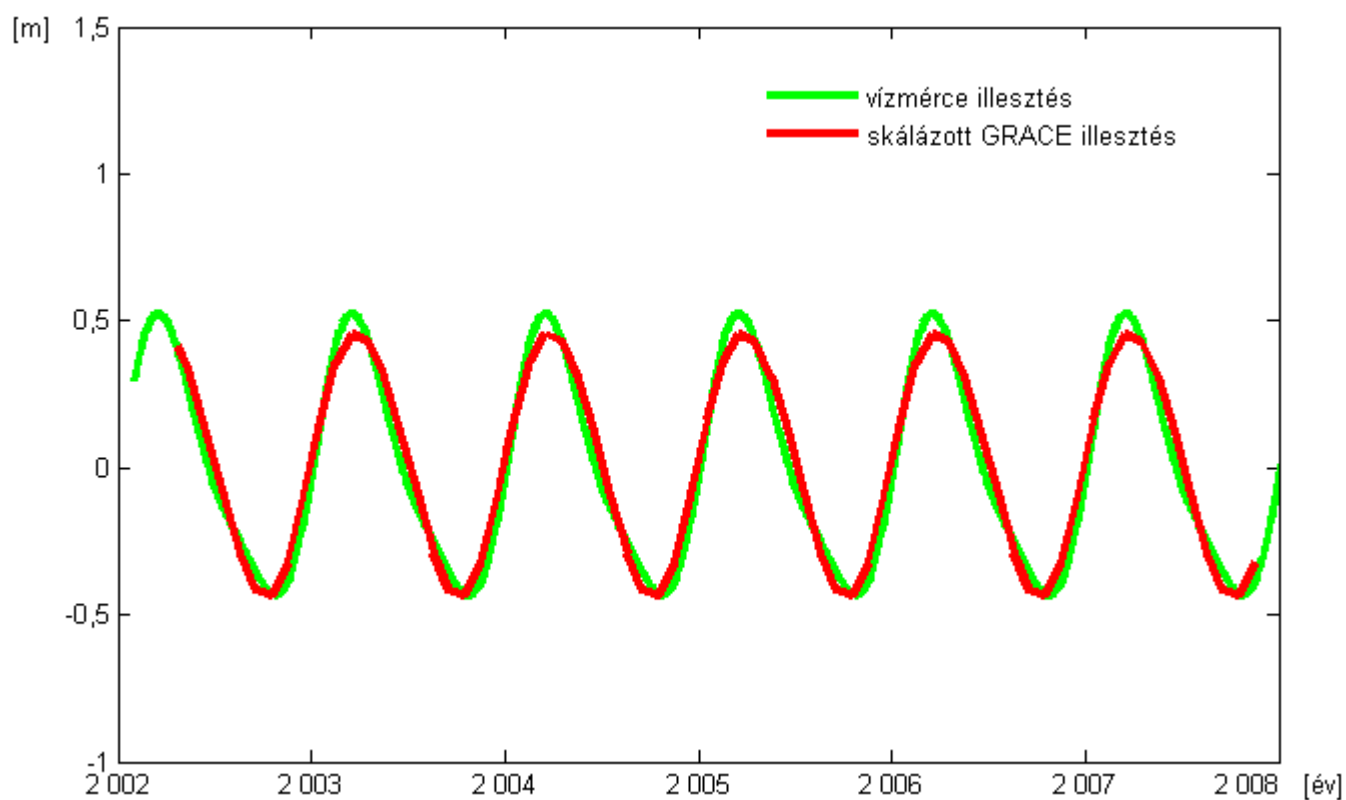
15. ábra - Az illesztések összehasonlítása, Puerto Velaz, ID: 2610



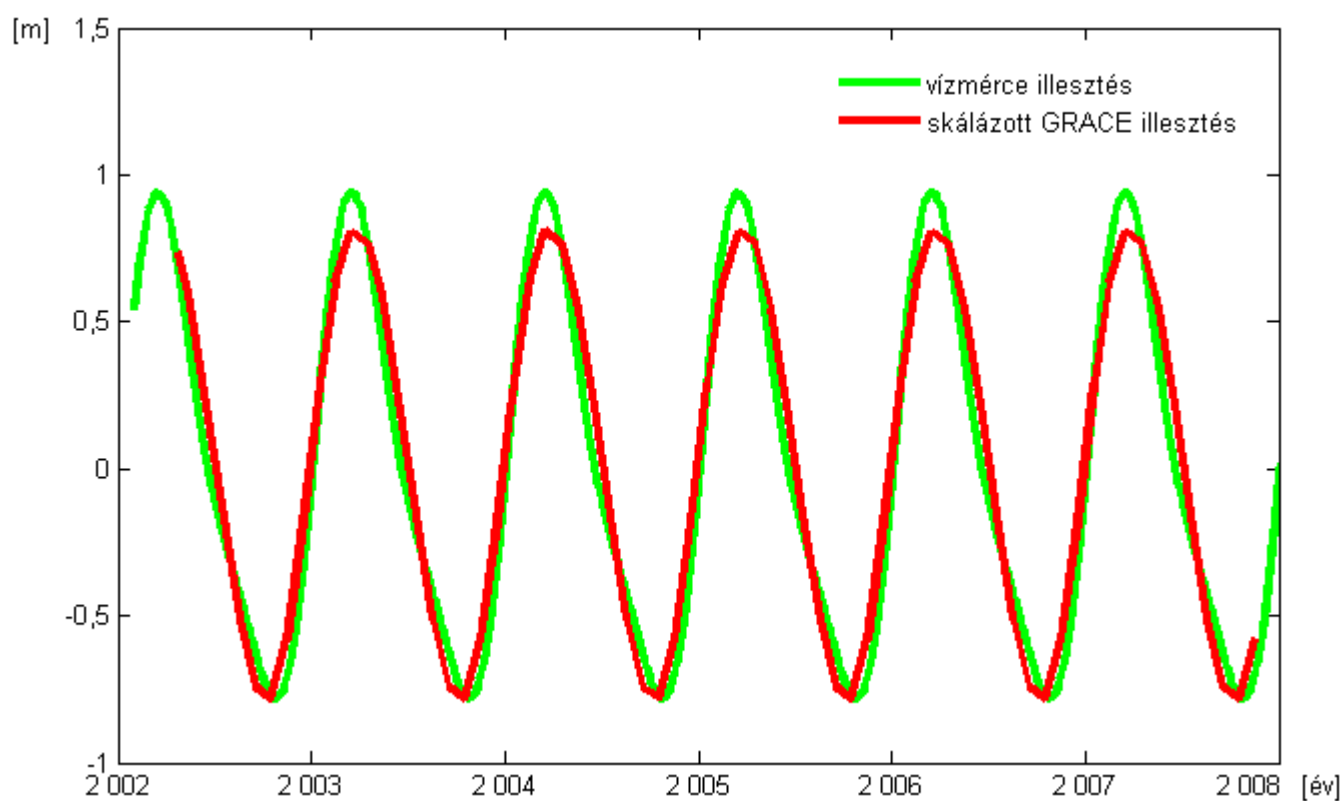
16. ábra - Az illesztések összehasonlítása, El Colorado, ID: 2602



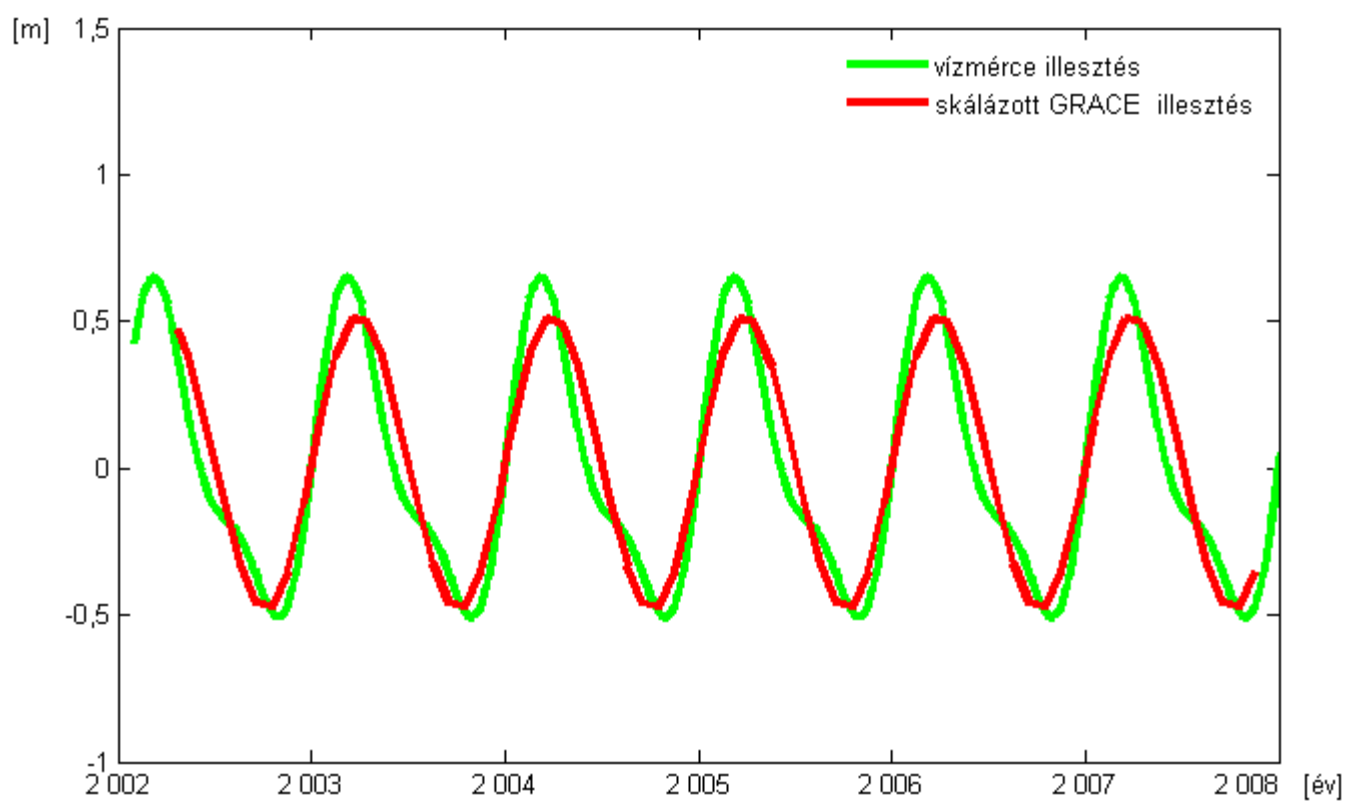
17. ábra - Az illesztések összehasonlítása, Pozo Sarmiento, ID: 693



18. ábra - Az illesztések összehasonlítása, Aguas Blancas, ID: 604



19. ábra - Az illesztések összehasonlítása, Balapuca, ID: 605



20. ábra - Az illesztések összehasonlítása, La Paz, ID: 631

6.4. Az egyes kiegyenlítési módszerek összehasonlítása a teljes vízgyűjtő területére

Az alábbi táblázatban összegeztem a vízmércék adatsorára alkalmazott különféle kiegyenlítési módszerek és az átlagolódás jelenségével számoló GRACE kiegyenlítés eredményeit az összes hidrológiai állomásra.

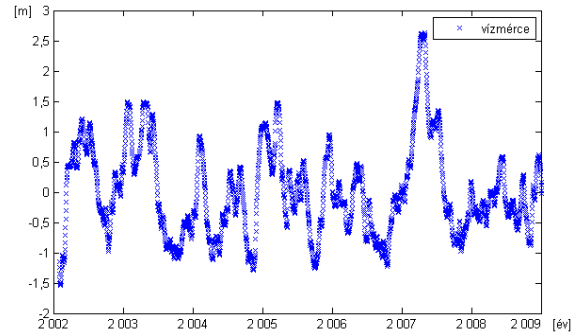
ID	Távolság	Szorzótényező			Fáziskülönbség (nap)		
		Exponenciális	Reciprok	Legkisebb négyzet	Exponenciális	Reciprok	Legkisebb négyzet
BERMEJO							
2610	35	130,67	130,87	132,03	4,09	4,35	5,13
2602	124	110,44	110,70	111,66	1,45	1,68	3,28
693	783	17,32	17,38	21,38	0,34	0,29	-0,99
604	826	9,31	9,42	11,03	1,75	1,88	-0,56
605	858	16,02	16,17	18,50	2,25	2,39	-0,50
PILCOMAYO							
631	626	8,82	8,99	12,09	7,87	7,87	6,90
GUALEGUAYCHÚ							
3030	76	42,43	38,63	65,62	-67,38	-70,96	-73,26
IGUAZÚ							
3440	28	3,32	2,87	6,36	-153,11	64,48	-163,68
PARANÁ							
3316	279	47,37	51,14	52,86	39,68	39,45	37,15
3005	430	91,40	93,74	106,16	-55,48	-56,61	-58,56
3005	430	122,80	115,98	120,18	-46,77	-49,04	-51,85
3805	940	30,42	33,84	38,58	20,03	18,75	20,83
3805	940	40,12	45,14	42,74	26,58	28,45	31,75
3862	1007	30,81	33,85	36,95	32,01	31,77	35,70
3452	1542	48,78	45,61	52,08	21,56	23,54	27,76
SALADO							
3216	34	38,73	37,27	63,27	171,49	171,86	172,62
811	563	35,93	30,15	43,54	-31,79	-23,13	-8,89
804	655	10,04	9,98	36,76	15,08	10,21	-26,86
810	951	3,35	2,78	1,94	6,84	9,79	14,51
URUGUAY							
3860	720	72,69	59,29	108,69	-0,84	-21,90	24,45
3857	791	59,07	57,48	80,84	-10,59	-9,26	-132,14
3449	856	29,36	30,51	45,06	-16,27	-11,27	-169,85
3442	978	26,57	24,36	32,31	-16,42	-16,67	-21,87

11. táblázat - A kiegyenlítési módszerek összehasonlítása az összes állomáson

A táblázatban használt jelölések:

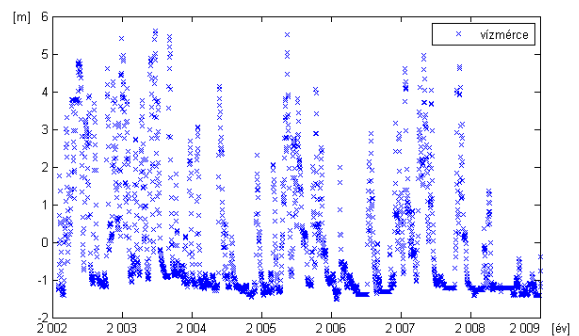
- Azok az állomások, melyeknek vízállás adatai egyértelmű éves periódusú ismétlődéseket mutatnak, fehér háttérrel jelennek meg (pl.: 2610).

- Azok a hidrológiai állomások, melyek esetén még felfedezhető az éves ciklus nyoma, de már közel sem olyan egyértelmű módon, mint az előző esetben, világosszürke háttérrel kaptak (pl.: 3005).



21. ábra - A 3005-ös állomása vízmerce adatai

- Azok helyek, ahol a vízmerce adatai valamilyen befolyásoló tényező (Guarani tározó, gátak, vízesések, szabályozás) miatt egyáltalán nem mutat éves ciklust, a legsötétebb háttérrel kaptak (pl.: 3030).



22. ábra - A 3030-as állomás vízmerce adatai

- Fáziskülönbségeknél az a kiegyenlítés jelenik meg a legvilágosabb háttérrel, mely esetén a legkevesebb az eltérés a vízmerce és GRACE fázisai között. Minél több nap a fázisok különbsége, annál sötétebb a háttér.
- Ahol a legalacsonyabb a GRACE amplitúdó szorzótényezője, ott fehér a háttér, és az előzőekhez hasonlóan, a szorzó növekedésével egyre sötétebb a jelölés.

A táblázatból egyértelműen látszik, hogy mekkora előrelépést jelentett a robusztus kiegyenlítés alkalmazása a vízmerce adataira. Általánosan elmondható, hogy a kétféle súlyfüggvény közel azonos eredményekhez vezetett, melyek az egyszerű legkisebb négyzetes kiegyenlítés eredményeinél a legtöbb esetben kisebb szorzótényezőket és fáziskülönbségeket produkáltak.

Főként az Uruguay folyó esetében (ahol tehát éves ciklus nem jelentkezik) szembetűnő, hogy a legkisebb négyzetek módszerével végrehajtott kiegyenlítés nagyon nagy, akár több mint 100 napos fáziskülönbségeket eredményezett, míg ezen esetek közül a legtöbbnél a robusztus eljárásoknál csak 10-20 nap az eltérés.

A szorzótényezők is jóval nagyobbak az utolsó két folyó állomásainál a legkisebb négyzetes megoldás esetében; tehát az, hogy az átlagolódás hatását figyelembe vettük a GRACE méréseknél, az ottani illesztés amplitúdóját növelte, míg a robusztus eljárások a vízmérce adatok közül szűrték ki a kiugróan magas értékeket, így ott az amplitúdó csökkent; összességében a dolgozatban alkalmazott újítások közelebb hozták egymáshoz az adatsorok amplitúdóit.

Ha a Paraná folyó állomásait nézzük, ahol tehát az éves ciklusnak valamiféle nyoma tapasztalható, már korántsem mutatkozik ekkora eltérés a robusztus és általános kiegyenlítés között, de még mindig az első két eset ad kisebb szorzókat és fáziseltéréseket.

Ha a kétféle súlyfüggvényből adódó eltéréseket hasonlítjuk össze, elmondhatjuk, hogy bár szinte azonos eredményre vezettek, de az exponenciális súlyfüggvénnyel végzett robusztus kiegyenlítés összességében kisebb szorzótényezőket és fáziseltéréseket eredményezett.

7. Összegzés

Jelen TDK-dolgozat keretében gravimetriai műholdas mérésekből meghatározott vízkészletváltozások és a La Plata vízgyűjtő folyóin mért vízszintváltozások kapcsolatát vizsgáltuk a BSc diplomamunkám folytatása és pontosítása céljából.

A GRACE műholdak mérési eredményeiből méter dimenziójú vízkészletváltozásokat határoztunk meg, valamint rendelkezésünkre állt a vízgyűjtő nagyobb argentin folyóinak vízmérce adatsora a 2002 és 2008 közötti időszakból. Előzőleg mindkét adatsorra legkisebb négyzetek módszerével olyan szinuszos görbéket illesztettünk, melyek a hidrológiai változások éves periódusait hangsúlyozzák ki. Azonban az alkalmazott kiegyenlítési módszert szükséges volt javítanunk, mivel a vízmérce adatok esetében a kiegyenlítés utáni javítások nem követték a normális eloszlást. Ezért robusztus kiegyenlítési módszereket alkalmaztunk kétféle súlyfüggvénnyel (exponenciális és reciprok), melyek a kivágó értékek hatására már sokkal kevésbé érzékenyek, és melyeknek nem előfeltétele a normális eloszlás. A GRACE adatsor kiegyenlítését a havi geoidmodellekből adódó átlagolódás hatásának figyelembevételével javítottuk. További előrelépést jelent, hogy megvizsgáltuk, mi okozza azt, hogy a vízgyűjtő egyes területein egyértelmű éves ciklus látszik a vízmérce adatsorból kora tavaszi maximummal és késő őszi minimummal, míg máshol a kiegyenlítés illesztése nagyon alacsony korrelációkat eredményez, mivel a vízszintértékek nem tükröznék szezonális változásokat.

Az újonnan alkalmazott kiegyenlítési módszerek eredményeit összehasonlítottuk a diplomamunkám végeredményeivel és sikerült egyértelmű következtetéseket levonnunk. Az összehasonlítás alapját a vízmérce- és GRACE illesztések amplitúdóinak hányadosai valamint a fázisok különbségei képezik. Ezeken kívül pl. az egyes robusztus eljárások értékeléséhez felhasználható az adatsor és az illesztett görbe korrelációja is.

Ha folyónként figyeljük meg az amplitúdók arányainak és a fáziseltérések alakulását, szükséges számolni azzal is, hogy az egyes állomások között lehetnek gátak, vízszintszabályozó létesítmények, nagyobb vízesések, valamint mellékfolyók is becsatlakozhatnak; ezek mind változtatják az egyébként egyértelmű növekedését vagy csökkenését a fenti mennyiségeknek. Ha mégis általánosítunk, akkor arra a következtetésre jutunk, hogy a szorzótényezők a torkolattól távolabbi állomások esetében alacsonyabb értékűek, valamint a fáziskülönbségek is egyre növekednek a folyás irányában haladva.

Az eredmények egyértelműen mutatják a két robusztus kiegyenlítés hasonlóságát és az egyszerű legkisebb négyzetek módszerének eltérését azoktól. A különbség legfőképp azon állomásoknál érzékelhető, ahol az illesztés csak kis korrelációval oldható meg, ezeknél ugyanis a legkisebb négyzetek módszere erősen torzít, ami megmutatkozik abban, hogy a fáziskülönbségek néhol a 100 napot is meghaladják, valamint a szorzótényezők is sokkal magasabbak, mint a robusztus esetekben. Összességében levonható az a következtetés, hogy a vízmérce adatsoroknál tényleg szükség volt olyan kiegyenlítési eljárásra, mely korrekcióba veszi a kiugró értékeket, ezáltal az olyan helyszíneken, ahol a javítások közel sem követik a normális eloszlást, sokkal kisebb eltérések adódtak a GRACE illesztésekkel való összehasonlításakor.

Azon állomások esetében, melyeknél szemmel látható éves ciklus jelentkezik mind a vízmérce, mind a GRACE adatokban, az amplitúdók szorzója a folyók kezdetén 10-20 körüli értéket vesz fel, a fáziseltérés pár napos értéke kiváló eredmény, főként ha figyelembe vesszük a GRACE adatok időbeli rendszerességét.

A két robusztus kiegyenlítési módszer eredményei nagyon közeli értékeket adnak, de az exponenciális súlyfüggvény alkalmazása a mi esetünkben sikeresebbnek mondható.

Az eredmények összehasonlításából tapasztalhatjuk, hogy a GRACE mérési átlagolódásának figyelembevétele, valamint a vízmérce-adatok exponenciális súlyfüggvény alkalmazásával történő robusztus kiegyenlítése nemcsak a magas korrelációjú állomásoknál, hanem azon területeken is jelentős szorzótényező- és fáziskülönbség-csökkenést eredményezett, melyeknél egyébként az illesztés sikeressége kétséges a normális eloszlást nem követő javítások miatt. Az alkalmazott eljárásokkal a GRACE gravimetriai méréseiből az olyan területeken, ahol kevésbé áll különféle befolyásoló hatások alatt a vízkészlet, a vízszintváltozások éves periódusa nagy pontossággal megadható.

Irodalomjegyzék

Almeida Filho, Flávio Guilherme Vaz de ; Calmant, Stephane ; Seyler, F. ; Ramillien, G ; Blitzkow, Denizar ; Matos, Ana Cristina Oliveira Cancoro de ; Silva, S. J. (2012): Time-variations of equivalent water heights from Grace Mission and in-situ river stages in the Amazon basin. *Acta Amazonica (Impresso)*, v. 42, p. 125-134

Andersen, O., Berry, P., Freeman, J., Lemoine, F. G., Luthcke, S., Jakobsen, K., and Butts, M. (2008): Satellite Altimetry and GRACE Gravimetry for Studies of Annual Water Storage Variations in Bangladesh. *Terr. Atmos. Ocean Sci.*, 19:47–52, doi:10.3319/TAO.2008.19.1-2.47(SA)

Bettadpur, S. (2003): Level-2 Gravity Field Product User Handbook, GRACE Project material

J. L. Chen, C. R. Wilson, B. D. Tapley, L. Longuevergne, Z. L. Yang and B. R. Scanlon (2005):

Recent La Plata basin drought conditions observed by satellite gravimetry. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, vol. 115, D22108, 12 pp., doi:10.1029/2010JD014689

Detrekői Á (1991): Kiegyenlítő számítások (in Hungarian), Nemzeti Tankönyvkiadó, pp. 688

Ilk, K.H. et al. (2005): Mass transport and mass distribution in the Earth system. Contributions of the new generation of satellite gravity and altimetry missions to the geosciences, proposal for a german priority research program 2nd ed., GOCE-Projektbüro TU München, GeoForschungsZentrum Potsdam, München, Potsdam.

Földváry L. (2004): A 2000-es évek első évtizede: A gravimetriai műholdak korszaka, *MAGYAR GEOFIZIKA* 45(4): 118-124

Földváry L. (2008): Globális klimatológiai változások hatása a nehézségi erőtérré, és annak műholdas észlelési lehetőségei, *Magyar Tudomány* 2008/6, pp. 704-714.

Földváry L., Mészáros P. (2009): Az Antarktisz tömegátrendeződéseinek vizsgálata GRACE geopotenciális modellek alapján, *Geomatikai Közlemények*, vol. XII., pp. 109-118.

Földváry L. (2012): Mass-Change Acceleration in Antarctica from GRACE Monthly Gravity Field Solutions, In: *Geodesy for Planet Earth*, szerkesztők: Kenyon S, Pacino M C, Marti U; Springer Berlin, Heidelberg, New York, pp. 591-596

Jekeli, C. (1981): Alternative methods to smooth the Earth's gravity field, *OSU Report Series*, vol. 327.

Pereira A., Miranda S., Pacino M. C., Forsberg R. (2012): Water storage changes from GRACE data in the La Plata basin. *Geodesy for Planet Earth*. International Association of Geodesy Symposia, vol. 136, part 3, 613-618, DOI: 10.1007/978-3-642-20338-1_75

Ramillien, G.; Frappart, F.; Cazenave, A.; Güntner, A. (2005): Time variation of land water storage from an inversion of 2 years of GRACE geoids. *Earth and Planetary Science Letters*, 235, 1-2, 283-301

Soha G. (1986): Robusztus kiegyenlítés mérési javítástól függő súlyozással. *Geodézia és Kartográfia*, 4, 267-271.

Swenson, S.; Wahr, J. (2002): Methods for inferring regional surface-mass anomalies from Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) measurements of time-variable gravity. *J. Geophys. Res.-Solid Earth*, 107 (B9) , issn: 0148-0227, ids: 634WU, doi: 10.1029/2001JB000576, Published SEP 2002

Tóth, Gy (2004): Korszerű matematikai módszerek a geodéziában, BME elektronikus jegyzet, p. 100

Wahr J., Schubert, G. (Ed.) (2007): Time variable gravity from satellites. *Treatise on Geophysics*, 213-218, Oxford: Elsevier Ltd.

WWAP (2007): UN-water/WWAP/2007/1, La Plata Basin Case Study, Final Report, World Water Assessment Programme, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, March 2007, 1-6, 242-259

Závoti, J (1999): A geodézia korszerű matematikai módszerei, MTA Doktori Disszertáció, p. 149

http://en.wikipedia.org/wiki/Guarani_Aquifer (utolsó elérés: 2012. 11. 02.)

http://en.wikipedia.org/wiki/Rio_de_la_Plata_Basin (utolsó elérés: 2012. 11. 02.)

http://en.wikipedia.org/wiki/Salado_River,_Argentina (utolsó elérés: 2012. 11. 02.)

http://en.wikipedia.org/wiki/Uruguay_River (utolsó elérés: 2012. 11. 02.)

http://en.wikipedia.org/wiki/Paran%C3%A1_River (utolsó elérés: 2012. 11. 02.)