

Suvi Suurnäkki

# RUNKOTILAVUUSYHTÄLÖT PANAMALAISELLE TIIKILLE

Opinnäytetyö  
Metsätalouden koulutusohjelma

2017



apical  
REFORESTADORA, S.A.



Kaakkois-Suomen  
ammattikorkeakoulu

<b>Tekijä/Tekijät</b>	<b>Tutkinto</b>	<b>Aika</b>
Suvi Suurnäkki	Metsätalousinsinööri (AMK)	Marraskuu 2017
<b>Opinnäytetyön nimi</b>		
Runkotilavuusyhtälöt panamalaiselle tiikille		25 sivua 46 liitesivua
<b>Toimeksiantaja</b>		
Apical Reforestadora S.A.		
<b>Ohjaaja</b>		
Pertti Kilpeläinen, toimeksiantajan puolesta Petteri Seppänen		
<b>Tiivistelmä</b>		
<p>Puun tilavuus on yksi metsänmittauksen perustunnuksia. Tilavuutta tarvitaan hakkuiden suunnitteluun ja metsän arvon määrittämiseen. Plantaasiviljelmillä metsän tilavuus määritetään yksittäisen puun tilavuusyhtälön avulla. Plantaasiviljelmillä koealalta mitatut yksittäisten puiden tilavuudet summataan ja koealan tilavuudesta saadaan muuntokertoimen avulla hehtaarikohtainen tilavuus.</p> <p>Opinnäytetyön tarkoituksena oli kehittää toimeksiantajalle tiikin (<i>Tectona grandis</i>) runkotilavuusyhtälöitä metsäninventointiin Panamaan. Työn tarkoitus oli mallintaa kolme tilavuusyhtälöä: kaksi kokonaistilavuuden yhtälöä, joissa toisessa on muuttujana rinnankorkeusläpimitta ja toisessa rinnankorkeusläpimitta ja puun pituus, sekä kaupallisen tilavuuden yhtälö, jossa muuttujina ovat rinnankorkeusläpimitta, pituus ja tukin yläläpimitta.</p> <p>Havaintoaineistona työssä oli toimeksiantajan useamman vuoden aikana keräämä mitta-aineisto, joka koostui 444 rungon mittatiedoista. Aineisto sisälsi jokaisesta puusta rinnankorkeusläpimitan, kokonaispituuden ja läpimitta ja pituus tiedot suhteellisilta etäisyyksiltä pitkin runkoa. Kaikki aineiston puut ovat siemenlähtöisiä, mukana ei ole kloonattuja puita. Läpimitat on mitattu kuorellisina läpimittoina. Samoin kaikki tilavuusyhtälöt on laskettu kuorellisina tilavuuksina. Koko aineisto jaettiin kahtia mallinnusta varten: varsinaiseen mallinnusaineistoon (n=399) ja estimoitujen mallien testausaineistoon (n=40). Objektiiiviseen testiaineistoon puut valittiin ositetulla satunnaisotannalla. Kokonaisuudessaan 21 tilavuusmallia estimoitiin tilasto-ohjelmalla. Testausvaiheessa tässä tutkimuksessa mallinnettujen yhtälöiden lisäksi testattiin myös muissa tutkimuksissa parhaiksi todettuja tiikin tilavuusyhtälöitä.</p> <p>Testaus osoitti että tässä tutkimuksessa mallinnetut ja parhaimmiksi osoittautuneet tilavuusyhtälöt sopivat paremmin havaintoaineiston kaltaiseen puustoon kuin muiden tutkijamusten tilavuusmallit. Kokonaistilavuuden yhtälöissä pelkkää rinnankorkeusläpimittaa käyttävä malli on helpompi käyttää käytännössä ja läpimitan mittaustulokset ovat kohtalaisen tarkkoja ja luotettavia. Puun pituuden mittaaminen on läpimitaan verrattuna epätarkempaa ja enemmän aikaa vievää. Yhtälö, jossa tilavuuden selittävinä muuttujina ovat sekä läpimitta että pituus, antaa kuitenkin laskennallisesti tarkempia tuloksia kuin pelkkään läpimitaan perustuva yhtälö. Kaupallisen tilavuuden yhtälöllä pystytään asetetun minimiläpimitan avulla laskemaan saatavan käyttöosan tilavuus. Toimeksiantajalla on tutkimuksen ansioista nyt käytössään omaan aineistoon perustuvat tilavuusyhtälöt, joilla pystytään luotettavasti ja aikaisempaa tarkemmin ennustamaan puiden tilavuus panamalaisilla viljelmillä.</p>		
<b>Asiasanat</b>		
Runkotilavuus, regressioanalyysi, tiikki, Panama, mallintaminen		

Author (authors)	Degree	Time
Suvi Suurnäkki	Bachelor of Natural Resources	November 2016
<b>Thesis title</b>		25 pages
Stem volume equations for <i>Tectona grandis</i> in Panama		46 pages of appendices
<b>Commissioned by</b>		
Apical Reforestadora S.A.		
<b>Supervisor</b>		
Pertti Kilpeläinen and Petteri Seppänen for the commissioning company		
<b>Abstract</b>		
<p>Determination of the timber volume is often the most important task in forest inventory. Estimating the volume of trees is very important for the plantations' forest management planning and evaluation of their biological asset. In plantation forests individual-tree volume equations are commonly used to calculate the total and merchantable volume of trees in the sample plot. By aggregating the individual tree volumes, the plot level volume is obtained. This plot level volume is then extrapolated to an area unit by an expansion factor.</p>		
<p>The aim of the study was to develop equations which would best predict the total volume and merchantable volume of an individual tree of <i>Tectona grandis</i> in planted forests in Panama. The total volume equation was developed for one and two input variables: the diameter at the breast height (1.3 m) (dbh) and dbh and total height. The merchantable volume equation was developed for variable-top diameters.</p>		
<p>The material for the study was collected from the commissioner's plantations in Panama during several years. The data included measurements from a total of 444 felled trees. For each tree diameter at the breast height, total height of the tree and diameter measurements at relative heights from a tree at ten percent intervals were measured. All the trees in the data came from seedling-based plantations. There were no cloned trees. Diameters were measured with bark and all the modeled equations predicted volume with bark. The total data was divided into two groups: one was used to model the equations and one to test the quality of the modelled equations. Stratified random sampling was used to select trees for the testing dataset. A total of 21 equations was modelled with a statistic programme. Equations from other studies for teak's volume were included in the testing phase with the independent dataset.</p>		
<p>The testing showed that the equations tested in the study proved to fit better to estimate volumes in this kind of data than the equations in other studies. Calculating the total volume with the equation with dbh as only variable is easier and quicker to use and the measurement of dbh is an accurate task. The measurement of height can be difficult to measure consistently in standing trees and it is more time-consuming. Equations with dbh and height as input variables give more accurate results than equations where dbh is the only variable. Due to this study, the commissioner has volume equations that base on its own data. The equations can predict the volumes of teak in Panama reliably and more precisely than before.</p>		
<b>Keywords</b>		
Stem volume, regression, teak, Panama, modeling		

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	5
2	TIIKKI.....	6
2.1	Apical Reforestadora S.A. ....	8
2.2	Tiikin viljely .....	10
3	REGRESSIOANALYYSI.....	12
4	MALLIN TULKINTA .....	15
4.1	Koko mallin ja yksittäisen muuttujan merkitsevyys .....	15
4.2	Selitysaste .....	16
4.3	Jäännöskuvio.....	18
4.4	RMSE ja harha .....	19
5	PUUSTON TILAVUUDEN ARVIOINTI.....	20
6	POHDINTA.....	22
	LÄHTEET.....	24
	LIITE	

Liite 1. Stem volume equations for *Tectona grandis* in Panama - raportti

## 1 JOHDANTO

Metsäinventoinnissa puun tilavuuden määrittäminen on yksi tärkeimpiä tehtäviä metsänhoidon suunnittelun ja metsän arvon määrittämisen kannalta. Plantaasiviljelmillä koealan puuston tilavuus lasketaan yksittäisten puiden runkotilavuuksien kautta. Koealalta mitataan yksittäisten puiden tilavuudet ja ne lasketaan yhteen, jolloin saadaan koealan tilavuus. Tämä tilavuus voidaan sitten laajentaa hehtaarikohtaiseksi tilavuudeksi muuntoluvun avulla.

Opinnäytetyön tavoite oli laatia toimeksiantajalle tiikin (*Tectona grandis*) runkotilavuusyhtälöt käyttäen mallinnukseen toimeksiantajan keräämää aineistoa. Puun runkotilavuudella tarkoitetaan kannon yläpuolelle jäävän runkoon kuuluvan puuosan tilavuutta. Työn tavoitteena oli laatia kolme runkotilavuusyhtälöä: kokonaistilavuuden (stem volume,  $V$ ) yhtälöt, joissa toisessa muuttujana rinnankorkeusläpimitta (dbh) ja toisessa dbh ja puun pituus ( $H$ ), ja kaupallisen tilavuuden (merchantable stem volume,  $V_{\text{merch}}$ ) yhtälö, jossa muuttujina dbh,  $H$  ja määritettävä minimiläpimitta ( $D_{\text{merch}}$ ).

Työn toimeksiantajana toimi Apical Reforestadora S.A, panamalainen tiikin kasvatukseen erikoistunut yritys. Tiikille on olemassa aiempia runkotilavuusyhtälöitä sekä luontaiselle että viljellylle tiikille. Yritys on tähän saakka käyttänyt Costa Ricassa mallinnettua tiikin runkotilavuusyhtälöä (Pérez & Kanninen 2003). Toimeksiantaja teetti tämän tutkimuksen tarkoituksenaan parantaa metsäinventointinsa tarkkuutta laatimalla tilavuusyhtälöt omasta aineistosta.

Työhön sisältyi kerätyn mitta-aineiston esikäsitteily ja järjestäminen mallinnettavaan muotoon. Kirjallisuudesta ja aikaisemmista tutkimuksista haettiin yhtälömalleja, joille estimoitii SPSS-tilasto-ohjelman regressioanalyysillä parametrit. Mallinnusaineistoon ( $N=399$ ) estimoidut mallit pisteytettiin RMSE:n, harhan ja selitysasteen (adj.  $R^2$ ) perusteella. Myös jäännöskuvio vaikutti mallien arviointiin. Parhaat mallit valittiin edelleen testattavaksi testiaineistossa ( $N=40$ ) yhdessä aiemmissä tutkimuksissa laadittujen mallien kanssa.

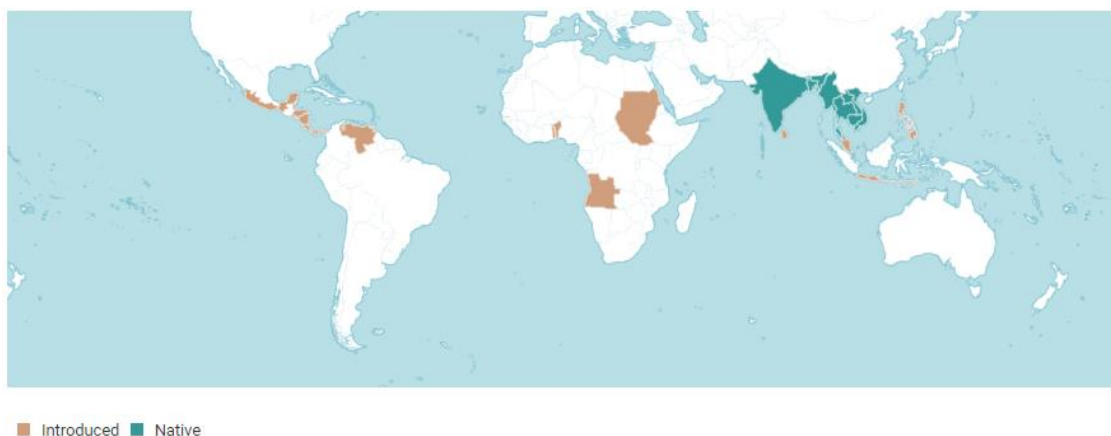
Työn tuloksista ja metsäinventointiin käytettäviksi valituista malleista raportoiitiin toimeksiantajalle englannin kielisessä raportissa (liite 1). Liitteenä oleva ra-

portti on osa opinnäytetyötä. Raportissa kuvataan tutkimusaineisto, tutkimuksen vaiheet ja tulokset. Toimeksiantajan antaman aikataulun takia, opinnäytetyöstä tehtiin tutkimusosa ensin ja vasta sen jälkeen viitekehys, mikä eroaa tavanomaisesta opinnäytetyön prosessista.

Tavoitteen saavuttamiseksi työssä perehdyttiin metsiä kuvaavien mallien ja tilastomatematiikkaan lisäksi itse tiikkiin ja toimintaympäristöön, jossa laadittuja malleja tullaan käyttämään. Tilastotieteen perustuntemus ja regressioanalyysin syvempi osaaminen ja perehtyminen olivat edellytyksinä tavoitteen toteuttamiseksi menestyksellisesti. Hyvä matemaattinen osaaminen entuudestaan auttoi asiaa.

## 2 TIIKKI

Tiikki (*Tectona grandis*) on yksi maailman arvokkaimpia lehtipuita. Luontaisesti tiikkiä esiintyy Etelä- ja Kaakkois-Aasiassa, muun muassa Intiassa, Myanmarissa ja Thaimaassa. Viljeltynä tiikkiä esiintyy Aasian lisäksi Afrikassa ja Latinalaisessa Amerikassa (kuva 1). Luontaisesti syntyneen tiikin saatavuus on laskussa liikakäytön, metsäkatojen ja luontaisen tiikin vientikieltojen takia. (Kollert & Kleine 2017, 15.) Tästä johtuen viljellyn tiikin merkitys kasvaa ja sen arvostus on lisääntynyt viime vuosina. Pyöreän puun kasvava kysyntä globaaleilla markkinoilla näkyy myös tiikin kasvavassa kysynnässä. (Apical Reforestadora S.A. 2017.)



Kuva 1. Tiikin levinneisyys maailmalla (Plants of the world online 2017). Sinisellä on merkitty luontainen kasvualue ja ruskealla viljeltyalue.

Tiikki kasvaa noin 30–40 metrin pituiseksi. Se kasvattaa jyrkän rungon, jonka läpimitta plantaaseilla päätehakuissa on 40–60 senttimetriä, riippuen

kasvatusajasta. Luonnossa tiikin rinnankorkeusläpimitta (1,3 cm korkeudella) kasvaa 1-1,5 metriin. (Skandinaviska Träimport 2017.)

Tiikki on trooppisten alueiden puulaji, joka soveltuu monenlaisiin ilmastoihin. Optimaalisissa kasvuolosuhteissa monsuuni-ilmastossa sademäärä on 1300–2000 mm/vuosi ja kuivakausi kestää kolmesta viiteen kuukautta. Tiikki sietää hyvin lämpötilojen vaihtelua, optimi kasvuoloissa lämpötila on 16–40 asteen välillä. Maankorkeuden puolesta tiikkiä esiintyy merenpinnan tasolta 1 200 metrin korkeuteen merenpinnasta. Maaperän suhteen ohut maakerros, raskas savimaa, tiivis tai vesittyntä maakerros ovat suurimmat kasvurajoitteet tiikille. Parhaaseen kasvuun tarvitaan syvä, huokoinen ja ravinteikas maa, jossa on riittävästi magnesiumia ja kalsiumia. (Weaver 1993, 2.)

Tiikin sydän- ja pintapuu ovat helposti toisistaan erottuvia (kuva 2). Pintapuu on väriltään kellertävän ruskeaa kun taas sydänpuu on kovempaa ja väriltään punertavan ruskeaa. Sydänpuu tummuu jonkin verran ajan kanssa. Puulla on selvästi erottuvat vuosirenkaat. Puu on suorasyistä ja sen kutistuminen on vähäistä. Puuaineksestä on kohtuullisen kovaa, keskiraskasta ja kiinteää. (Weaver 1993,13.)



Kuva 2. Tiikin poikkileikkaus, jossa sydänpuu ja pintapuu erottuvat selkeästi. (Apical Re-forestadora S.A. 2017)

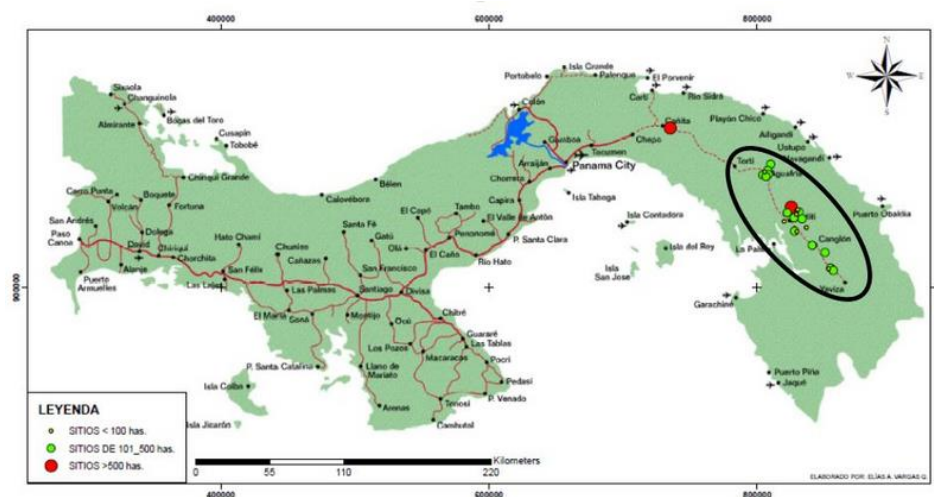
Tiikin säänsietokyky on hyvä puun sisältämien öljyjen johdosta. Puu kestää hyvin kuumuutta ja lämpötilojen vaihteluita. (Marron Wood 2017.) Tiikkiä on helppo työstää, mutta puuainekseen sisältämä pioksidi kuluttaa leikkaavia teriä runsaasti (Weaver 1993,13). Tiikkiä voidaan käyttää monipuolisesti niin sisä-

kuin ulkokäyttöön (Marron Wood 2017). Tiikkiä käytetään erityisesti laiva- ja veneteollisuudessa, korkealaatuisissa huonekaluissa ja rakennustöissä (Malmström 2013, 1).

Tiikin hintaan vaikuttavat tukin koko ja laatu. Laatuun vaikuttavia tekijöitä ovat runkomuoto, sydänpuun osuus, vuosirenkaiden säännöllisyys, oksaisuus, väri ja rakenne. Yleisesti maksetaan suurempaa hintaa suurista pitkään kasvanneista tai kasvatetuista puista kuin lyhyellä kiertojalla kasvatetuista. Kiertojen pituudella on joidenkin tutkimuksien mukaan vaikutusta puun kestävyysominaisuuksiin. Koska tiikin hinnoittelussa on paljon tapauskohtaisia muuttujia, on yksiselitteisen hinnaston luominen vaikeaa. Suuntaa antavasti vuosina 2005 -2014 Myanmarista tuodun tiikin hinta oli 615–1 000 Yhdysvaltain dollaria kuutiolta. Samalla aikavälillä Latalalaisesta Amerikasta tuodun tiikin hinta vaihteli 320–430 Yhdysvaltain dollarin välillä kuutiolta. (Kollert & Kleine 2017, 88-89.)

## 2.1 Apical Reforestadora S.A.

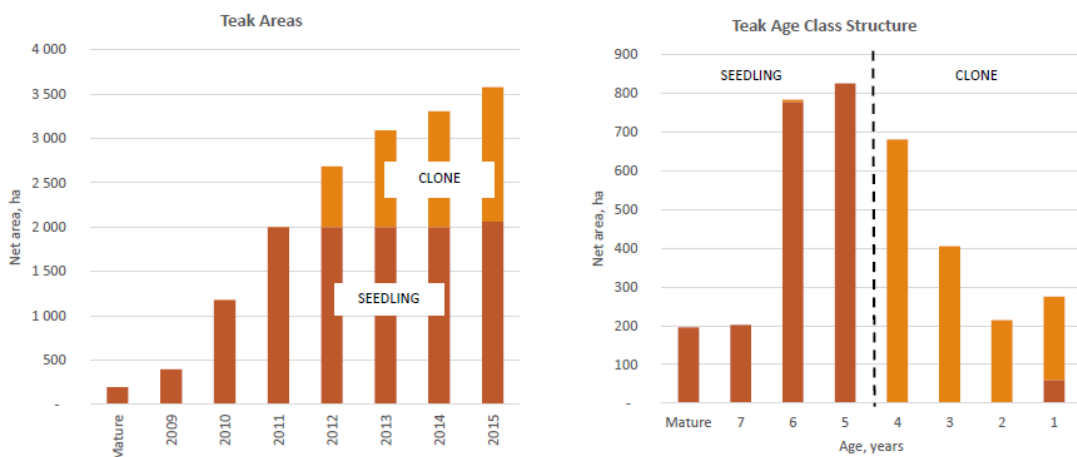
Apical Reforestadora S.A. on panamalainen metsänviljely-yritys, joka on perustettu vuonna 2008. Yrityksen tarkoitus on kehittää ja kasvattaa korkealaatuisia tiikkiviljelmiä tasapainossa sosiaalisten ja ympäristöllisten tavoitteiden kanssa. Apical omistaa noin 5 300 hehtaaria maata, joista 3 670 hehtaaria on tiikkiviljelmiä. Plantaasit sijaitsevat Panamassa Dariénin ja Panaman maakuntien alueella (kuva 3). Kolmen viime vuoden aikana yhtiö on vienyt puuta vuosittain yli 10 000 kuutiota. (Apical Reforestadora S.A. 2017.)



Kuva 3. Apicalin plantaasit Panamassa (Apical Reforestadora S.A. 2017)



Apical perusti vuonna 2010 oman taimitarhan. Aikaisemmin istutuksissa on käytetty muualta saatua perimältään alueelle soveltuvaa taimimateriaalia. Apical kehittää jatkuvasti omaa kloonimateriaaliaan, jolla pyritään parantamaan kasvatettavan tiikin laatua. Nykyisissä istutuksissa käytetään niin siemensyntisiä sekä kloonattuja taimia (kuva 4). (Apical Reforestadora S.A. 2016.) Apical on mukana laajemmassa yhteisössä, joka kehittää kloonimateriaalin lisäksi metsänhoitokäytäntöjä, hakkuita ja tiikin vientimarkkinoita (Apical Reforestadora S.A. 2017). Modernin taimitarhan ja metsänhoitomenetelmien lisäksi Apicalilla on käytössä viivakoodeihin perustuva varastokirjanpito. Kuvassa 2 näkyy tukin päässä oleva koodauslappu. Viivakoodeilla taataan tehokas seuranta katkotuille ja myydyille tukeille sekä varmistetaan, että asiakkaiden tarkoihin mitta- ja laatuvaatimuksiin pystytään vastaamaan. (Apical Reforestadora S.A. 2017.)



Kuva 4. Apicalin tiikki viljelmät. (Apical Reforestadora S.A. 2016)

Punaisella on merkitty siemensyntisen taimimateriaalin osuus ja keltaisella kloonattujen puiden osuus.

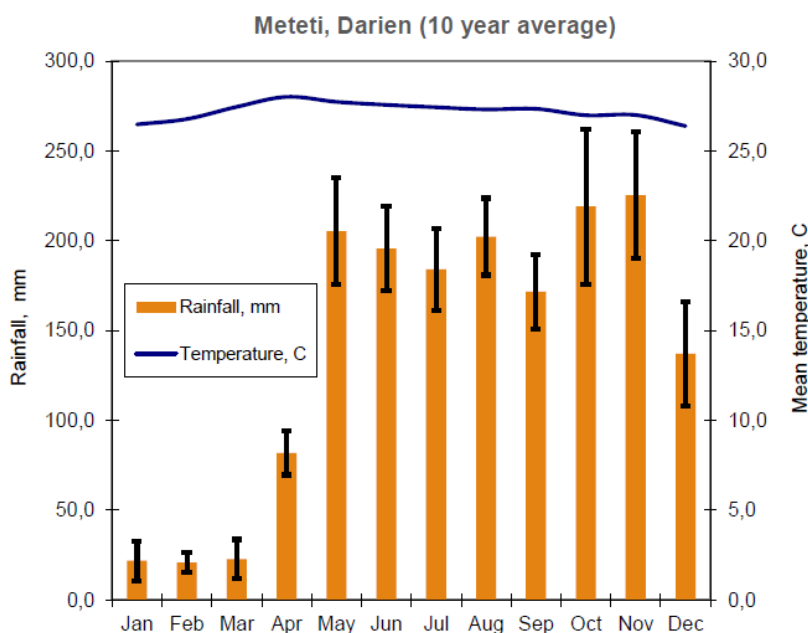
Apicalilla on ollut FSC-sertifikaatti vuodesta 2012 lähtien. Apical on suojellut omistamistaan maista 23 prosenttia. (Apical Reforestadora S.A. 2017.) Apicalilla on vuonna 2016 laadittu metsänhoitosuunnitelman, jonka mukaan yhtiö hoitaa metsiään kestävästi ja FSC:n kriteerien mukaisesti. Suunnitelmassa otetaan huomioon myös metsänviljelyn vaikutukset paikallisiin yhteisöihin ja niiden kehitykseen. (Garibaldo 2016.) Apical toimii yhteistyössä paikallisten koulujen ja yhteisöjen kanssa ja pitää yllä yksityisesti noin 100 kilometrin tieverkostoa. Yhtiöllä on myös villieläinten seurantaohjelma, jolla kartoitetaan plantaaseilla eläviä ja ruokailevia eläimiä. (Apical Reforestadora S.A. 2017.)

Apicalilla on ollut vuodesta 2011 käytössä työturvallisuusohjelma, jonka tarkoitus on kehittää ja ylläpitää työmetodeja ja yhtiön sisäistä kulttuuria, jotka minimoivat työtapaturmia (Apical Reforestadora S.A. 2016).

## 2.2 Tiikin viljely

Tiikin viljelyyn on olemassa erilaisia ohjeistuksia niin metsänhoidollisiin kuin harvennuksia koskeviin asioihin. Tiikin tuottavuus riippuu paljon juuri harvennuksien ajoituksesta ja puuston kiertoajoista. Aasiassa käytetään yleisesti paljon pidempiä kiertoaikoja kuin Afrikassa ja Latinalaisessa Amerikassa. (Malmström 2013.)

Tässä esitetään Apicalin käyttämä viljelymalli, koska sillä on merkitystä laatiemien runkotilavuusyhtälöiden käytön kannalta. Hoitomenetelmien poiketessa paljon Apicalin käyttämistä tai istutusten sijainnin poikkeaminen merkittävästi yhtiön maiden kasvuolosuhteista, tiikin runkomuoto voi muodostua erilaiseksi. Tällöin laadittu tilavuusyhtälöä ei enää voida luotettavasti soveltaa. Varsinkin pelkkää läpimittaa käyttävät tilavuusyhtälöt antavat helpommin suhteessa enemmän harhaisia tuloksia kuin läpimittaa ja pituutta käyttävät tilavuusyhtälöt. Kuva 5 havainnollistaa Dariénin alueen viljelmillä valitsevia ilmasto-olosuhteita. Kuvassa näkyy hyvin reilu kolmen kuukauden kuivakausi ja kohtalaisen tasainen lämpötila läpi vuoden.



Kuva 5. Sademäärät ja lämpötilat Dariénin alueella kymmenen vuoden keskiarvona (Apical Reforestadora S.A. 2016)

Samanlainen toimintaketju on kuitenkin yleisesti käytössä tiikkiviljelmillä. Kiertoajat, lannoitustarve, karsinta, harvennusmäärät ja -ajoitukset vaihtelevat toimijan ja maantieteen sekä tavoitteiden mukaan. Yleisesti valtion viljelmillä suositetaan pitempiä kiertoaikoja. Viljelmien kiertoajat vaihtelevat 16 vuodesta 120 vuoteen. (Kollert & Kleine 2017, 49–63.)

Viljelypaikan valinta vaikuttaa puuston kasvuun merkittävästi. Viljelmiä perustettaessa tehdään usein maanäytetutkimukset. Maa muokataan ennen istutusta. Istutuslinjat tehdään koneellisesti maaston salliessa. Muokkauksessa otetaan huomioon eroosion ehkäiseminen ja alueen vesitalouden huolto. Usein alueille tehdään myös rikkakasvien ja heinätorjunta ennen istutusta. (Garibaldo 2016.)

Istutuskausi Panamassa on toukokuusta syyskuun alkuun, jolloin taimet ehtivät juurtua ennen kuivaa kautta. Istutustiheytenä Apical käyttää 500- 1 000 tainta per hehtaari riippuen taimimateriaalin perimästä ja kasvupaikasta. Istutus tapahtuu manuaalisesti tasaisiin riveihin. Istutettujen taimien sijainti plantaasilla merkitään paaluilla. Kaikki istutuskohteet lannoitetaan istutuksen jälkeen. Istutuslannoite sisältää typpeä, fosforia ja kaliumia. Ylläpitolannoituksia tehdään valituilla kohteilla tarpeen mukaan. (Apical Reforestadora S.A. 2017; Garibaldo 2016.)

Ruohontorjuntaa tehdään istutuksesta noin kolmen vuoden ikään saakka. Torjunnassa käytetään sekä kemiallisia että mekaanisia menetelmiä. (Garibaldo 2016.) Viljeltyä tiikkiä tavallisesti karsitaan ahkerasti oksattoman tukin saamisen varmistamiseksi (Kollert & Kleine 2017). Apical tekee karsintaa vuosittain noin 7 metrin korkeuteen saakka ja noin kahdeksaan ikävuoteen asti (kuva 6) (Apical Reforestadora S.A. 2017; Garibaldo 2016).



Kuva 6 Karsittua tiikki taimikkoa (Apical Reforestadora S.A. 2017)

Ennen päätehakkuuta noin 18–25 vuoden iässä tiikkiä harvennetaan 2-3 kertaa. Harvennusvoimakkuudet vaihtelevat harvennuskertojen ja halutun tiheyden mukaan. Käytetyt harvennusvoimakkuudet Apicalilla ovat 25 prosentista 50 prosentin poistumaan kasvavasta puustosta. Harvennukset suoritetaan ensisijaisesti alaharvennuksen tapaisina, poistuva puusto on sairaita ja huonosti kasvavia puita. Vuotuinen kasvu noin 20 vuoden kiertoaajalla on Apicalin viljelmillä 16–17 m<sup>3</sup>/ha/vuosi. Siemenmateriaalin jalostuksella ja kloonauksella voidaan tulevaisuudessa päästä 20 m<sup>3</sup> hehtaarituohtoon vuodessa. (Garibaldo 2016.) Ensimmäisestä harvennuksesta ei saada taloudellista tuottoa, mutta se on välttämätön laadukkaan puun kasvatukselle (Kollert & Kleine 2017, 56).

Hakkuut tehdään manuaalisesti metsurityönä. Katkonta tehdään asiakkaan mittojen mukaisesti. Puut kuljetetaan metsätraktorilla, tai rinnemaastoissa vinssillä, varastoille, joista jatkokuljetus rekoilla tukkikentille. Varastoilla tukit mitataan, laadutetaan ja merkitään viivakoodeilla. (Garibaldo 2016.) Apicalilla päivittäinen toimitusmäärä asiakkaille on noin 100 -150 kuutiota päivässä (Apical 2016).

### 3 REGRESSIOANALYYSI

Lähtökohtana tilastollisessa tutkimuksessa on kerätty tutkimusaineisto. Mittaamalla saatuja havaintoja kutsutaan havaintoyksiköiksi. Havaintoyksiköstä voidaan kerätä monenlaisia tietoja regression muuttujiksi. Perusjoukoksi kutsu-

taan kaikkien havaintoyksikköjen muodostamaa kokonaisuutta. Otos on perusjoukkoa pienempi havaintoyksiköiden kokonaisuus, johon kaikilla havaintoyksiköillä on yhtä suuri mahdollisuus tulla valituksi. Edustava otos kuvaa ominaisuuksiltaan mahdollisimman hyvin perusjoukkoa. (KvantiMOTVa 2013.)

Otos voidaan muodostaa erilaisilla otantamenetelmillä. Yksinkertaisessa satunnaisotannassa arvotaan perusjoukosta haluttu määrä havaintoja. Systemaattisessa otannassa perusjoukko järjestetään jonoon ja valitaan otokseen tulevat havainnot määräväleihin, esimerkiksi joka toinen tai joka kymmenes. Ositetussa otannassa perusjoukko jaetaan ositteisiin halutun ominaisuuden mukaan. Jokaisesta ositteesta tehdään joko satunnais- tai systemaattinen otanta. Ositteista voidaan ottaa eri määrä havaintoja mukaan otokseen. Ositettu otanta soveltuu hyvin heterogeeniselle perusjoukolle. (KvantiMOTVa 2013.)

Regressioanalyysi on tilastollinen mallinnusmenetelmä, jolla pyritään selittämään muuttujien välisiä riippuvuussuhteita. Regressioanalyysin tulos on regressiomalli. Yksinkertaisemmillaan muuttujien välinen suhde on lineaarinen, jolloin regressioyhtälö on suoran yhtälö, jolloin puhutaan lineaarisesta regressiosta. (Tilastokeskus 2017.) Lineaarinen regressiomalli on kaavan 1 mukainen. Muuttuja  $x$  voi kaavassa olla muodoltaan monimutkainenkin yhtälö. Yleensä  $x_1$  -arvo kaikilla havainnoilla on yksi, jolloin  $\beta_1$  on yhtälön vakiotermi. Jos vakiotermiä ei ole niin regressiosuora kulkee origon kautta. (Maltamo & Laukkanen 2001, 1.)

$$y_i = \beta_1 * x_1 + \beta_2 * x_2 + \beta_3 * x_3 + \dots + \beta_n * x_n \quad (1)$$

jossa	$y_i$	selitettävä muuttuja
	$\beta_1 - \beta_n$	ennustettavia parametreja
	$x_1 - x_n$	selittäviä muuttujia

Lineaarinen malli kuvaa vain lineaarista riippuvuutta selitettävän ja selittävien muuttujien välillä. Jos riippuvuus on epälineaarinen, sitä voidaan joissain ta-

pauksissa linearisoida muuntamalla yhtälö esimerkiksi logaritmi tai juurimuotoon. Linearisoitu yhtälö voidaan ratkaista samalla tavalla kuin lineaarinen regressioyhtälö. (Maltamo & Laukkanen 2001, 15–16.)

Aidosti epälineaarissa mallissa on vähintään yksi parametri (eli matemaattinen vakio), jota ei voida muuttaa selittävän muuttujan kertoimeksi, eikä sitä siten voi eikä kannata yrittää linearisoida. Epälineaarinen malli voidaan ratkaista samalla tavalla kuin lineaarinenkin, eikä tilasto-ohjelmistoilla parametrien estimointi ole sen vaikeampaa kuin lineaarisessakaan yhtälössä. Epälineaarisen regression haittapuoli on se että siinä mallin muoto joudutaan valitsemaan etukäteen, toisin kuin lineaarisessa regressiossa. Epälineaarille mallille voidaan laskea samat tunnusluvut kuin lineaarisellekin mallille. (Maltamo & Laukkanen 2001, 15–18.)

Regressioanalyysissä voidaan samaan aikaan tulkita yhden tai useamman selittävän muuttujan (x-muuttujat) suhdetta selitettävään muuttuajaan (y-muuttuja). Hyvässä regressiomallissa on mukana kaikki tarkasteltavaan muuttuajaan oleellisesti vaikuttavat selittävät muuttujat. Tästä syystä on joissain tapauksissa hyvä ottaa useampi selittävä muuttuja mallinnukseen. (Taanila 2010.)

Regressiomalli voi olla ennustava tai selittävä. Ennustavana mallina yhtälöllä pyritään arvioimaan uusia y:n arvoja. Arvoja ennustettaessa tulee ottaa huomioon mallin käyttöalue, joka on se alue, josta on havaintoja aineistossa, josta malli on laskettu. Selittävä malli puolestaan kertoo selitettävän ilmiön osakokonaisuuksien vaikutuksesta kokonaisuuteen. (Taanila 2010.)

Regressiomallit ovat herkkiä aineistossa oleville poikkeaville havainnoille (Taanila 2017). Poikkeavan arvon kohdalla tulee aina arvioida onko havainto virheellinen vai onko poikkeavuudelle jokin selitys. Poikkeavien arvojen kohdalla tulee pohtia, onko perusteltua ottaa poikkeava havainto mukaan mallinnukseen. Poikkeavat havainnot voidaan tunnistaa laatimalla selittäville muuttujille hajontakaaviot. (Taanila 2010.)

Regressiossa mallissa olevat parametrit ovat kiinteitä, tuntemattomia suureita. Niitä estimoidaan käyttämällä yleisesti niin sanottua PNS eli pienimmän ne-

liösumman menetelmää (OLS Ordinary Least Squares). Menetelmässä pyritään minimoimaan mallin virheiden neliösumma (SSE) (Katso luku 4.2). (Maltamo & Laukkanen 2001, 1.)

## 4 MALLIN TULKINTA

Mallinnetun yhtälön tilastollisen merkittävyyden ja hyvyyden tulkintaan on monta keinoa. Erilaisia tilastollisia testejä on useita, joten tässä esitellään vain tutkimuksen kannalta oleelliset testit. Vaikka malli olisi tilastollisten tunnusten mukaan hyvä, tulee sen myös toimia käytännössä. Tässä asiassa tärkeässä osassa on käytännön tilanteesta ja taustalla olevista teorioista johdetut perustelut. (Taanila 2010.)

### 4.1 Koko mallin ja yksittäisen muuttujan merkitsevyys

Koko mallin tilastollista merkitsevyyttä testataan F-testillä (Taanila 2010). Tilastollinen F-testi kertoo pystytäänkö valituilla muuttujilla yleensäkin selittämään selitettävän muuttujan vaihteluita (KvantiMOTVb 2013). Testauksessa käytetään nollahypoteesia ja sille asetettavaa vastahypoteesia. Nollahypoteesi väittää kaikkien selittävien muuttujien regressiokertoimien olevan nolla. Vastahypoteesi väittää, että kertoimet eroavat nolasta. (Taanila 2010.)

Testille saadaan myös merkitsevyytaso (sig. tai p-arvo), joka on avainasemassa testin tulkinnessa. Merkitsevyytaso kertoo kuinka suuri mahdollisuus on, että havaittu ero nollahypoteesista riippuu sattumasta. Yleisimmin merkitsevyytastossa käytetyt rajat ovat 0,05, 0,01 ja 0,001. Nollahypoteesi hylätään jos testin merkitsevyytaso on valittua rajaa pienempi. (Ahonen s.a.)

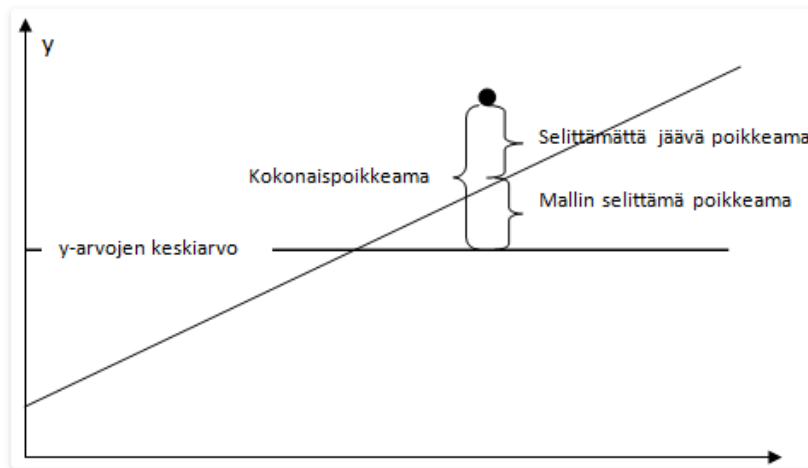
Mallissa olevan yksittäisen selittävän muuttujan osalta merkitsevyyttä testataan t-testillä. Testi laskee jokaiselle mukana olevalle muuttujalle t-arvon. Testissä nollahypoteesina toimii väite, että testattavaan selittävään muuttujaan liittyvä regressiokerroin on nolla. Vastahypoteesi puolestaan väittää, että kerroin on nolasta poikkeava. (Taanila 2010)

Testistä saadaan samalla tavalla merkitsevyytaso kuin F-testistä. Merkitsevyytaso yksittäisellä muuttujalla vaihtelee sen mukaan mitä muita muuttujia mallissa on. Jos nollahypoteesi jää voimaan, jätetään kyseinen muuttuja

yleensä mallista pois, jollei sen mukana olemiselle ole painavia teoreettisia tai käytännöllisiä syitä. Muuttujan pois jääminen vaikuttaa muiden muuttujien merkitsevyytasoihin ja niiden luotettavuuteen. (Taanila 2010, 19.)

## 4.2 Selitysaste

Selitysaste on tunnusluku, joka kertoo kuinka suuri osuus selitettävän muuttujan vaihtelusta voidaan selittää mallilla. Selitysasteen tai selityskertoimen tunnus on  $R^2$ . Mallin kokonaisvaihtelu voidaan jakaa kahteen osaan: selitettyyn ja selittämättömään vaihteluun (kuva 7). (Maltamo & Laukkanen 2001, 8.)



Kuva 7 Regressiomallin kokonaisvaihtelu (Taanila 2017)

Kuva hahmottaa selitysasteen muodostumista. Nouseva suora on mallin ennustama  $y$ :n arvo, regressiosuora.

Selitysaste lasketaan seuraavalla kaavalla.

$$R^2 = SSR/SST \quad (1)$$

jossa	$R^2$	selitysaste
	$SSR$	mallin selittämän vaihtelun neliösumma
	$SST$	kokonaisvaihtelun neliösumma

Kokonaisvaihtelun neliösumma muodostuu mallin selittämän vaihtelun neliösummasta ja selittämättömän eli virheen neliösummasta. Mallin  $SSR$  ja  $SSE$  lasketaan seuraavien kaavojen mukaisesti. (Maltamo & Laukkanen 2001, 8.)

$$SSR = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (2)$$



jossa	$SSR$	mallin selittämän vaihtelun neliösumma
	$\hat{y}_i$	mallin ennustama $y$ :n arvo
	$\bar{y}$	$y$ :n arvojen keskiarvo

$$SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (3)$$

jossa	$SSE$	mallin selittämättömän vaihtelun neliösumma
	$y_i$	$y$ :n arvo kohdassa $i$
	$\bar{y}$	$y$ :n arvojen keskiarvo

Selitysaste vaihtelee nollan ja yhden välillä. Mitä suurempi selitysaste on, sitä paremmin valitut muuttujat selittävät selitettävää muuttujaa. (KvantiMOTVb 2013.) Mallissa, jossa ei ole vakiotermejä, selitysasteen tulkinta ja laskentatapa ovat erilaiset kuin mallissa, jossa on vakio-termi. Jos malliin otetaan uusia selitettäviä muuttujia, ei tavallinen selitysaste pysty ottamaan huomioon todellista selitysasteen muutosta. (Maltamo & Laukkanen 2001,8.)

Korjattu  $R^2$  huomioi mallin sisältämien muuttujien lukumäärän. Se on aina pienempi tai yhtä suuri kuin tavallinen selitysaste. Korjattua selityskerrointa käytetään, kun halutaan verrata regressioanalyysien tuloksia toisiinsa. Toisin kuin tavallinen selitysaste, korjattu  $R^2$  voi pienentyä, jos malliin lisätään niin sanottuja turhia selittäjiä. (KvantiMOTVb 2013; Maltamo & Laukkanen 2001,8.) Korjattu selitysaste lasketaan seuraavalla kaavalla. (Idre 2017.)

$$\text{Korjattu } R^2 = 1 - \frac{(1 - R^2) * (N - 1)}{N - p - 1} \quad (4)$$

jossa	$R^2$	selitysaste
	$N$	otoksen koko
	$p$	selittävien muuttujien määrä

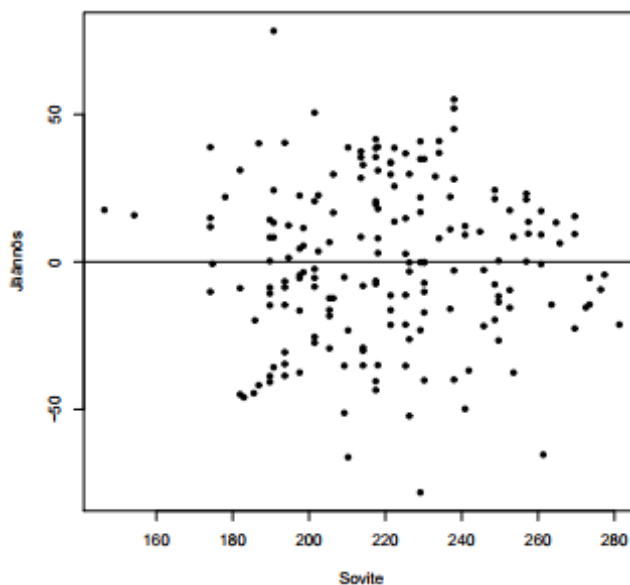
Selitysaste lasketaan aina suhteessa muuttujan kokonaisvaihteluun. Tämän takia malleja vertailtaessa tulisi aina verrata vain samasta aineistosta samalle

selitettävälle muuttujalle tai sen muunnokselle tehtyjä malleja. Hyvä selitysaste ei välttämättä takaa hyviä ennusteita. (Maltamo & Laukkanen 2001,8-9.)

### 4.3 Jäännöskuvio

Selkeä tapa havainnoida mallin lineaarisuutta ja residuaalien jakautumista on jäännöskuvio. Residuaalilla tarkoitetaan mallin ennustaman arvon ja havaitun arvon eroa. Tähän parhaiten sopii hajontakuviio, jossa x-akselille sijoitetaan mallin ennustamat arvot ja y- akselille vastaavat residuaalit. Jäännöskuvion voi tehdä residuaaleista itsestään tai normitettuna. Normitettujen residuaalien keskiarvo on nolla ja keskihajonta yksi. Tilasto-ohjelmat tarjoavat usein mahdollisuuden normitettujen arvojen laskemiseen. (Taanila 2010.) Tutkimuksessa olevissa residuaalikuviissa arvoja ei ole normitettu.

Jäännöskuviossa pisteiden tulisi olla satunnaisesti jakautuneita, ilman miinäänlaista säännönmukaisuutta. (Kuva 8). Jos pisteissä on havaittavissa säännönmukaisuutta, ei selitettävän ja selitettävien muuttujien välinen yhteys ole lineaarinen. Jos residuaalit ovat jakautuneet kiilamaiseksi ryhmäksi, on jäännöskuviossa viitteitä siitä, etteivät residuaalit ole yhtä suuria läpi aineiston. Jäännöskuviosta voidaan havaita myös poikkeavia havaintoja mutta ensisijaisesti poikkeamien tarkastelu tehdään hajontakuviolla. (Taanila 2010, 12–14.)



Kuva 8 Hyvä jäännöskuvio (Nyblom 2015, 15)

Jos jäännöskuviossa havaitaan lineaarisuutta tai residuaalien yhtäsuuruusehdon rikkomista voidaan mallia korjata sopivammaksi lisäämällä tai korjaamalla muuttuja valintaa. Malli voi toimia käytännössä, vaikka residuaalien yhtäsuuruutta jossain määrin rikotaan. Tällöin mallin merkitsevyytestit eivät kuitenkaan ole täysin päteviä. (Taanila 2010, 14.)

#### 4.4 RMSE ja harha

RMSE (root mean square error) eli mallin keskivirhe on yksi käytetyimmistä tunnuksista mallin hyvyyden arvioinnissa. Siinä verrataan ennustettujen ja havaittujen arvojen eroja ja se sisältää mallin virhetermien keskihajonnan ja systemaattisen virheen (harhan). Mitä suurempi keskivirhe on sitä pienempi on mallin selitysvoima. Keskivirheen suuruutta on arvioitava suhteessa selitettävän muuttujan mittaluokkaan. Kaava 5 on keskivirheen laskentakaava. (KvanttiMOTVb 2013; Maltamo & Laukkanen 2001,8-9.)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (5)$$

jossa	RMSE	Keskivirhe
	$y_i$	$y$ :n arvo kohdassa $i$
	$\hat{y}_i$	mallin ennustama $y$ :n arvo
	$n$	havaintojen lukumäärä.

Keskivirheen lisäksi tarkastellaan tarvittaessa mallin virheiden keskiarvoa eli harhaa (BIAS). Linearisessa mallissa aineistosta laskettu harha on yleisesti nolla tai hyvin lähellä sitä, jos mallissa on mukana vakio-termi. Tämä johtuu siitä, että estimoinnissa käytetään yleisesti pienimmän neliösumman menetelmää (Ordinary Least Squares). Menetelmässä pyritään minimoimaan mallin virheiden neliösumma (SSE) (Katso luku 4.2.). (Maltamo & Laukkanen 2001, 9.) Harhaa lasketaan kaavan 6 mukaisesti.

$$b = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i) / n \quad (6)$$

jossa	$b$	Harha
	$y_i$	$y$ :n arvo kohdassa $i$
	$\hat{y}_i$	mallin ennustama $y$ :n arvo
	$n$	havaintojen lukumäärä

Harhan laskeminen on kannattavampaa epälineaarissa regressiossa tai riippumattomassa aineistossa laskettuna. Suhteellinen harha (BIAS %) lasketaan jakamalla harha joko havaittujen tai ennustettujen  $y$ :n arvojen keskiarvolla. (Maltamo & Laukkanen 2001, 9.) Tutkimuksessa on käytetty suhteellisen harhan laskentaan havaittujen tilavuuksien keskiarvoa.

## 5 PUUSTON TILAVUUDEN ARVIOINTI

Tietoa metsistä ja metsävarannoista tarvitaan muun muassa metsätalouden ja ympäristönhoidon suunnitteluun ja metsän arvon määrittämiseen. Tiedonkeruussa tulee ottaa huomioon tulosten käyttötarkoitus, metsätaloudellinen toimintaympäristö, kohdealueen ominaisuudet, tietojen tarkkuusvaatimukset ja käytössä olevat resurssit mittauksen ja talouden osalta. (Ärölä 2008.)

Metsän arvioinnin menetelmät perustuvat yleisesti otantaan ja mallien käyttöön, koska suurten metsäalueiden puustotietojen selvittäminen mittaamalla olisi mahdoton tehtävä. Otokseen perustuva metsän arviointi sisältää aina virheen mahdollisuuden, koska absoluuttisen tarkkaa mittausta ei ole olemassaakaan. Puustotunnusten mittaamiselle asetetaankin yleisesti vaatimuksia tarkkuuden, objektiivisuuden ja vertailukelpoisuuden puolesta. Virhettä pyritään pienentämään myös tarpeeksi kattavalla otoksella. Mittausvirheet johtuvat yleensä mittaajasta, mittalaitteesta, mitattavasta kohteesta tai mittausolosuhteista. (Ärölä 2008.)

Yksittäisen puun tunnusten tunteminen ja laskeminen luovat perustan laajempien metsäalueiden ja metsiköiden puuston arvioinnille. Puun osista runko on kaupallisesti arvokkainta ja sen johdosta mittauksen keskeisin kohde. Osa puun tunnuksista voidaan mitata puusta suoraan. Näitä alkuperäisiä tunnuksia ovat muun muassa läpimitta ja pituus. Osa puuston perustunnuksista taas jou-

dutaan laskemaan muiden tunnusten avulla, koska niiden mittaaminen suoraan olisi liian työlästä. Näitä kutsutaan johdetuiksi tunnuksiksi ja puun tilavuus on yksi sellainen. (Ärölä 2008, 272; Maltamo & Laukkanen 2001, 84.)

Puun tilavuudella tarkoitetaan yleensä runko-osan tilavuutta kannonkorkeudelta puun latvaan. Suomessa tilavuus ilmoitetaan yleensä kuorellisena tilavuutena, mutta joissain maissa kuorettoman tilavuuden käyttö on yleisempää. Yksittäisen puun runko ei muistuta suoraan mitään geometristä kappaletta, joille on olemassa yksiselitteiset tilavuuskaavat. Geometrinen pyörähdyskappaleiden tilavuuskaavojen pohjalta pystytään kuitenkin muodostamaan yksinkertaisia malleja puun tilavuuden laskentaan. (Ärölä 2008, 275.) Yksittäisen puun tilavuuden laskemiseksi on olemassa erilaisia mallityyppejä. Erilaisten tilavuusyhtälöiden lisäksi on olemassa runkokäyräyhtälöitä. (Maltamo & Laukkanen 2001.)

Mallinnetuilla tilavuusyhtälöillä tai taulukoilla pystytään peruskaavoja luotettavammin ennustamaan yksittäisen puun tilavuus. Suomen oloihin Ilvessalo ja Laasasenaho ovat laatineet nykyisin käytössä olevat tilavuustaulukot ja yhtälöt. (Ärölä 2008.) Yksittäisen puun tilavuusyhtälöissä käytetään usein selittävänä tekijänä läpimittaa. Yksi läpimitta kuvaa puutteellisesti puun kokoa ja ei ollenkaan sen runkomuotoa, minkä takia pelkkään rinnankorkeusläpimittaan perustuvan tilavuusmallin luotettavuus on heikko. Mallien luotettavuutta parannetaan usein käyttämällä toisena selittävänä tekijänä puun pituutta. Lisäksi voidaan tarvittaessa käyttää myös muita selittäviä muuttujia. (Maltamo & Laukkanen 2001.)

Runkokäyrällä ennustetaan rungon läpimitat eri korkeuksilla. Sillä lasketaan puun kokonaistilavuutta sekä estimoidaan halutut mitat täyttävän rungon osan pituus ja tilavuus. Runkokäyrän sovelluskohteita ovat tilavuuden laskennan lisäksi puun apteeraus, tukkien tilavuuksien estimointi läpimitta- tai pituusluokittain sekä katkonnan ohjaus hakkuukoneessa. (Maltamo & Laukkanen 2001, 92.)

Puun runkomuotoon vaikuttavia tekijöitä ovat geneettisten ominaisuuksien lisäksi kasvuympäristö ja metsänhoitotoimenpiteet. Runkomuoto saadaan sel-

ville puusta eri korkeuksilta mitattujen läpimittojen avulla. Kapenemisen määrittäminen on yksi keskeisempiä runkomuodon määrittämisen laskutoimituksia. Runkomuodolla on merkitystä tilavuusyhtälöiden käytössä. Vaikka itse yhtälö ei vaatisi runkomuotoa tai puun muotolukua, yhtälö on laskettu tietyn muotoisille puille. Jos arvioitava puu poikkeaa joiltain ominaisuuksiltaan huomattavasti yhtälön mallintamiseen käytetyistä havaintoarvoista, voi tulokseen tulla arvioitua suurempi virhe. Runkokäyrämalleihin liittyy tilavuusyhtälöitä enemmän puun runkomuoto ja siihen liittyvä muotoluku. Muotoluku saadaan kun puun tilavuus jaetaan pituuden ja poikkileikkauspinta-alan tulolla. (Ärölä 2008, 273; Maltamo & Laukkanen 2001, 92.)

## 6 POHDINTA

Työn tavoitteena oli tuottaa toimeksiantajalle metsäinventointiin soveltuvia yksittäisen puun runkotilavuuskaavoja. Työn tulokset voidaan katsoa luotettaviksi määrittellä käyttöalueella, koska havaintoaineisto oli kohtalaisen laaja. Aineistoa oli niin ensiharvennuksilta, muilta harvennuksilta kuin päätehakkuilta-kin. Tämän johdosta aineisto kattaa hyvin eri kasvuvaiheissakin olevat viljelmät luotettavasti.

Koska havaintoaineisto sisältää mittauksia kattavasti Apicalin eri plantaaseilta voidaan yhtälöitä hyvin soveltaa Panamassa samojen maakuntien alueilla sijaitsevilla muillakin viljelmillä. Yhtälöt ovat käyttökelpoisia myös sijainneissa, joilla on samankaltaiset kasvuolosuhteet kuin havaintoaineiston yksilöillä. Aineistossa oli havaintoja vain siemensyntyisistä puista. Klooniplantaaseille tulisi yhtälöt mallintaa uudelleen, koska todistettavasti kloonipuilla on erilainen runkomuoto.

Tutkimuksessa tuli selvästi esille tilastotieteessä oleva periaate, että mallia tulee soveltaa vain samalle käyttöalueelle kuin mistä havaintoaineisto on. Koska aineistossa oli vain muutama havainto puista, joiden rinnankorkeusläpimitta on alle 12 senttimetriä, alkoivat jotkin estimoidut mallit ennustaa epäloogisia tilavuuksia sitä pienemmille läpimitoille. Malleja tulisikin käyttää vain laadinta-aineiston edustamissa metsiköissä. Työn tulokset ja suositellut mallit ovat luotettavia niille määritetyllä käyttöalueella. Jos halutaan tarkempia tilavuusyhtälöitä pieniläpimittaisille puille, tulisi niille mallintaa omat tilavuusyhtälöt.

Tilavuusyhtälön, jonka ainoa muuttuja on rinnankorkeusläpimitta, käyttäminen on helpompaa ja mittaustyö nopeampaa, koska läpimitan mittaaminen on suhteellisen helppoa ja taloudellisesti kannattavaa työtä. Tilavuusyhtälöt, joissa on pituus mukana, aiheuttavat mittaustyössä enemmän kustannuksia ja vievät aikaa. Pituuden mittaaminen pystyssä olevasta puusta on myös paljon epätarkempaa kuin läpimitan. Koska tässä tutkimuksessa käytetyssä aineistossa pituus on mitattu kaadetuista puista, on puun pituuden mittauksen virhe saatu normaalia mittaustilannetta pienemmäksi.

Tilastollisen merkitsevyyden kannalta tilavuusyhtälöt, joissa käytetään muuttujina sekä läpimittaa että pituutta, ovat tarkempia kuin yhtälöt, joissa käytetään pelkkää läpimittaa. Pelkkään rinnankorkeusläpimitaan perustavat mallit ovat herkempiä systemaattisen harhan syntymiselle. Myös kasvatustiheys vaikuttaa enemmän yhden muuttujan malleihin, koska saman läpimittainen puu tiheässä puustossa on pidempi kuin harvemmassa. Kasvatustiheyden on havaittu vaikuttavan järeytymiseen merkittävämmiin kuin pituuden kasvuun.

Tutkimus tarjoaa toimeksiantajalle mahdollisuuden käyttää yhden tai kahden muuttujan kokonaistilavuuden yhtälöä inventoinnissa. Aineiston perusteella olisi ollut mahdollista laatia myös runkokäyrämalli tiikille. Resurssien puitteissa sen laatiminen kuitenkin jätettiin tutkimuksen ulkopuolelle ja keskityttiin vain tilavuusyhtälöiden laadintaan.

Aineiston alkukäsittelyssä havaittiin, että mittauksissa oli paikoin todennäköisesti tapahtunut kirjausvirhe. Poikkeamat poistettiin tämän takia mallinnusaineistosta kokonaan. Virheet paljastuivat hajontakuvaajista. Vaikka poistettujen havaintojen määrä on huomattavan pieni aineiston laajuuteen verrattuna, oli ne silti kannattava poistaa, jotta ne eivät olisi aiheuttaneet vinoumaa yhtälöihin. Kirjausvirheet ovat inhimillisiä ja niitä ei aina voida välttää. Myös mittaus-tarkkuudessa oli joissain kohteissa pientä huolimattomuutta, mutta se korjattiin aineistossa laskennallisesti kapenemisen avulla. Koska aineistoa on kerätty usean vuoden ajalta, oli mittauskäytännöissä tapahtunut joitain muutoksia mutta ne eivät vaikuttaneet mallintamiseen. Ne tiedot, jotka aikaisemmin mitatuista kohteista puuttuivat, pystyttiin riittävän luotettavasti jälkikäteen laskemaan muiden tietojen perusteella.

## LÄHTEET

Ahonen, H. s.a. SPSS Statistics 21 Statistical Package for Social Sciences. Opiskelumoniste. Mikkelin Ammattikorkeakoulu. Metsätalouden laitos.

Apical Reforestadora S.A. 2017. WWW-dokumentti. Päivitetty 6.6.2017. Saatavissa <http://apical.com.pa/> [viitattu 9.8.2017].

Apical Reforestadora S.A. 2016. Teak company in a nutshell. Apicalin konferenssiesitys Panama City 16.–17.5.2016. PowerPoint-esitys.

Garibaldo, J. 2016. Plan de Reforestación y Manejo Forestal. PDF-dokumentti. Saatavissa: [http://apical.com.pa/fileadmin/user\\_upload/Filer/PMF\\_General\\_2015\\_Resumen\\_Publico\\_17112017.pdf](http://apical.com.pa/fileadmin/user_upload/Filer/PMF_General_2015_Resumen_Publico_17112017.pdf) [viitattu 9.8.2017].

Idre. 2017. SPSS annotated output regression analysis. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://stats.idre.ucla.edu/spss/output/regression-analysis/> [viitattu 12.9.2017].

Kollert, W. & Kleine, M. 2017. The Global Teak Study. Analysis, Evaluation and Future Potential of Teak Resources. IUFRO World Series Volume 36. PDF-dokumentti. Saatavissa: <http://www.teaknet.org/global-teak-study-analysis-evaluation-and-future-potential-teak-resources-iufro-world-series-vol-36> [viitattu 24.8.2017].

KvantiMOTVa. 2013. Otos ja otantamenetelmät. WWW-dokumentti. Päivitetty 14.5.2013. Saatavissa: <http://www.fsd.uta.fi/menetelmaopetus/otos/otantamenetelmat.html> [12.9.2017]

KvantiMOTVb. 2013. Regressioanalyysi. WWW-dokumentti. Päivitetty 14.5.2013. Saatavissa: <http://www.fsd.uta.fi/menetelmaopetus/regressio/analyysi.html> [viitattu 12.9.2017].

Malmström, M. 2013. Optimal harvesting of Tectona grandis plantation stands in Costa Rica. PDF-dokumentti. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:hulib-201507212147> [viitattu 20.8.2017].

Maltamo, M & Laukkanen, S. (toim.) 2001. Metsää kuvaavat mallit. 2. uudistettu painos. Joensuu: Joensuun Yliopisto, Metsätieteellinen tiedekunta.

Marron Wood. 2017. Tiikki. WWW-dokumentti. Saatavissa: <http://www.marronwood.com/cms/tuotteet/tiikki> [viitattu 20.8.2017].

Melin, I. 2006. Tilastolliset menetelmät: Lineaarinen regressioanalyysi. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://math.aalto.fi/opetus/sovtoda/oppikirja/Reganal.pdf> [viitattu 12.9.2017].

Nyblom, J. 2015. Yleistetyt lineaariset mallit. PDF-dokumentti. Saatavissa: <http://users.jyu.fi/~junyblom/JTMprujub.pdf> [4.10.2017].



Perez, D. & Kanninen, M. 2003. Provisional equations for estimating total and merchantable volume of *Tectona grandis* trees in Costa Rica. *Forests, Trees and Livelihoods* 2003: volume 13, pp.345-359. Ab Academic Publishers.

Plants of the world online. 2017. *Tectona grandis*. L.f. WWW-dokumentti. Saatavissa: <http://powo.science.kew.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:864923-1> [viitattu 24.8.2017].

Skandinaviska Träimport Oy/Ab. 2017. Jalopuut+. Tiikki. WWW-dokumentti. Saatavissa: <http://traimport.fi/tiikki/#tab-id-2> [viitattu 24.8.2017].

Taanila, A. 2017. Akin menetelmäblogi. Lineaarinen malli. Blogi. Saatavissa: <https://tilastoapu.wordpress.com/2012/10/20/lineaarinen-malli/> [viitattu 12.9.2017].

Taanila, A. 2010. Lineaariset regressiomallit. PDF-dokumentti. Saatavissa: <http://myy.haaga-helia.fi/~taaak/m/regressio.pdf> [viitattu 10.9.2017].

Tilastokeskus. 2017. Käsitteet, Regressioanalyysi. WWW-dokumentti. Saatavissa: <http://www.stat.fi/meta/kas/regressioanalyy.html> [viitattu 10.9.2017].

Weaver, P.1993. *Tectona grandis* L.f. Teak. Verbenaceae. Verbena family. USDA Forest Service, International Institute of Tropical Forestry. PDF-dokumentti. Saatavissa: [https://www.fs.fed.us/global/iitf/pubs/sm\\_iitf064%20%20\(18\).pdf](https://www.fs.fed.us/global/iitf/pubs/sm_iitf064%20%20(18).pdf) [viitattu 19.8.2017].

Ärölä, E. 2008. Metsävarojen mittaaminen ja arviointi. Tapion Taskukirja 2008:5.2. Hämeenlinna: Kariston Kirjapaino Oy.

Suvi Suurnäkki

# Stem volume equations for *Tectona grandis* in Panama

Report

August 2017



South-Eastern Finland  
University of Applied Sciences

# TABLE OF CONTENTS

1	INTRODUCTION .....	3
2	MATERIALS AND METHODS .....	4
2.1	Material and data preparations .....	5
2.2	Equations and model fitting .....	7
3	RESULTS .....	9
3.1	Total volume models based on dbh .....	10
3.2	Total volume models based on dbh and height .....	13
3.3	Merchantable volume .....	18
4	CONCLUSIONS .....	21
	REFERENCES .....	23

Annex 1 Description of the dataset

Annex 2 Point plot graphs of the dataset

Annex 3 Comparison of the best models tested in the study for estimating total volume

Annex 4 Statistics and graphs of each model modeled in the study

## 1 INTRODUCTION

In forest inventory determination of the volume of the timber is often the most important task. Estimating the total and merchantable volume of trees is very important for the management planning and biological asset valuing of plantations. In plantation forests individual-tree volume equations are commonly used to calculate the total and merchantable volume of trees standing in the sample plot. This is done by aggregating the individual trees volumes and hence plot level volume is obtained (e.g. 6.5m<sup>3</sup> of wood in 500m<sup>2</sup> sample plot). This plot level volume is then extrapolated to an area unit (m<sup>3</sup>/ha) by multiplying the plot volume by the area expansion factor: 6.5m<sup>3</sup>/ha \* (1ha/500m<sup>2</sup>) =130m<sup>3</sup>/ha.

The aim of the study was to develop equations which would best predict the total volume and merchantable volume of an individual tree of *Tectona grandis* in planted forests in Panama. The total volume equation was developed for one and two input variables: diameter at the breast height (1.3 m) (dbh) and dbh and total height (h). The merchantable volume equation was developed to variable-top diameters. This report presents the main results of the study.

The study was commissioned by Apical Reforestadora SA de CV. Apical is a reforestation company in Panama with some 3,600 ha teak plantations under management. Until now, Apical has used volume equations developed in Costa Rica by Pérez & Kanninen (2003). Apical decided to carry out this study in order to improve the accuracy of its forest inventory work by deploying the volume equations based on its own sample data.

In the literature several mathematical expressions of the volume equations can be found. Some of the equations use dbh as the only input variable, others include dbh and h. The measurement of dbh is a quick and accurate task, while height can be difficult to measure consistently in standing trees. In addition height measuring is more time-consuming than measuring just dbh, and therefore, it is more expensive to use equations which need height to estimate volume. That's why the study also tested models that predict the total volume from dbh only.

## 2 MATERIALS AND METHODS

The material for the study was collected from Apical's plantations in Panama. The dataset includes trees from twelve plantations or tree farms. (Figure 1 and Annex 1). The material was collected by Apical from felled trees in connection with thinnings and final fellings during 2013 to 2017. All the trees in the data are from seedling based plantations, there are no cloned trees.

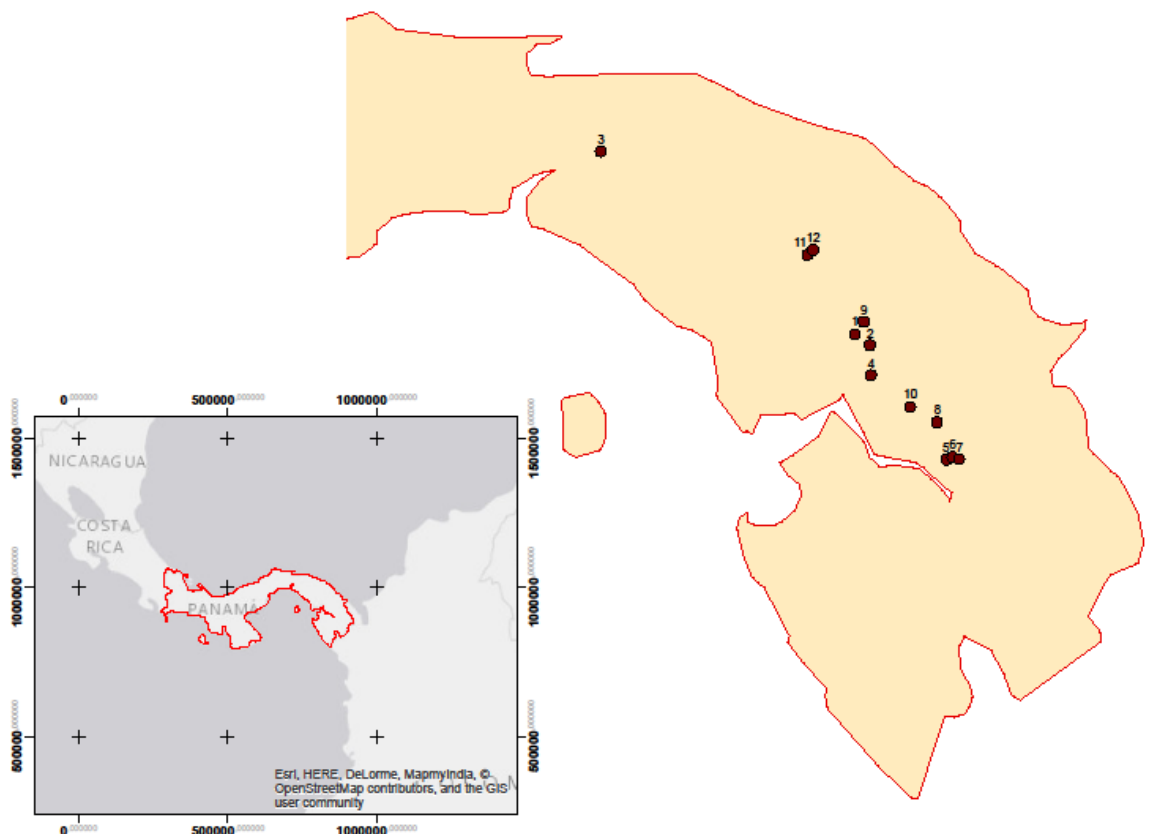


Figure 1. Map of Apical Reforestadora's teak plantations in Panama where the data was collected.

The equation forms tested in the study were found from other studies and literature (Maltamo & Laukkanen 2001, Perez & Kanninen 2003 and van Zyl 2005). Some models were found in more than one source but the primary source is marked with the model. The modelling was made with IBM SPSS Statistics program. SPSS is a commonly used program for statistical analysis (IBM, 2017).

## 2.1 Material and data preparations

Modelling data includes measurements from stem analysis of a total of 444 felled trees. Dbh was in the dataset ranges between 11.6 and 49.7 cm (average = 25.7; standard deviation = 9.0) and total height between 8.36 and 32.33 m (average 20.86; standard deviation = 6.69). Table 1 shows the number of trees by dbh and total height.

Table 1. The number of trees by dbh and total height

DBH (cm) Height (m)	10.1-15	15.1-20	20.1-25	25.1-30	30.1-35	35.1-40	40.1-45	45.1-50
6.1-8	0	0	0	0	0	0	0	0
8.1-10	7	6	0	0	0	0	0	0
10.1-12	24	27	1	0	0	0	0	0
12.1-14	7	16	0	0	0	0	0	0
14.1-16	10	43	1	0	0	0	0	0
16.1-18	2	25	1	1	0	0	0	0
18.1-20	0	0	0	2	0	0	0	0
20.1-22	0	0	12	23	1	1	0	0
22.1-24	0	0	7	24	11	2	0	0
24.1-26	0	0	4	29	31	4	1	1
26.1-28	0	0	1	14	31	15	3	1
28.1-30	0	0	0	0	10	17	13	1
30.1-32	0	0	0	1	3	7	2	0
32.1-34	0	0	0	0	0	0	1	0

For each felled tree diameter at the breast height (1.3 m above the stump height) and total height of the tree were measured. Predicting the merchantable volume required diameter measurements at relative heights from a tree at ten percent intervals (e.g. 10%-20%-30%-40%-50%-60%-70%-80%-90% and 100%). Figure 2 illustrate measurements taken from individual tree. In certain years the dataset includes also diameter measurements from the base (0%) and from five percent height. In case that 0% and 5% data points weren't measured, they were interpolated. Diameters were measured with bark and all the modeled equations predict volume with bark.

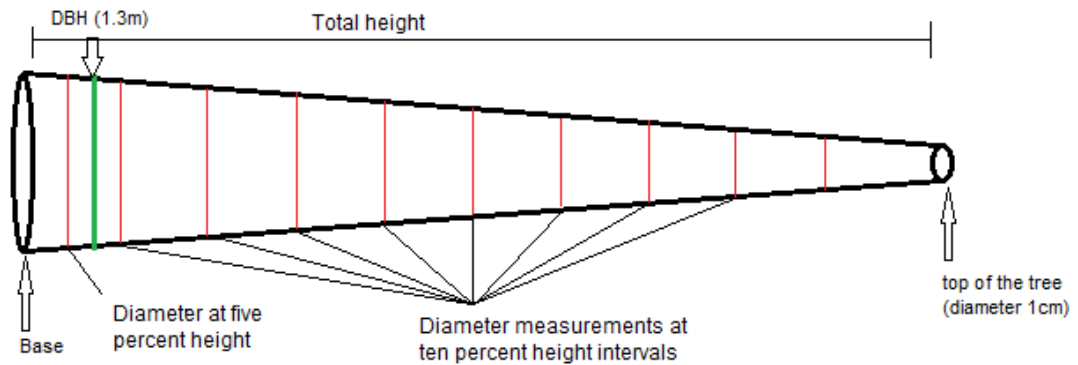


Figure 2. Example picture of tree measurements

The diameter up to which the total height was measured was 1 cm. Because the total height of all trees wasn't measured up to this diameter (in some cases only into 3-5 cm), total height was calculated for all trees by using the narrowing rate (taper cm/m) calculated from the trees that were measured near to the right top diameter. The average taper in the top of the trees in the dataset was 1.0 cm/m.

The total volume of each tree was calculated as the sum of all the separate volumes of the tree's cross sections. The cross section volume was calculated with the volume of frustum of circular cone using measured diameters and the length of the tree parts between them.

All the data was visually examined for possible outliers. Five trees were judged as outliers and they were excluded from the final modelling dataset because of likely recording errors in dbh and total height. Also one tree was excluded from modelling the merchantable volume because of possible recording error in one of the stem cross-sections.

Stratified random sampling was used to select 40 trees as the testing dataset for the modelled equations. Because the idea was that the individual dataset would represent well the entire data, 30 trees were selected from the trees which dbh was over 22 cm and 10 from those which dbh was equal or less than 22 cm. Selection was done in these groups by random sampling. Finally 399 trees were used to model the total volume and 398 to model the merchantable volume. Annex 2 presents the point plot graph of the data used in the study.

## 2.2 Equations and model fitting

Linear and nonlinear regressions were used to model the total volume equations with dbh and with dbh and total height. A total of 17 equations was tested, six for the total volume with dbh and eleven for the total volume with dbh and height. Equation 8 showed to be unsuitable and it was excluded from the study.

Equations for the prediction of the total volume from dbh were as follows.

- (1)  $V = a + b * dbh$  (Perez & Kanninen, 2003)
- (2)  $V = a + b * dbh^2$  (Perez & Kanninen, 2003)
- (3)  $\sqrt[2]{V} = a + b * dbh$  (Perez & Kanninen, 2003)
- (4)  $Log(V) = a + b * log(dbh)$  (Perez & Kanninen, 2003)
- (5)  $V = a + b * dbh + c * dbh^2$  (Perez & Kanninen, 2003)
- (6)  $V = a + b * dbh + c * dbh^2 + d * dbh^3$  (Perez & Kanninen, 2003)

Equations for the prediction of the total volume from dbh and total height were as follows.

- (7)  $V = a + b * (dbh^2 * H)$  (Perez & Kanninen, 2003)
- (9)  $Ln(V) = a + b * Ln(dbh) + c * Ln(H)$  (van Zyl, 2005)
- (10)  $Ln(V) = a + b * (dbh^2 * H)$  (Perez & Kanninen, 2003)
- (11)  $V = a + b * dbh^2 + c * H + d * (dbh^2 * H)$  (Perez & Kanninen, 2003)
- (12)  $V = a + b * dbh + c * 2H + d * (dbh^2 * H)$  (Perez & Kanninen, 2003)
- (13)  $Ln(V) = a + b * Ln(dbh) + c * Ln(H) + d * Ln(H - 1,3) + e * abh$  (Maltamo & Laukkanen, 2001)
- (14)  $V = a * dbh^2 * H$  (van Zyl, 2005)
- (15)  $V = a + b * dbh^c * H^d$  (van Zyl, 2005)
- (16)  $V = a * dbh^2 + b * H^2 + c * (dbh^2 * H) + d * (dbh * H^2)$  (van Zyl, 2005)
- (17)  $V = a + b * dbh + c * dbh^2 + d * (dbh^2 * H)$  (van Zyl, 2005)



where	$V$	total volume	[m <sup>3</sup> ]
	$dbh$	diameter at breast height	[cm]
	$H$	total height	[m]
	$a, b, c, d$	parameters to be estimated	
	and $e$		

For the merchantable volume only the variable-top diameter models were used in the study. The dataset included diameter measurements from eleven relative heights. Altogether four models were fitted to the data but two models showed to be unsuitable and were excluded from the study. The equations were modelled using a non-linear regression procedure. The calculated total volume of the trees was used as the variable-total volume and the cross section's cumulative volume was used as the merchantable volume in modelling.

Equations for the prediction of merchantable volume with variable-top diameter were as follows.

$$(A) \quad V(\text{merch}) = V * (1 - a * d_m^b * dbh^c) \quad (\text{Perez \& Kanninen, 2003})$$

$$(B) \quad V(\text{merch}) = a * dbh^b * \left( H + (H - 1,3) * \frac{d_m}{dbh} \right) * \left( H - (H - 1,3) * \frac{d_m}{dbh} \right) \quad (\text{van Zyl, 2005})$$

where	$V(\text{merch})$	merchantable volume to upper top diameter	[m <sup>3</sup> ]
	$V$	total volume	[m <sup>3</sup> ]
	$dbh$	diameter at breast height	[cm]
	$d_m$	minimum upper stem diameter	[cm]
	$H$	total height	[m]
	$a,b,c,$	parameters to be estimated	

The models were assessed based on the adjusted coefficient of determination (adj-r<sup>2</sup>), bias and the root mean square error (RMSE). The residual graph and the graph of the measured versus predicted values of each model were also taken into account for comparing the models. Models were ranked by adj-r<sup>2</sup>, bias and RMSE so that the best model got the ranking value 1 and the second got 2 and so on for each variable. The ranking sum determined the final ranking order of the models. The regression model fitting results are presented in Annex 4.

After the ranking the best models were tested using the independent dataset of 40 trees. The independent testing data was also divided into two stratum by dbh: trees with dbh lower than 20 cm and trees with dbh equal or greater than 20 cm. In testing the merchantable volume the data was divided to stratum by upper stem diameter.

Equations from other studies were included in the testing with the independent dataset. These equations were found to be the best ones in other studies. Previously Apical has used model 4 from Perez & Kanninen (2003) to estimate the total volume of teak.

Previously published models that were compared against the best models in the study were as follows.

$\sqrt[2]{V} = -0.0884 + 0.0297 * dbh$	Perez & Kanninen (2003) model 4
$V = 0.00007319 * dbh^{1.5588} * H^{1.2103}$	Perez & Kanninen (2003) model 10
$Ln(V) = -9.918 + 1.888 * Ln(dbh) + 1.009 * Ln(H)$	van Zyl (2005) model 45
$V(merch) = V * (1 - 0.7839 * d^{2.4149} * dbh^{-2.4175})$	Perez & Kanninen (2003) model 13
$V(merch) = V * (1 - 0.443 * d^{3.0653} * dbh^{-2.8676})$	van Zyl (2005) model 48

In the testing, the models were ranked based on RMSE and bias. These characteristics were also calculated for both stratum as well as bias percent from the average calculated volume.

### 3 RESULTS

The steps of modeling have been described above. In the next chapters equations and their function is described more closely. The statistics of modeling and ranking results as well as the values of the coefficients are also presented.

### 3.1 Total volume models based on dbh

A total of 6 models was fitted to the Apical's dataset to model total volume from dbh. Table 2 shows the modeled values of coefficients and their statistics. All the models showed a very high coefficient of determination ( $\text{adj-}r^2 > 0.95$ ) and low root mean square error and bias. Tables 3-5 show the statistics and ranking of each model predicting total volume from dbh. The graph of residual and measured versus predicted values showed some degree of correlation or violation of the condition of equality in the variances in Equation 1 and 4.

Table 2. The values of coefficients and their statistics for the models tested to estimate total volume from dbh

	a	b	c	d
<b>1</b>	<b>-0.7527</b>	<b>0.05262</b>		
Sig(p)	0.000	0.000		
standard error	0.01555	0.000579		
<b>2</b>	<b>-0.1326</b>	<b>0.000995</b>		
Sig(p)	0.000	0.000		
standard error	0.007520	0.000009		
<b>3</b>	<b>-0.2416</b>	<b>0.03677</b>		
Sig(p)	0.000	0.000		
standard error	0.00838	0.000312		
<b>4</b>	<b>-4.4523</b>	<b>2.9177</b>		
Sig(p)	0.000	0.000		
standard error	0.04377	0.03155		
<b>5</b>	<b>-0.2104</b>	<b>0.006464</b>	<b>0.000875</b>	
Sig(p)	0.000	0.04243	0.000	
standard error	0.03897	0.003175	0.00006	
<b>6</b>	<b>0.1894</b>	<b>-0.04258</b>	<b>0.00272</b>	<b>-0.0000217</b>
Sig(p)	0.1718	0.01066	0.000013	0.002782
standard error	0.1383	0.01659	0.000616	0.000007

Table 3. The statistics of fitted models for the total volume from dbh and graphs interpretation

	Model V(dbh)	Adj. R <sup>2</sup>	RMSE for V	Bias for V	F-value	sig. (p)	Ranking	Ranking sum	Residual	Obs/Pred	For Testing
1	$V=a+b*dbh$	0.954	0.1002	-0.00000001253	8252.578	0.000	5	12	POOR	POOR	
2	$V=a+b*dbh^2$	0.970	0.08106	0.00000001504	12831.152	0.000	2	8	SATISFACTORY	GOOD	YES
3	$v_v= a+b*dbh$	0.972	0.08730	-0.002903	13881.845	0.000	4	10	SATISFACTORY	GOOD	YES
4	$lg(V)= a+b*lg(dbh)$	0.956	0.1207	0.006895	8551.405	0.000	6	17	POOR	POOR	
5	$V=a+b*dbh+c*dbh^2$	0.970	0.08074	0.00000003258	6468.466	0.000	3	9	SATISFACTORY	SATISFACTORY	YES
6	$V= a+b*dbh+c*dbh^2+d*dbh^3$	0.971	0.07993	0.00000002005	4403.085	0.000	1	6	SATISFACTORY	GOOD	YES

Table 4. The ranking for models estimating the total volume from dbh

	Model ranking V(dbh)	Adj. R <sup>2</sup>	RMSE for V	Bias for V	Sum of the ranks	Total ranking
1	$V=a+b*dbh$	6	5	1	12	5
2	$V=a+b*dbh^2$	3	3	2	8	2
3	Neliöjuuri $V= a+b*dbh$	1	4	5	10	4
4	$lg(V)= a+b*lg(dbh)$	5	6	6	17	6
5	$V=a+b*dbh+c*dbh^2$	3	2	4	9	3
6	$V= a+b*dbh+c*dbh^2+d*dbh^3$	2	1	3	6	1

Table 5. Testing results for equations estimating the total volume from dbh

V(dbh)	RMSE, DBH<20cm	RMSE, DBH ≥ 20cm	RMSE	BIAS, DBH<20cm	BIAS, DBH ≥ 20cm	BIAS	BIAS %, DBH<20cm	BIAS %, DBH ≥ 20cm	RMSE ranking	Bias ranking	Ranking Sum	Rank
Model 2	0.02882	0.1253	0.1112	0.0001484	0.01330	0.01034	0.13%	1.50%	3	3	6	2
Model 3	0.02585	0.1590	0.1405	0.0001376	0.01240	0.009641	0.12%	1.40%	4	2	6	2
Model 5	0.03119	0.1175	0.1045	-0.005682	0.01558	0.01079	-4.84%	1.76%	2	4	6	2
Model 6	0.02626	0.1060	0.09415	-0.004351	0.01099	0.007535	-3.70%	1.24%	1	1	2	1
Perez model 4	0.03922	0.1648	0.1463	0.02919	-0.1298	-0.09405	24.85%	-14.63%	5	5	10	3

From the models tested with the independent dataset models 2 and 5 gave negative volume for trees with small dbh. This is result of not having enough small diameter trees in the dataset. Also the mathematical expression of the models allow negative outcome.

Testing with independent dataset of 40 trees showed that in generally models tested in the study gave slightly larger volumes than model from other study. Overall, the equations tested in the study proved to be better fit to estimate total volume from dbh in this kind of data than the equations in other studies.

Equation 6 gave the best result from both phases: modeling and testing. It predicts the volume of small dbh trees slightly under and the volume of big dbh trees slightly over. RMSE for Equation 6 is 0.09415 when tested with the independent dataset. The residual graph in Figure 3 doesn't show any sign of trend and in the Figure 4 the measured versus predicted graph is looking good. Equation 6 starts to give illogical volumes for trees whose dbh is smaller than 12 cm.

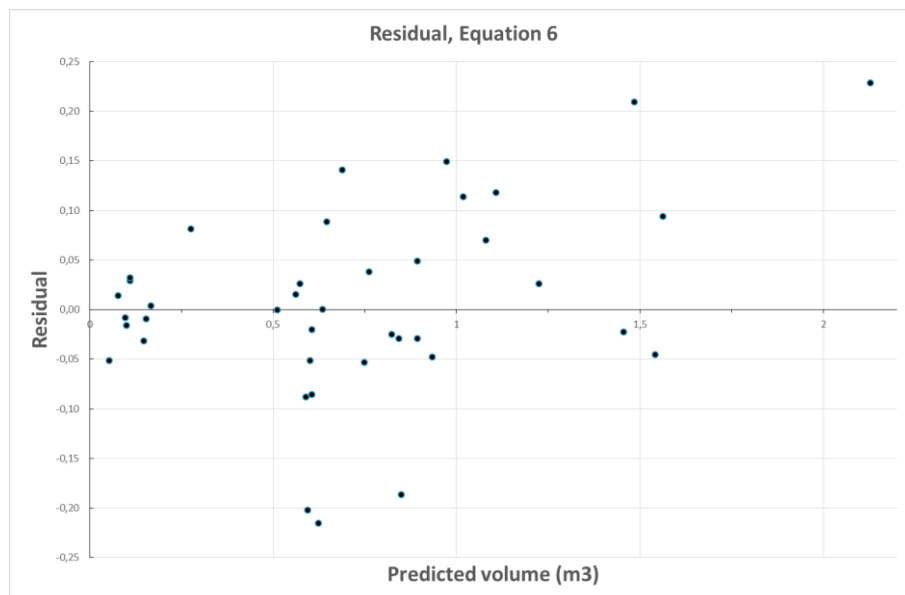


Figure 3. Residual graph of Equation 6 from the independent dataset of 40 trees

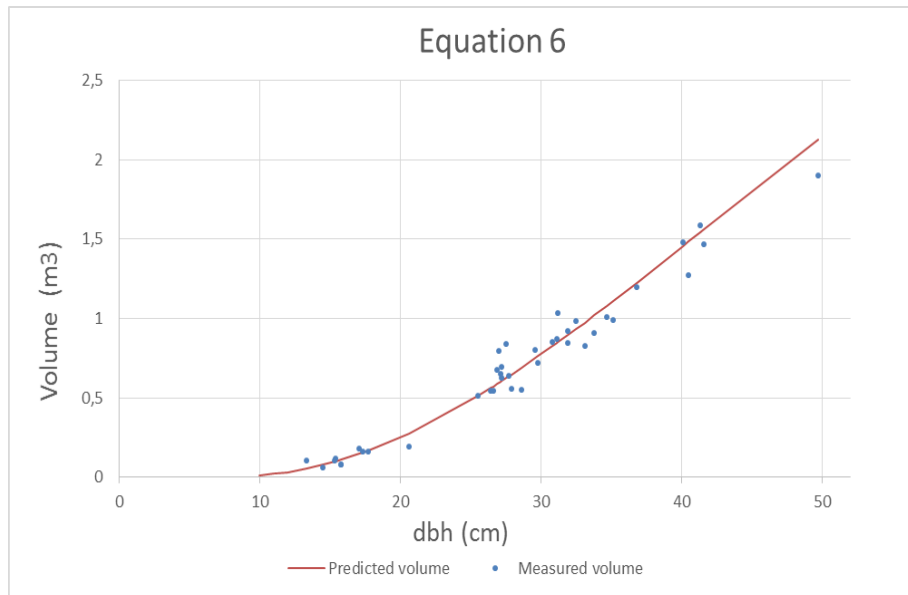


Figure 4. Equation 6 predicted volume and measured volumes of the independent dataset of 40 trees.

### 3.2 Total volume models based on dbh and height

A total of 11 models was fitted to the Apical's dataset to estimate total volume from dbh and height but the Equation 8 showed to be unsuitable and it was removed from the study. Table 9 shows the modeled values of coefficients and their statistics. Coefficient c hasn't been calculated for model 13 since it correlated with coefficient d in the regression.

All the models but one (Model 10) showed a very high coefficient of determination ( $\text{adj-}r^2 > 0.95$ ) and low root mean square error and bias. Tables 6-8 show the statistics and ranking of each model predicting total volume from dbh and height. However, the graph of residual and measured versus predicted values showed some degree of correlation or violation of the condition of equality in the variances in Equations 7,9 and 14 and strong violation of the condition of equality in the variances in Equation 10.

From the models tested with the independent dataset models 11, 12, 15 and 17 gave negative volume for trees with small dbh. This occurs because the dataset doesn't have enough small diameter trees and the mathematical expression of the models allow negative outcome. Nonlinear regression was used to model Equation 15 and that's why F- or sig (p)-values aren't calculated for the model.

Table 6. The statistics of fitted models for the total volume from dbh and total height and graphs interpretation

	Model V(dbh, H)	Adj. R <sup>2</sup>	RMSE for V	Bias for V	F-value	sig. (p)	Ranking	Ranking sum	Residual	Obs/Pred	For Testing
7	$V = a + b * (dbh^2 * H)$	0.976	0.07206	0.000000005013	16343.602	0.000	4	14	SATISFACTORY	GOOD	
9	$\ln(V) = a + b * \ln(dbh) + c * \ln(H)$	0.989	0.07437	-0.0002640	18442.043	0.000	8	17	SATISFACTORY	GOOD	
10	$\ln(V) = a + b * (dbh^2 * H)$	0.825	0.5681	0.06249	1878.588	0.000	10	28	POOR	POOR	
11	$V = a + b * dbh^2 + c * H + d * (dbh^2 * H)$	0,980	0.06640	0.00000001504	6439.635	0.000	1	8	GOOD	GOOD	YES
12	$V = a + b * dbh + c * 2H + d * (dbh^2 * H)$	0.980	0.06685	0.00000001003	6352.159	0.000	1	8	GOOD	GOOD	YES
13	$\ln(V) = a + b * \ln(dbh) + c * \ln(H) + d * \ln(H-1,3) + e * dbh$	0.990	0.07322	-0.001003	12538.853	0.000	5	15	GOOD	GOOD	YES
14	$V = a * dbh^2 * H$	0.992	0.07361	-0.009821	40804.339	0.000	9	18	SATISFACTORY	GOOD	
15	$V = a + b * dbh^c * H^d$	0.980	0.02098	0.00000001504			1	8	GOOD	GOOD	YES
16	$V = a * dbh^2 + b * H^2 + c * (dbh^2 * H) + d * (dbh * H^2)$	0.991	0.06939	0.004563	11493.448	0.000	5	15	GOOD	GOOD	YES
17	$V = a + b * dbh + c * dbh^2 + d * (dbh^2 * H)$	0.979	0.06751	-0.00000002005	6225.697	0.000	5	15	GOOD	GOOD	YES

Table 7. The ranking for the models estimating the total volume from dbh and total height

	Model ranking V(dbh;H)	Adj.R <sup>2</sup>	RMSE for V	Bias for V	Sum of the ranks	Total ranking
7	$V = a + b * (dbh^2 * H)$	7	6	1	14	4
9	$\ln(V) = a + b * \ln(dbh) + c * \ln(H)$	2	9	6	17	8
10	$\ln(V) = a + b * (dbh^2 * H)$	8	10	10	28	10
11	$V = a + b * dbh^2 + c * H + d * (dbh^2 * H)$	3	2	3	8	1
12	$V = a + b * dbh + c * 2H + d * (dbh^2 * H)$	3	3	2	8	1
13	$\ln(V) = a + b * \ln(dbh) + c * \ln(H) + d * \ln(H-1,3) + e * dbh$	1	7	7	15	5
14	$V = a * dbh^2 * H$	1	8	9	18	9
15	$V = a + b * dbh^c * H^d$	3	1	4	8	1
16	$V = a * dbh^2 + b * H^2 + c * (dbh^2 * H) + d * (dbh * H^2)$	2	5	8	15	5
17	$V = a + b * dbh + c * dbh^2 + d * (dbh^2 * H)$	6	4	5	15	5

Table 8. Testing results for equations estimating the total volume from dbh and total height

V(dbh;H)	RMSE, DBH<20cm	RMSE, DBH ≥ 20cm	RMSE	BIAS, DBH<20cm	BIAS, DBH ≥ 20cm	BIAS	BIAS %, DBH<20cm	BIAS %, DBH ≥ 20cm	RMSE ranking	Bias ranking	Ranking Sum	Rank
Model 11	0.01964	0.07716	0.06856	0.002626	0.008742	0.007366	2.24%	0.99%	3	6	9	5
Model 12	0.02000	0.07534	0.06700	0.001224	0.007410	0.006018	1.04%	0.84%	1	3	4	1
Model 13	0.01358	0.08435	0.07454	0.004055	0.0004459	0.001258	3.45%	0.05%	6	1	7	4
Model 15	0.01784	0.07580	0.06726	0.0009182	0.007635	0.006123	0.78%	0.86%	2	4	6	2
Model 16	0.02755	0.07987	0.07151	0.02385	0.001549	0.006567	20.30%	0.17%	5	5	10	6
Model 17	0.02156	0.07759	0.06906	0.0003683	0.006176	0.004869	0.31%	0.70%	4	2	6	2
Perez model 10	0.02103	0.1001	0.08867	0.01649	-0.05704	-0.04050	14.03%	-6.43%	7	8	15	7
van Zyl model 45	0.02013	0.1002	0.08871	0.01421	0.03417	0.02968	12.10%	3.85%	8	7	15	7



Table 9. The values of coefficients and their statistics for the models tested to estimate total volume from dbh and h

	a	b	c	d	e
<b>7</b>	<b>0.02431</b>	<b>0.0000319</b>			
Sig(p)	0.000023	0.000			
standard error	0.005676	0.000			
<b>9</b>	<b>-10.3306</b>	<b>1.6444</b>	<b>1.3869</b>		
Sig(p)	0.000	0.000	0.000		
standard error	0.04942	0.03909	0.03910		
<b>10</b>	<b>-2.1603</b>	<b>0.00006661</b>			
Sig(p)	0.000	0.000			
standard error	0.03495	0.000002			
<b>11</b>	<b>-0.1417</b>	<b>0.000329</b>	<b>0.008255</b>	<b>0.0000181</b>	
Sig(p)	0.000	0.000	0.000	0.000	
standard error	0.0202	0.000061	0.001139	0.000002	
<b>12</b>	<b>-0.1870</b>	<b>0.01008</b>	<b>0.002161</b>	<b>0.00002426</b>	
Sig(p)	0.000	0.000002	0.001051	0.000	
standard error	0.0280	0.00209	0.000655	0.000001	
<b>13</b>	<b>-10.0496</b>	<b>1.7249</b>		<b>1.2569</b>	<b>-0.002226</b>
Sig(p)	0.000	0.000		0.000	0.6372
standard error	0.2499	0.1320		0.03732	0.004716
<b>14</b>	<b>0.00003273</b>				
Sig(p)	0.000				
standard error	0.000				
<b>15</b>	<b>-0.06362</b>	<b>0.000223</b>	<b>1.7246</b>	<b>0.7338</b>	
Sig(p)	-	-	-	-	
standard error	0.01415	0.000055	0.04220	0.06330	
<b>16</b>	<b>0.00008007</b>	<b>0.000134</b>	<b>0.00002763</b>	<b>-0.000001193</b>	
Sig(p)	0.3906	0.3427	0.000066	0.8903	
standard error	0.000093	0.000141	0.000007	0.000009	
<b>17</b>	<b>-0.2081</b>	<b>0.01710</b>	<b>-0.000161</b>	<b>0.00002701</b>	
Sig(p)	0.000	0.000	0.08507	0.000	
standard error	0.03259	0.002776	0.000093	0.000002	

Testing with independent dataset of 40 trees showed that in generally the models tested in this study over-estimated the total volume. Overall, the equations tested in the study proved to be better fit to estimate total volume in this kind of data than the equations in other studies.

Equation 12 gave the best result from both phases of the study: modeling and ranking. Residual graph showed no sign of trend and the measured versus predicted volume graph was looking good. Equation 12 slightly over-estimated the total volume in general.

The average bias was 0.006018. Bias with trees whose dbh was under 20 cm was a little bit bigger than with trees whose dbh is equal or greater than 20 cm. The difference between Equation 12 and Equation 15 was really small. Figures 5 and 6 shows the residual and measured versus predicted graphs of Equation 12.

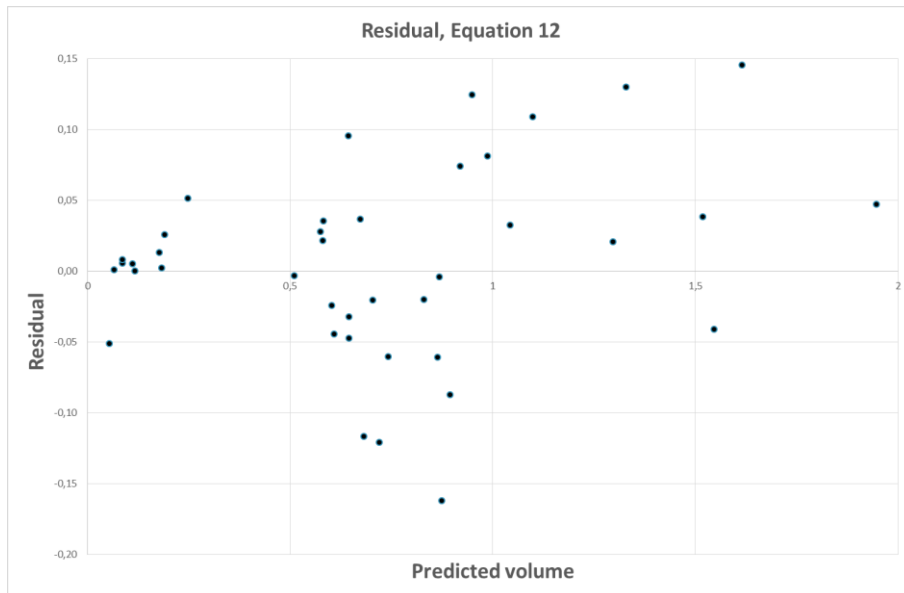


Figure 5. Residual graph of Equation 12 from the independent dataset of 40 trees

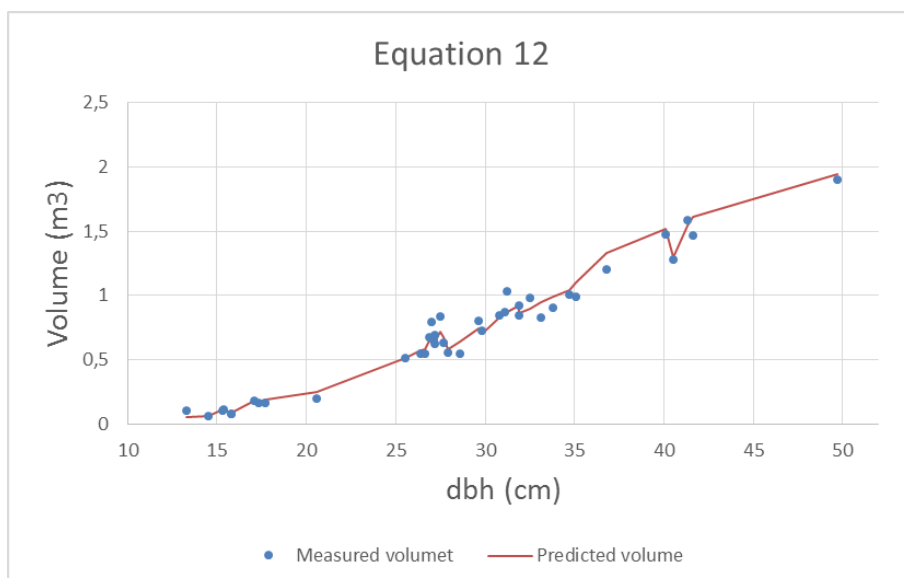


Figure 6. Equation 12 predicted volume and measured volumes of the independent dataset of 40 trees

### 3.3 Merchantable volume

The two models taken into the study showed both a very high coefficient of determination ( $\text{adj-}r^2 > 0.90$ ), and RMSE and bias of both models were low. Tables 11-13 show the statistics and ranking of both models predicting merchantable volume. Both models predicted the merchantable volume slightly under the calculated volume. Models A and B both had good residual features and the measured versus predicted volume graphs. Table 10 shows the estimated coefficients and their statistics.

Table 10. Coefficient values and their statistics for models tested to estimate merchantable volume

Parameters	a	b	c
Models			
<b>A</b>	<b>0.2755</b>	<b>3.0041</b>	-2.6785
std. Error	0.01416	0.01772	0.02131
<b>B</b>	<b>0.00002029</b>	<b>1.2356</b>	
std. Error	0.000001	0.01729	

Both equations were also tested with the independent dataset of 40 trees. The best models from Perez & Kanninen's (2003) and van Zyl's (2005) studies for the estimation of merchantable volume with variable-top diameter were also tested with the same dataset. Perez & Kanninen's and van Zyl's equations show to be better than Equation B in the testing.

Testing showed that in general all the equations under-estimated the merchantable volume. In testing Equation A proved to be better than Equation B. Perez & Kanninen's equation gave quite high bias percentage for those stems with upper stem diameter under 20 cm and van Zyl's equation gave bias between 1% and 2% for both stratums.

Table 11. The statistics of fitted models for the total volume from dbh and total height and graphs interpretation

	Model V(merch)	N	Adj. R <sup>2</sup>	RMSE for V	Bias for V	Ranking	Ranking sum	Residual	Obs/Pred
A	$V_m = V * (1 - (a * d^b * dbh^c))$	4378	0.982	0.05020	0.001149	1	3	SATISFACTORY	GOOD
B	$V_m = a * dbh^b * (H + (H - 1,3) * d / dbh) * (H - (H - 1,3) * d / dbh)$	4378	0.924	0.1019	0.02086	2	6	GOOD	SATISFACTORY

Table 12. The ranking for the models estimating merchantable volume

	Model ranking V(merch)	Adj. R <sup>2</sup>	RMSE for V	Bias for V	Sum	Rangin number
A	$V_m = V * (1 - (a * d^b * dbh^c))$	1	1	1	3	1
B	$V_m = a * dbh^b * (H + (H - 1,3) * d / dbh) * (H - (H - 1,3) * d / dbh)$	2	2	2	6	2

Table 13. Testing results for equations estimating the merchantable volume

V(dbh)	RMSE, diameter<20cm	RMSE, diameter≥20cm	RMSE	BIAS, diameter<20cm	BIAS, diameter≥20cm	BIAS	BIAS %, diameter<20cm	BIAS %, diameter≥20cm	RMSE ranking	Bias ranking	Ranking Sum	Rank
Model A	0.01291	0.05852	0.05188	0.001965	-0.001929	-0.001053	2.29%	-0.32	1	1	2	1
Model B	0.01891	0.1325	0.1170	-0.005482	-0.03245	-0.02638	-6.39%	-5.36	4	4	8	4
Perez model 13	0.01343	0.07692	0.06801	-0.005382	-0.005807	-0.005711	-6.27%	-0.96	3	3	6	3
Van Zyl model 48	0.01603	0.05864	0.05218	-0.001605	-0.006557	-0.005442	-1.84%	-1.08	2	2	4	2

Equation A proved to be the best on of the tested models. Equation A's RMSE was 0.05188 and overall bias -0.001053. Bias percentage for stems with upper stem diameter under 20 cm was 2.29% and for stems with upper stem diameter equal or greater than 20 cm -0.32%, when tested with the independent dataset. Figures 7 and 8 shows the residual and measured versus predicted graphs of Equation A. In the graphs there are 440 points since for every tree there are eleven measured points

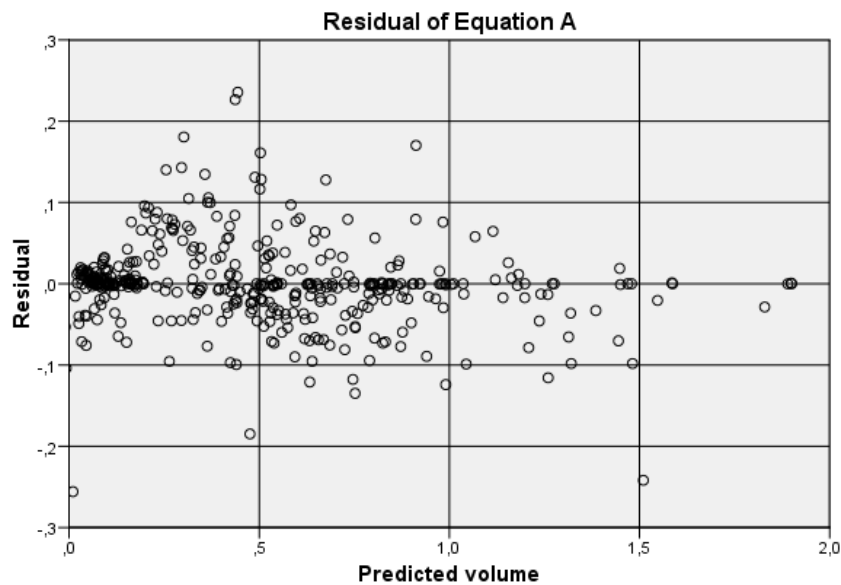


Figure 8. Residual graph of Equation A with the dataset of 40 trees.

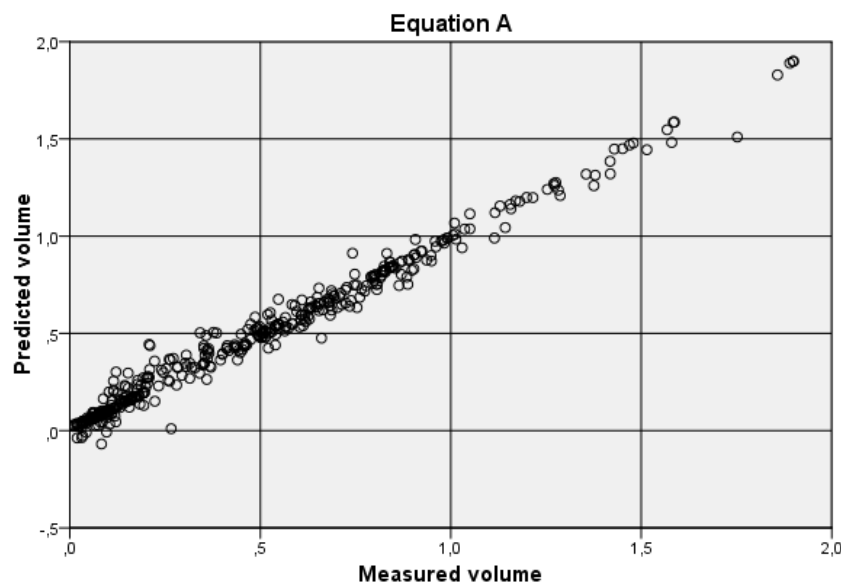


Figure 7. Equation A predicted volume versus measured volumes of the dataset of 40 trees

All other models under estimated the merchantable volume of stems with upper stem diameter lower than 20 cm. When the minimum upper stem diameter was below the midpoint of the tree's height Equation A over-estimated the merchantable volume and when the minimum upper stem diameter was above the midpoint Equation A under- estimated the merchantable volume.

#### 4 CONCLUSIONS

Calculating volume with equation with dbh as only variable is easier and quicker but using equations with dbh and height as input variables the result is more accurate. Based on the study it is recommended to use Equation 6 for the estimation of total volume from dbh and Equation 12 for estimating total volume from dbh and total height. Both Equation 6 and 12 were better than equations selected in other studies.

Equation (6):  $V = 0.1894 + (-0.04258) \cdot dbh + 0.00272 \cdot dbh^2 + (-0.0000217) \cdot dbh^3$   
(adj-r<sup>2</sup> = 0.971)

Equation (12):  $V = -0.1870 + 0.01008 \cdot dbh + 0.002161 \cdot 2H + 0.00002426 \cdot dbh^2 \cdot H$   
(adj-r<sup>2</sup> = 0.980)

Based on this study it is recommended to use Equation A for predicting merchantable volume. It showed to be better than equations from other studies to calculate merchantable volume from minimum upper stem diameter.

Equation (A) =  $V_{merch} = V \cdot (1 - 0.2755 \cdot d_m^{3.0041} \cdot dbh^{-2.6785})$  (adj-r<sup>2</sup> = 0.982)

The equations tested in the study fitted to the collected data well. As the modelling dataset represent several locations and age classes of seedling based teak plantations, the models can be applied safely in Darien and Eastern Panama Provinces. The models should be calibrated for clonal plantations separately since clonal trees are likely to have different stem form and taper characteristics than seedling plantations.

The volume equations chosen in this study should use to trees with dbh greater than 12 cm, and they are more accurate on trees with dbh equal or greater than 20 cm. Because the dataset used to model and test the models in the study did not have smaller dbh than 11.6, all models had problems in calculating volume for small diameter trees. For estimating small dbh trees the models should be calibrated with a larger dataset that includes more trees whose dbh is in 5-15 cm range. Then the dataset would be more balanced in terms of dbh.

## References

Maltamo, M., Laukkanen, S. 2001. Metsää kuvaavat mallit. Joensuu: Joensuun yliopisto.

Perez, D., Kanninen, M. 2003. Provisional equations for estimating total and merchantable volume of *Tectona grandis* trees in Costa Rica. In publication *Forests, Trees and Livelihoods* volume 13, issue 4, pp.345-359.

van Zyl, L. 2005. Stem form, height and volume models for teak in Tanzania. Master of Science thesis in Forest Sciences. University of Stellenboch, South Africa.

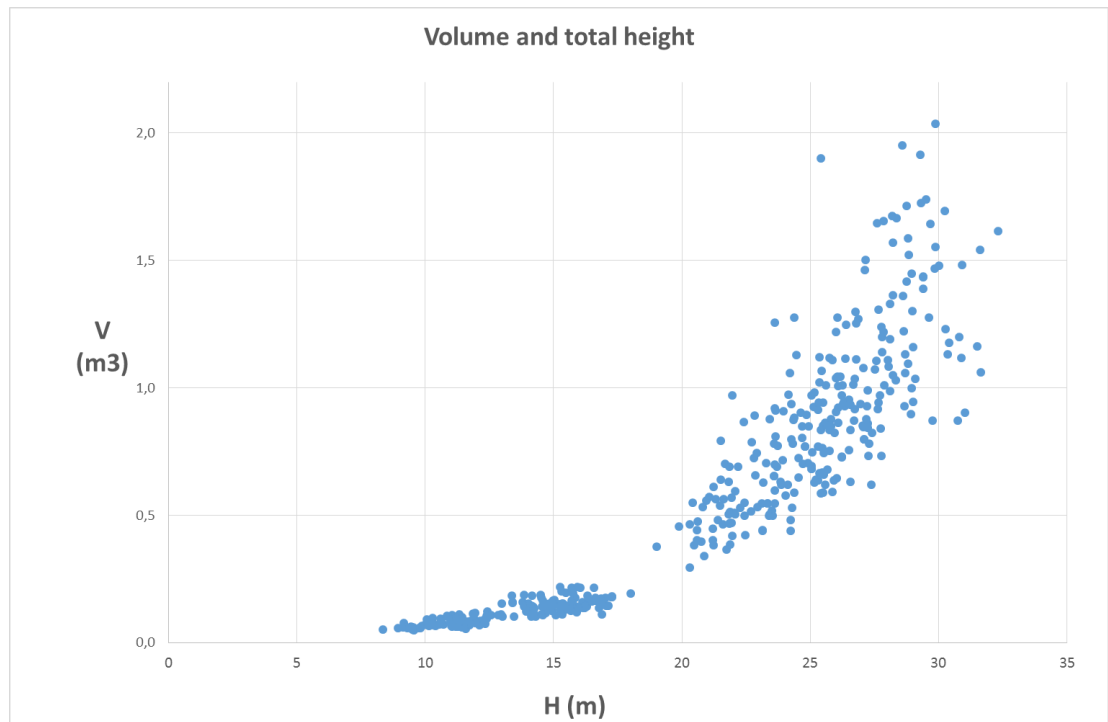
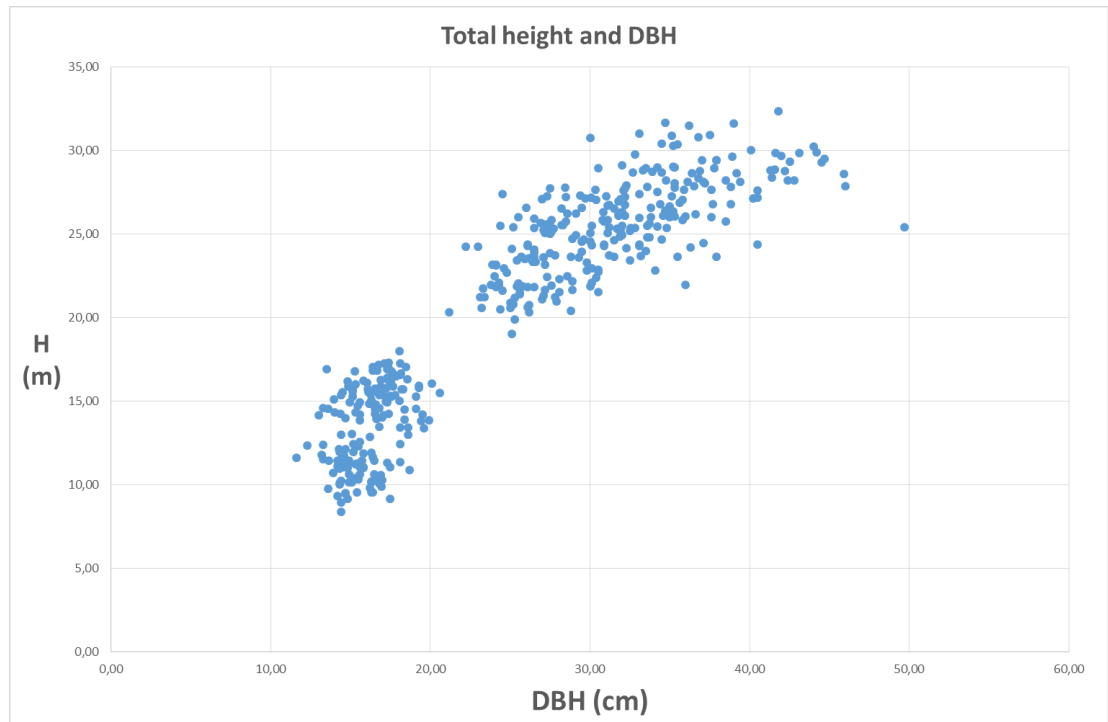
What is IBM SPSS. 2016. IBM. WWW-document. Updated 17.3.2016. Available in <https://www.ibm.com/analytics/us/en/technology/spss/> (referred 5.7.2017)

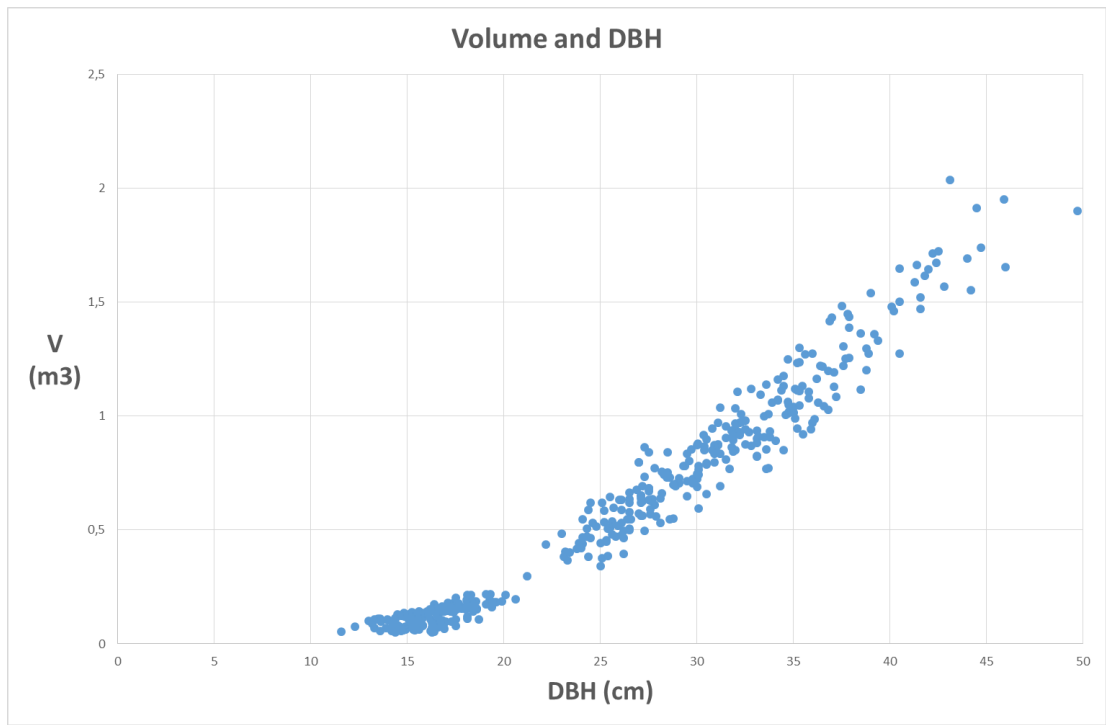


## Description of the dataset

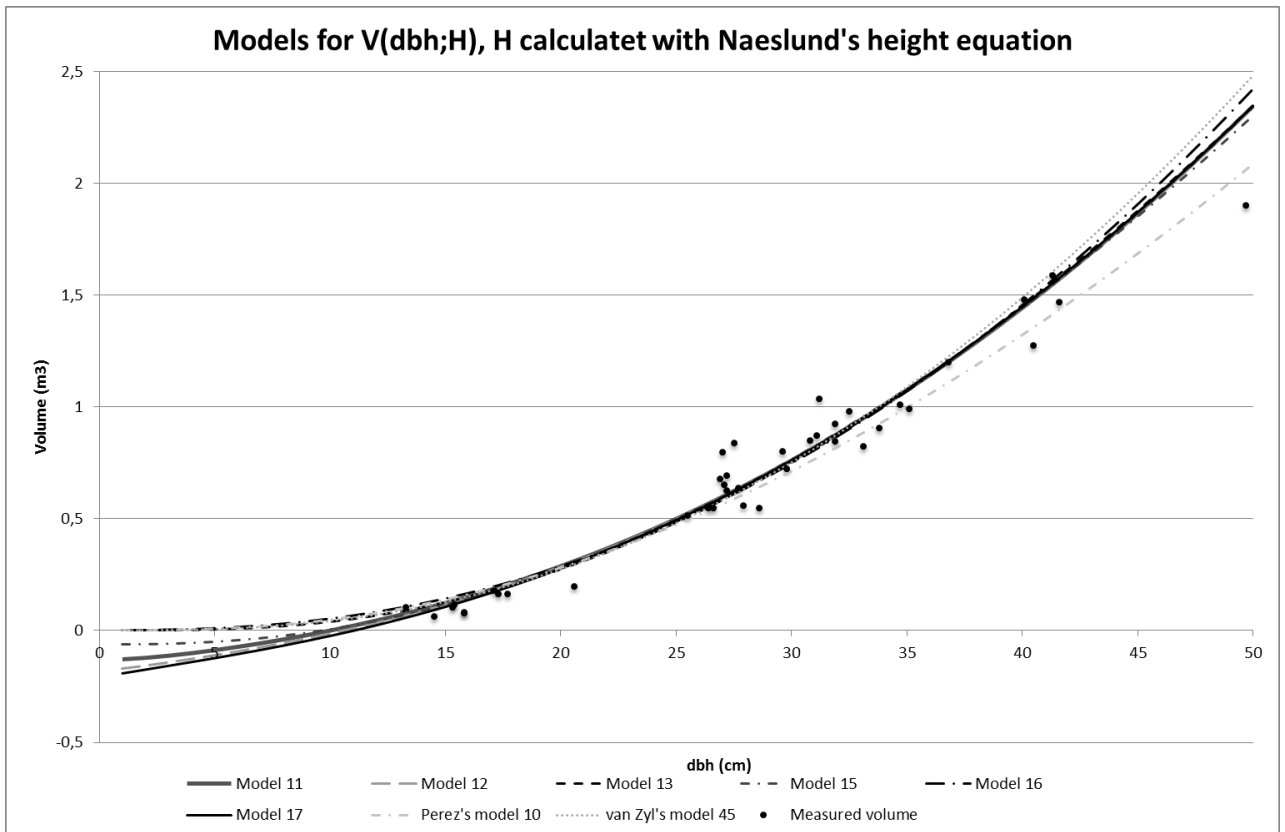
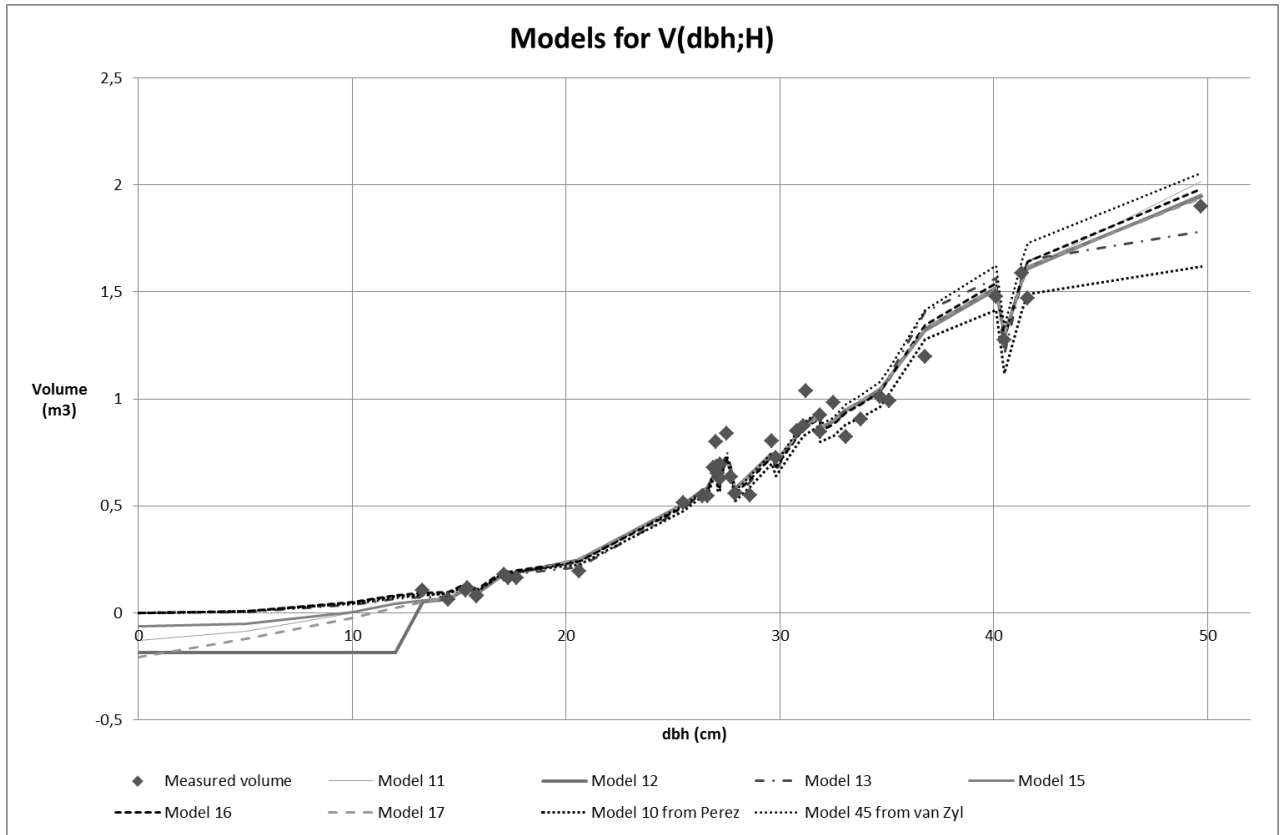
Site code	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Plantation	Alto del Cristo-Delgado	El Oso	Lagos	Meteti Arriba-Villarreal	Nuevo Progreso-Batista	Nuevo Progreso-Dominguez	Nuevo Progreso-Moreno	Quebrada Felix-Viamonte	Relojera-Delgado	Sansoncito-Morales	Toledo 1-2	Toledo 3	
DBH (cm)													
0-5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
5.1-10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
10.1-15	4	0	0	5	0	0	2	4	26	9	0	0	
15.1-20	7	12	0	8	5	0	5	11	24	45	0	0	
20.1-25	1	1	12	0	1	10	0	0	0	0	2	0	
25.1-30	0	0	58	0	0	9	0	0	0	0	27	0	
30.1-35	0	0	23	0	0	1	0	0	0	0	58	5	
35.1-40	0	0	7	0	0	0	0	0	0	0	25	14	
40.1-45	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	18	
45.1-50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	All
total N	12	13	100	13	6	20	7	15	50	54	114	40	444
Average dbh	15.65	18.95	28.53	15.58	18.42	25.02	16.13	16.25	15.26	16.4	32.48	39.66	25.67
Median	15.45	19.1	27.5	16.3	17.8	25.05	15.5	16.6	14.9	16.62	32.2	40.15	26.5
Min	12.3	17.3	22.2	11.6	16.2	21.2	14.2	13.2	13.3	13.02	22.9	31.9	11.6
Max	20.1	20.6	39.4	18.1	23.8	30.1	18.7	19.1	18.4	19.29	42.8	49.7	49.7

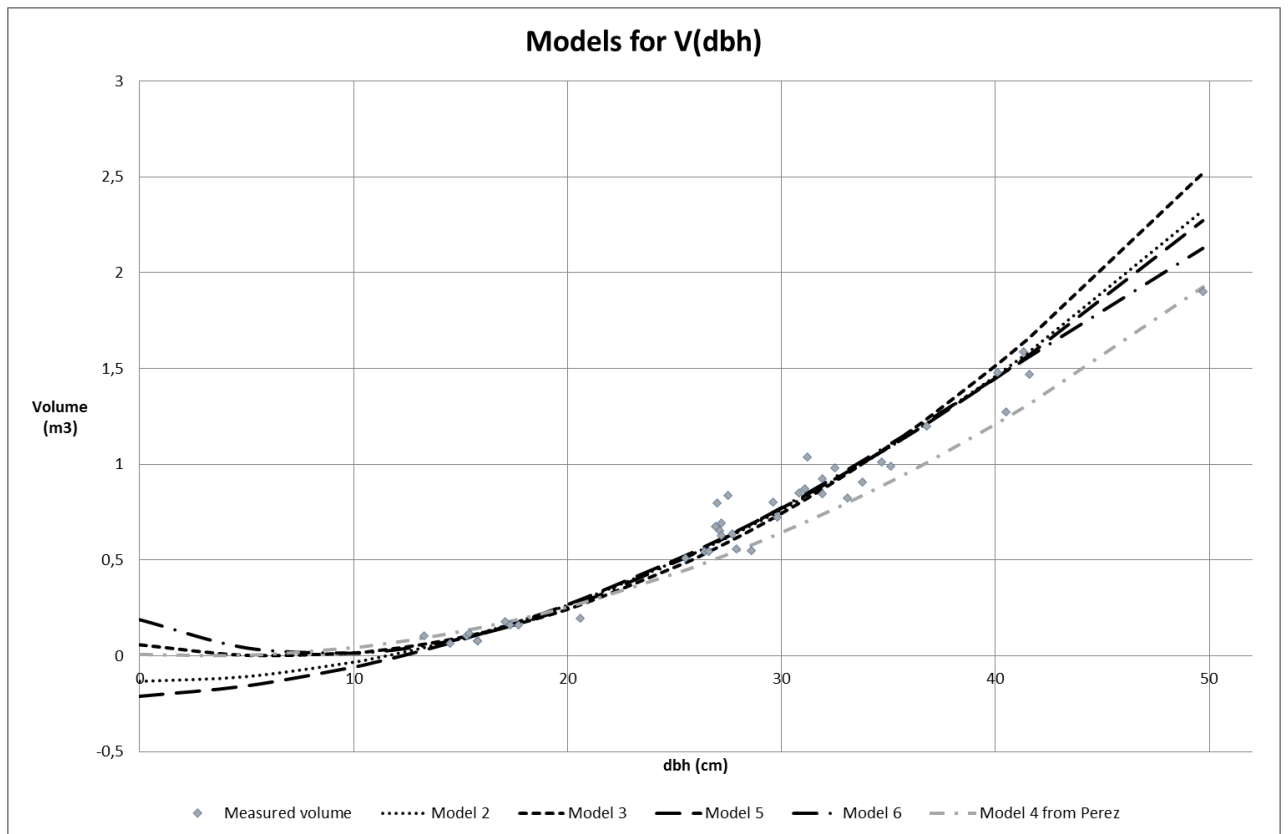
## Point plot graphs of the dataset





**Comparison of the best models tested with the independent dataset of 40 trees in the study for estimating total volume.**





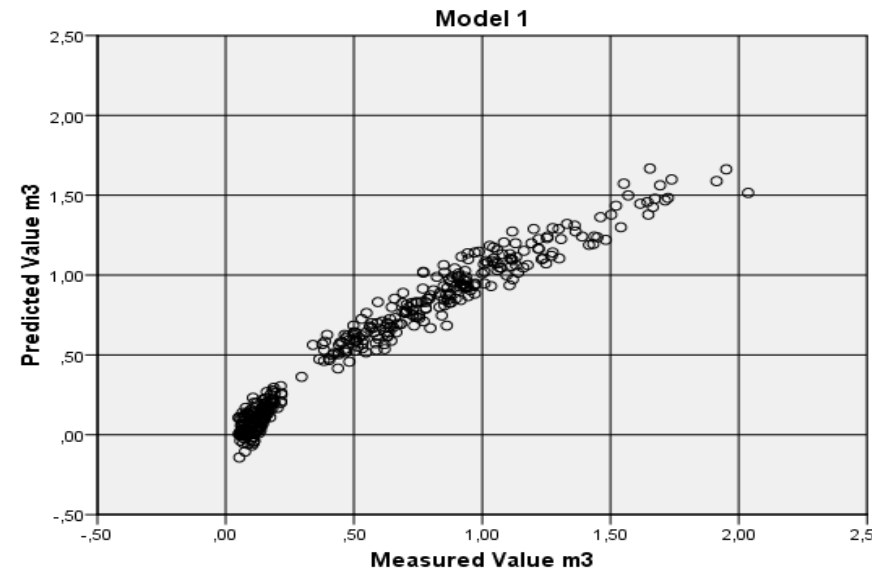
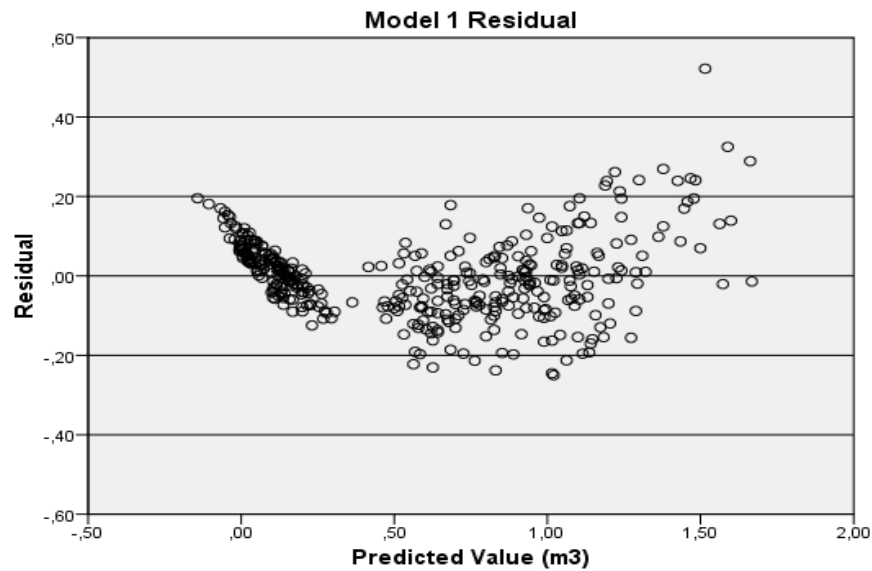
### Statistics and graphs of each model modeled in the study

Model 1

Equation	N	Adj.R <sup>2</sup>	RMSE for V	Bias for V	F-value	sig. (p)	Model Ranking
$V=a+b*dbh$	399	0.954	0.1002	-0.0000001253	8252.578	0.000	5

Regression Coefficients	a	b
Value	-0.7527	0.05262
Sig. (p)	0.000	0.000
Standard error	0.01555	0.000579

Residual plot:	POOR
Obs / Pred plot:	POOR

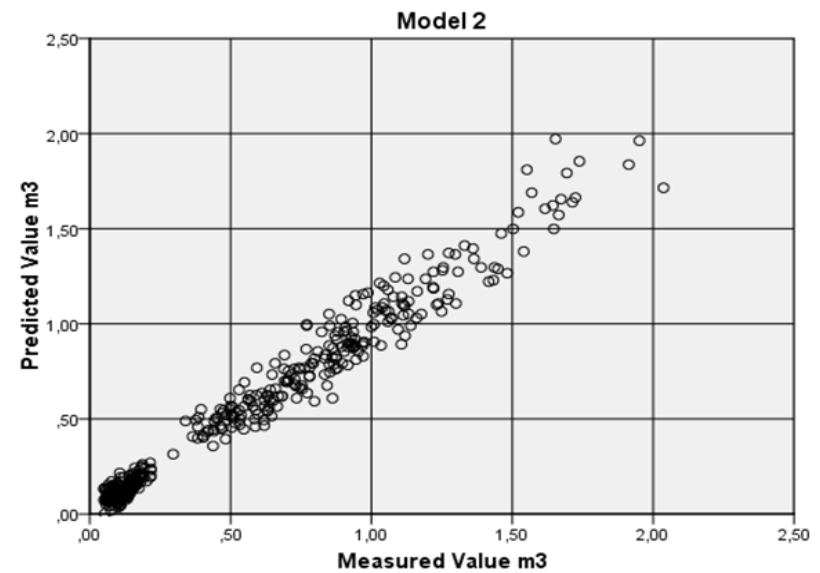
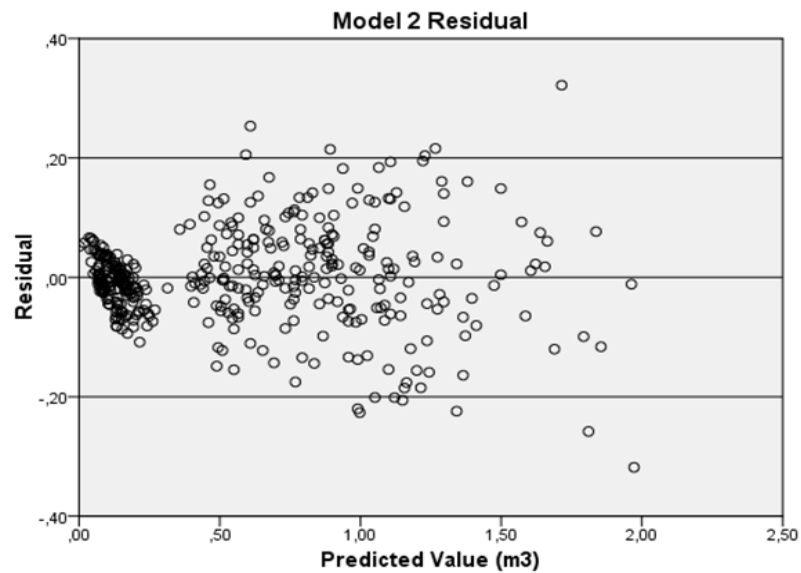


## Model 2

Equation	N	Adj.R <sup>2</sup>	RMSE for V	Bias for V	F-value	sig. (p)	Model Ranking
$V=a+b*dbh^2$	399	0.970	0.08106	0.00000001504	12831.152	0.000	2

Regression Coefficients	a	b
Value	-0.1326	0.000995
Sig. (p)	0.000	0.000
Standard error	0.007520	0.000009

Residual plot:	SATISFACTORY
Obs / Pred plot:	GOOD

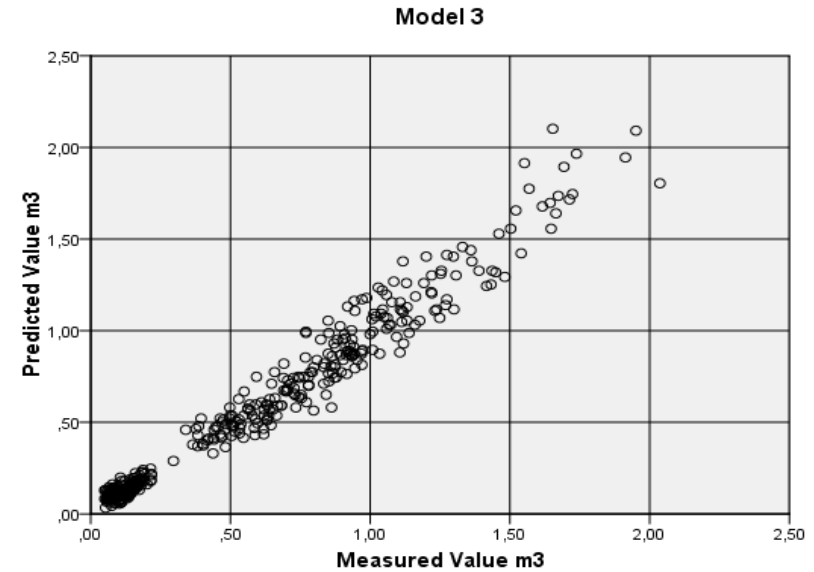
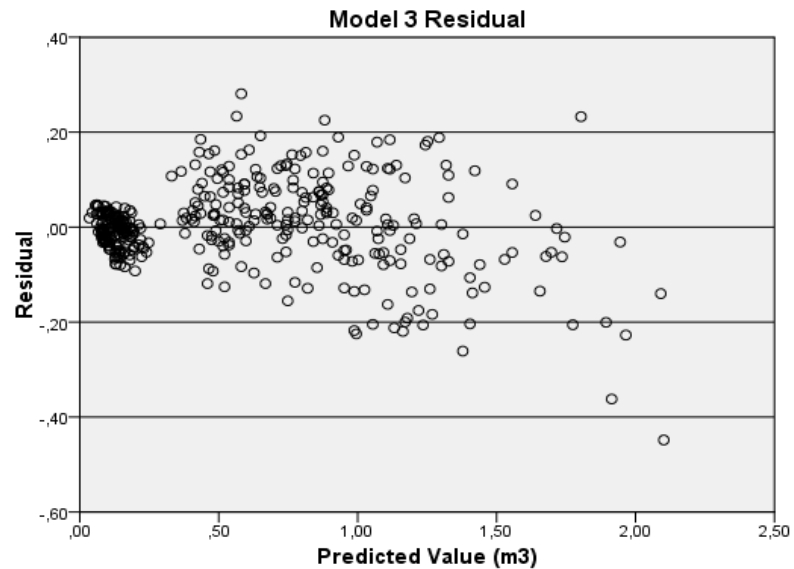


## Model 3

Equation	N	Adj.R <sup>2</sup>	RMSE for V	Bias for V	F-value	sig. (p)	Model Ranking
$v = a + b \cdot dbh$	399	0.972	0.08730	-0.002903	13881.845	0.000	4

Regression Coefficients	a	b
Value	-0.2416	0.03677
Sig. (p)	0.000	0.000
Standard error	0.00838	0.000312

Residual plot:	SATISFACTORY
Obs / Pred plot:	GOOD



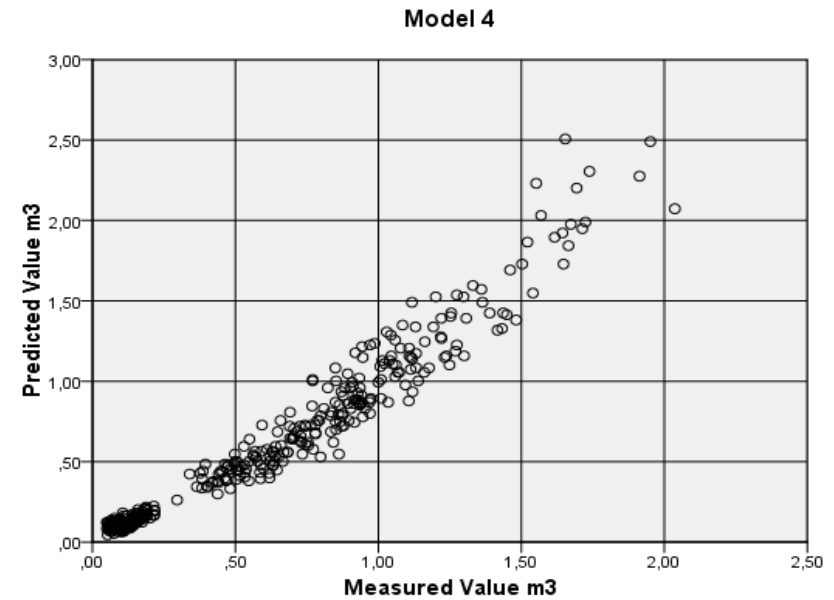
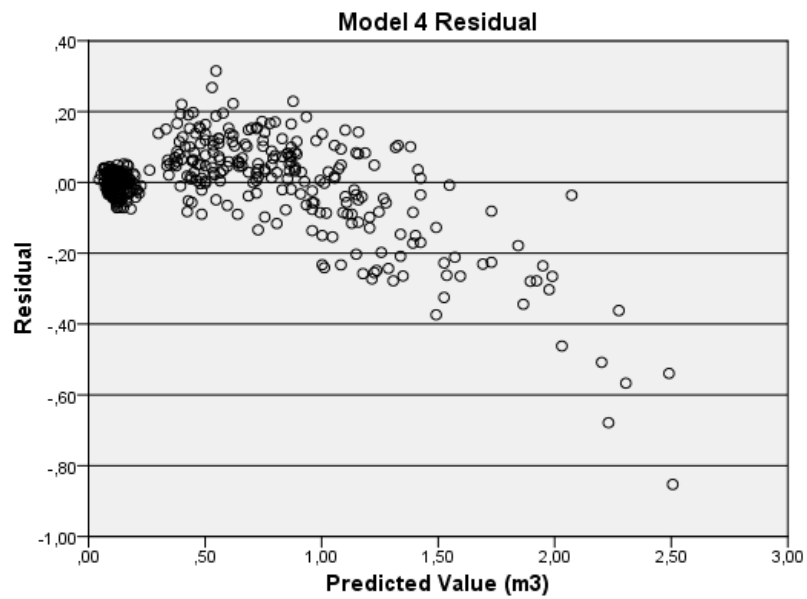


## Model 4

Equation	N	Adj.R <sup>2</sup>	RMSE for V	Bias for V	F-value	sig. (p)	Model Ranking
$\lg(V) = a + b \cdot \lg(\text{dbh})$	399	0.956	0.1207	0.006895	8551.405	0.000	6

Regression Coefficients	a	b
Value	-4.4523	2.9177
Sig. (p)	0.000	0.000
Standard error	0.04377	0.03155

Residual plot:	POOR
Obs / Pred plot:	POOR

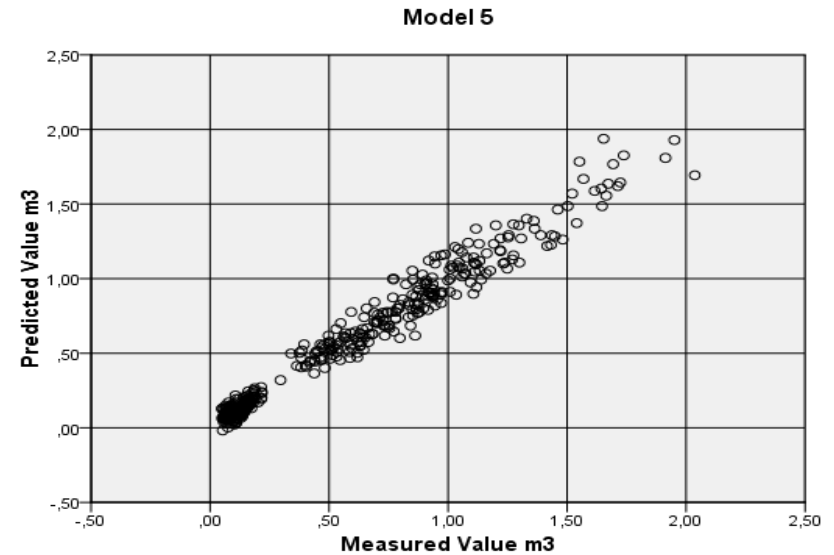
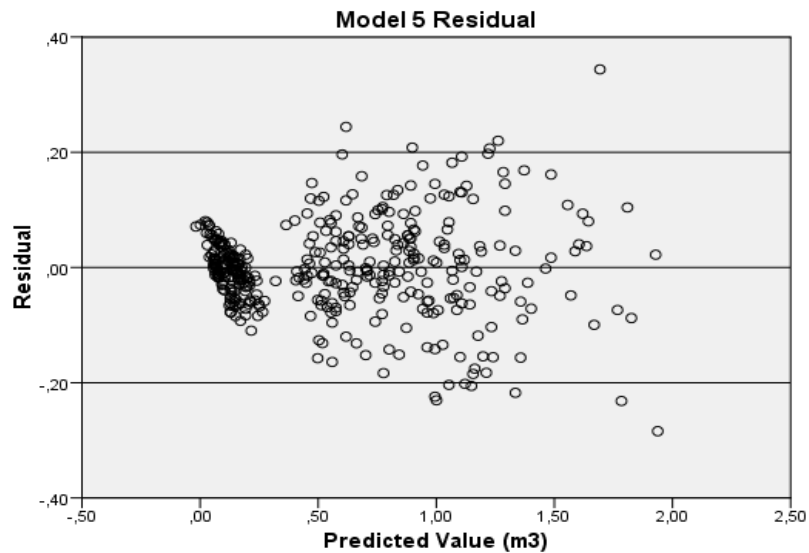


## Model 5

Equation	N	Adj.R <sup>2</sup>	RMSE for V	Bias for V	F-value	sig. (p)	Model Ranking
$V=a+b*dbh+c*bdh^2$	399	0.970	0.08074	0.00000003258	6468.466	0.000	3

Regression Coefficients	a	b	c
Value	-0.2104	0.006464	0.000875
Sig. (p)	0.000	0.04243	0.000
Standard error	0.03897	0.003175	0.00006

Residual plot:	SATISFACTORY
Obs / Pred plot:	GOOD

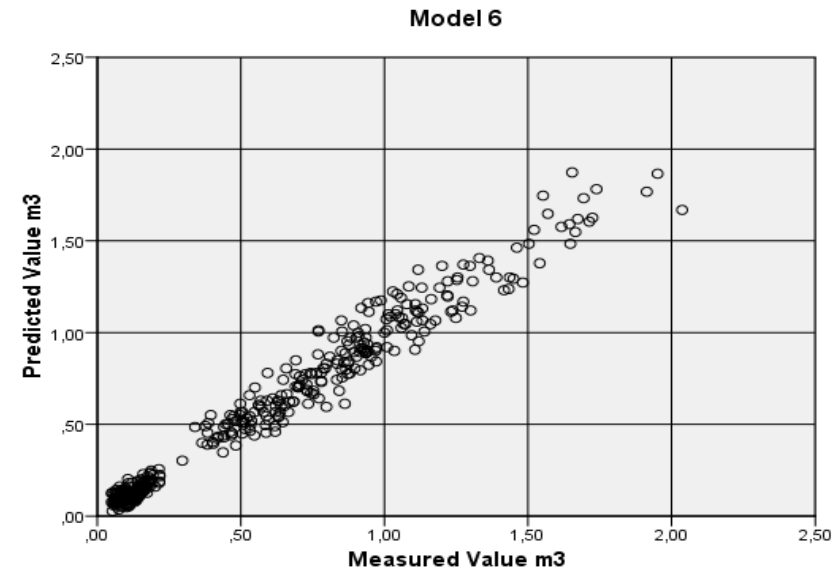
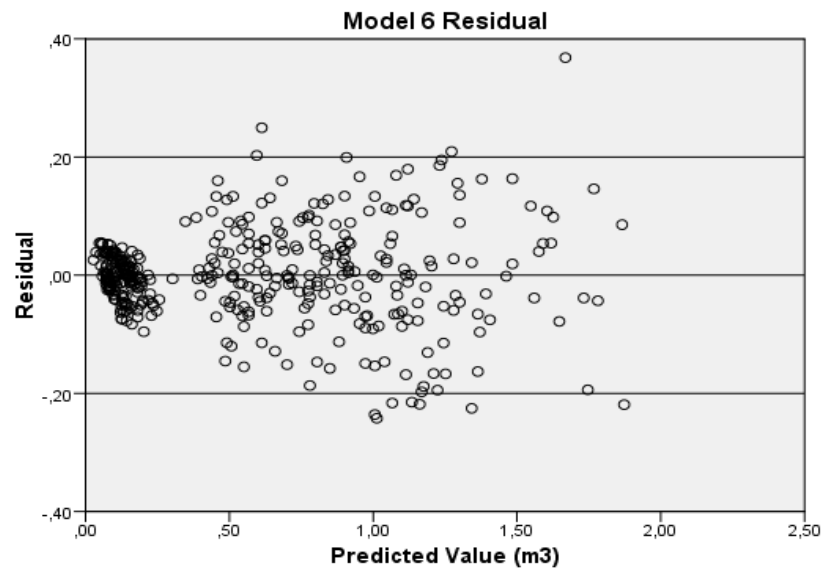


## Model 6

Equation	N	Adj.R <sup>2</sup>	RMSE for V	Bias for V	F-value	sig. (p)	Model Ranking
$V = a + b \cdot dbh + c \cdot dbh^2 + d \cdot dbh^3$	399	0.971	0.07993	0.0000002005	4403.085	0.000	1

Regression Coefficients	a	b	c	d
Value	0.1894	-0.04258	0.00272	-0.0000217
Sig. (p)	0.1718	0.01066	0.000013	0.002782
Standard error	0.1383	0.01659	0.000616	0.000007

Residual plot:	SATISFACTORY
Obs / Pred plot:	GOOD

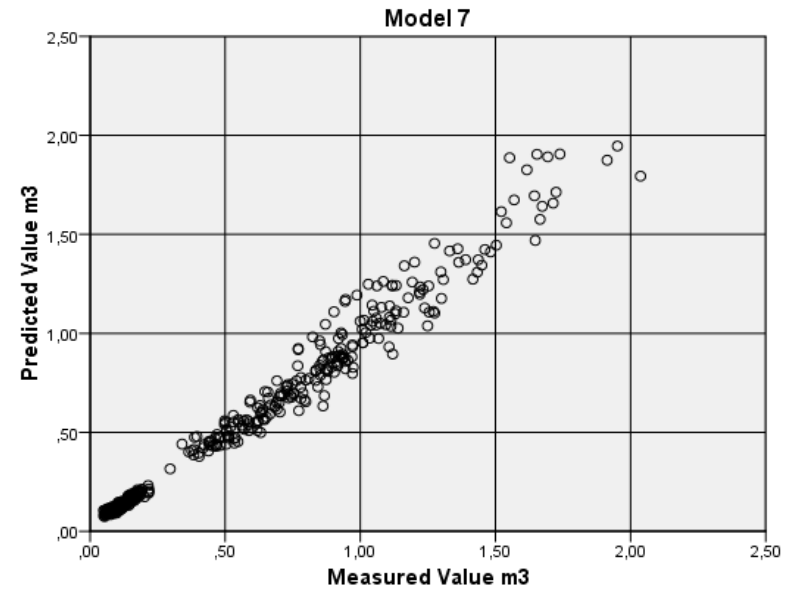
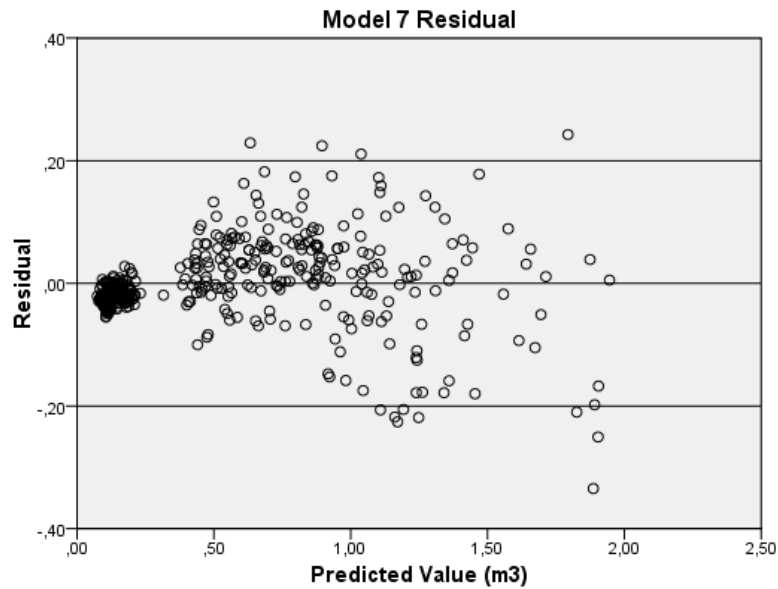


Model 7

Equation	N	Adj.R <sup>2</sup>	RMSE for V	Bias for V	F-value	sig. (p)	Model Ranking
$V = a + b \cdot (\text{dbh}^2 \cdot H)$	399	0.976	0.07206	0.000000005013	16343.602	0.000	4

Regression Coefficients	a	b
Value	0.02431	0.0000319
Sig. (p)	0.000023	0.000
Standard error	0.005676	0.000

Residual plot:	SATISFACTORY
Obs / Pred plot:	GOOD

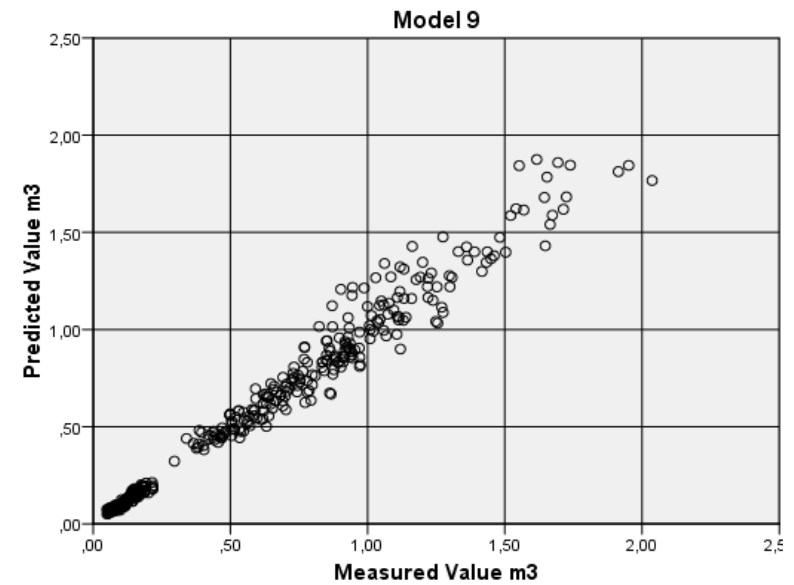
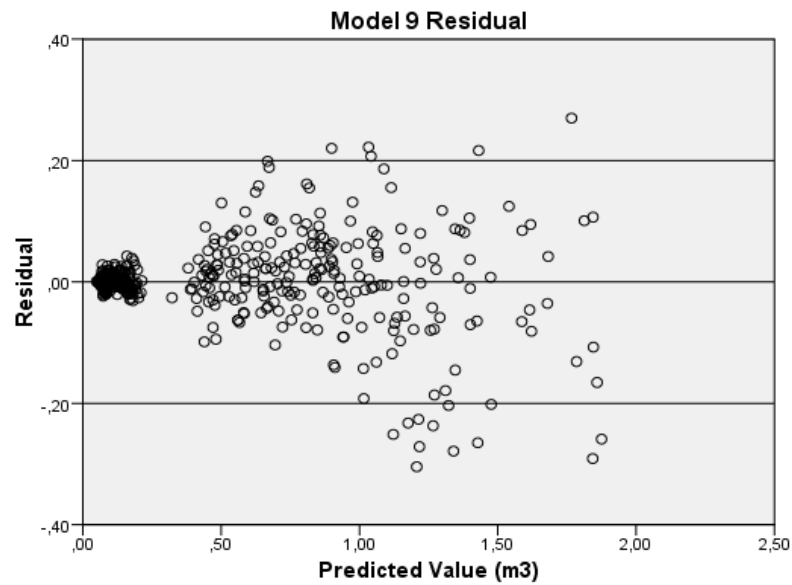


## Model 9

Equation	N	Adj.R <sup>2</sup>	RMSE for V	Bias for V	F-value	sig. (p)	Model Ranking
$\ln(V)=a+b*\ln(dbh)+c*\ln(H)$	399	0.989	0.07437	-0.0002640	18442.043	0.000	8

Regression Coefficients	a	b	c
Value	-10.3306	1.6444	1.3869
Sig. (p)	0.000	0.000	0.000
Standard error	0.04942	0.03909	0.03910

Residual plot:	SATISFACTORY
Obs / Pred plot:	GOOD

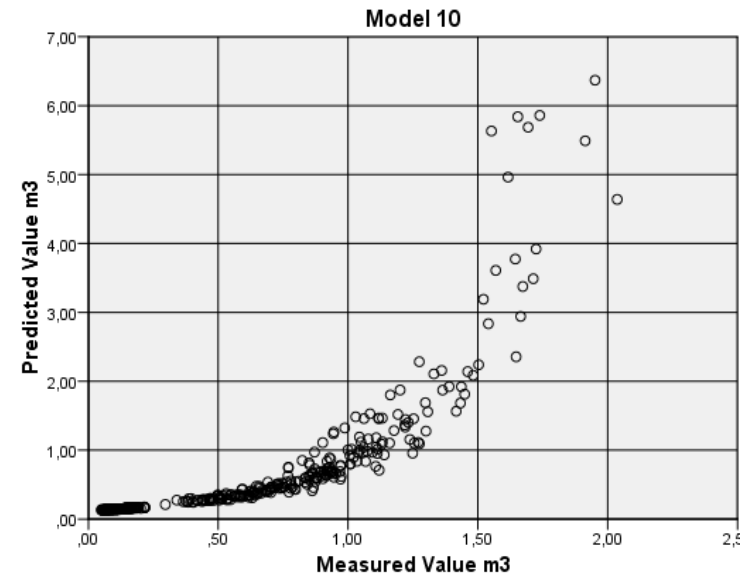
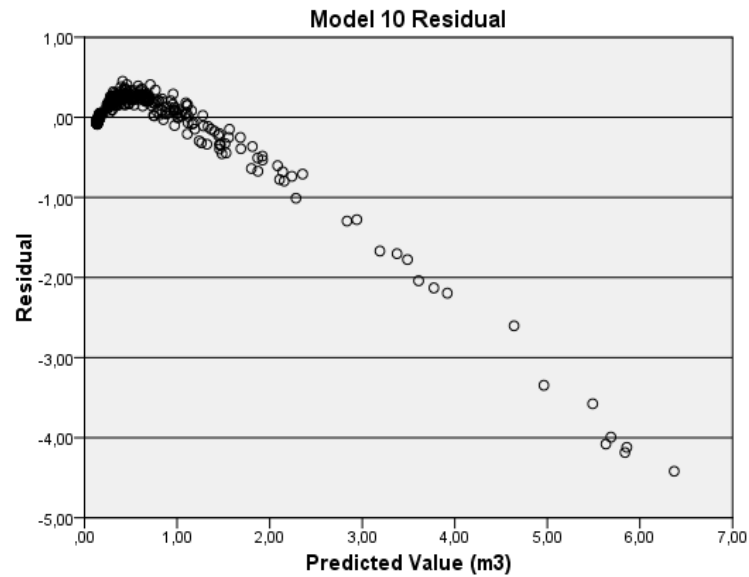


Model 10

Equation	N	Adj.R <sup>2</sup>	RMSE for V	Bias for V	F-value	sig. (p)	Model Ranking
$\ln(V)=a+b*(dbh^2*H)$	399	0.825	0.5681	0.06249	1878.588	0.000	10

Regression Coefficients	a	b
Value	-2.1603	0.00006661
Sig. (p)	0.000	0.000
Standard error	0.03495	0.000002

Residual plot:	POOR
Obs / Pred plot:	POOR

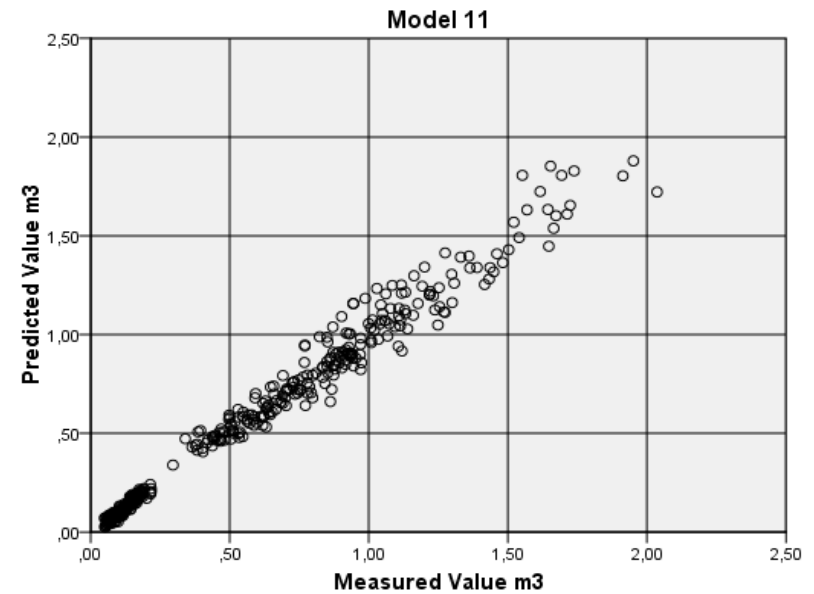
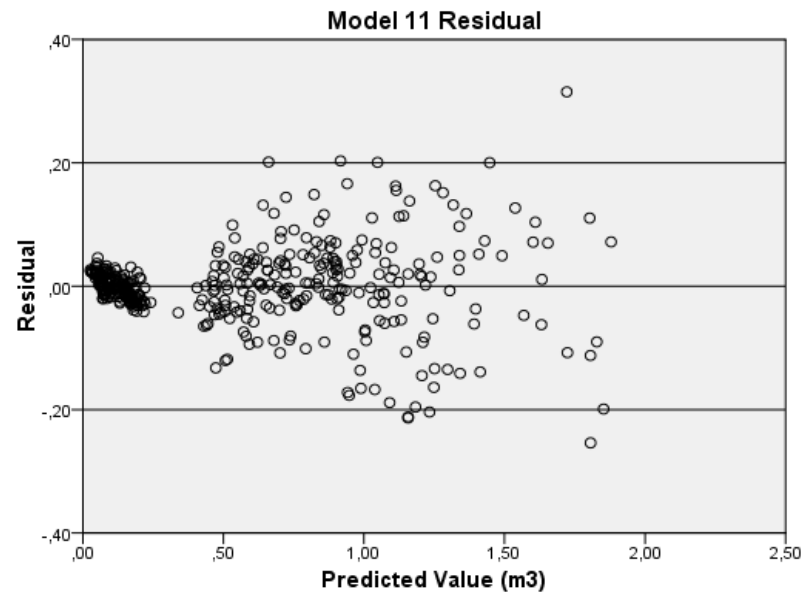


Model 11

Equation	N	Adj.R <sup>2</sup>	RMSE for V	Bias for V	F-value	sig. (p)	Model Ranking
$V=a+b*dbh^2+c*H+d*(dbh^2*H)$	399	0,980	0.06640	0.00000001504	6439.635	0.000	1

Regression Coefficients	a	b	c	d
Value	-0.1417	0.000329	0.008255	0.0000181
Sig. (p)	0.000	0.000	0.000	0.000
Standard error	0.0202	0.000061	0.001139	0.000002

Residual plot:	GOOD
Obs / Pred plot:	GOOD

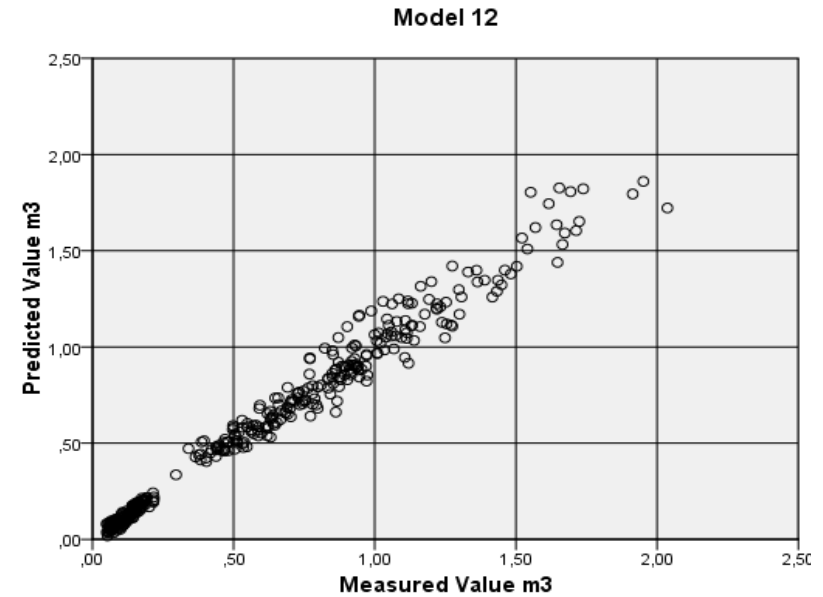
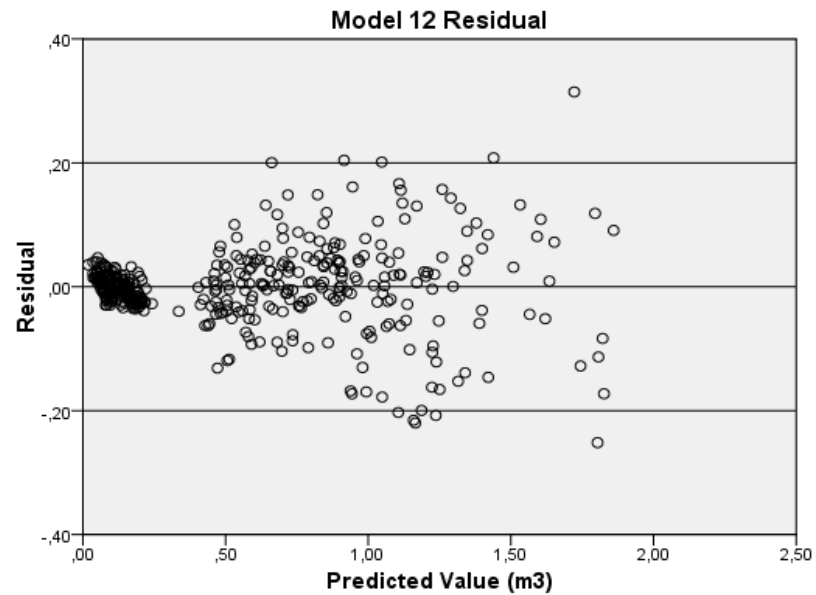


## Model 12

Equation	N	Adj.R <sup>2</sup>	RMSE for V	Bias for V	F-value	sig. (p)	Model Ranking
$V=a+b*dbh+c*2H+d*(dbh^2*H)$	399	0.980	0.06685	0.00000001003	6352.159	0.000	1

Regression Coefficients	a	b	c	d
Value	-0.1870	0.01008	0.002161	0.00002426
Sig. (p)	0.000	0.000002	0.001051	0.000
Standard error	0.0280	0.00209	0.000655	0.000001

Residual plot:	GOOD
Obs / Pred plot:	GOOD



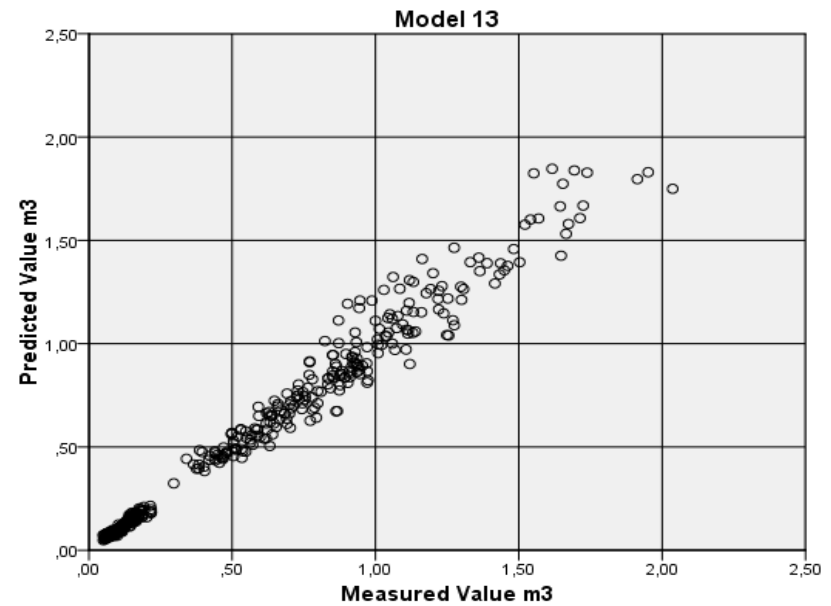
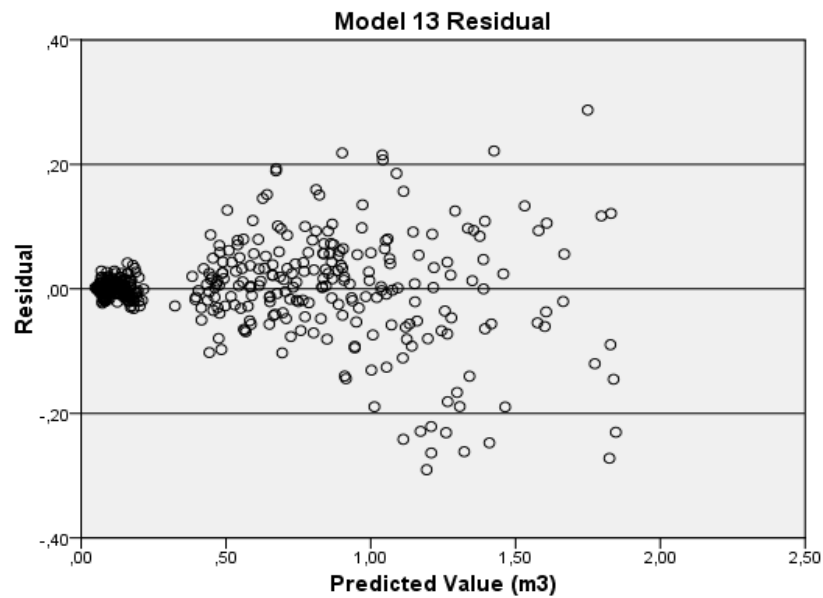


Model 13

Equation	N	Adj.R <sup>2</sup>	RMSE for V	Bias for V	F-value	sig. (p)	Model Ranking
$\ln(V) = a + b \cdot \ln(\text{dbh}) + c \cdot \ln(H) + d \cdot \ln(H-1,3) + e \cdot \text{dbh}$	399	0.990	0.07322	-0.001003	12538.853	0.000	5

Regression Coefficients	a	b	c	d	e
Value	-10.0496	1.7249		1.2569	-0.002226
Sig. (p)	0.000	0.000		0.000	0.6372
Standard error	0.2499	0.1320		0.03732	0.004716

Residual plot:	GOOD
Obs / Pred plot:	GOOD

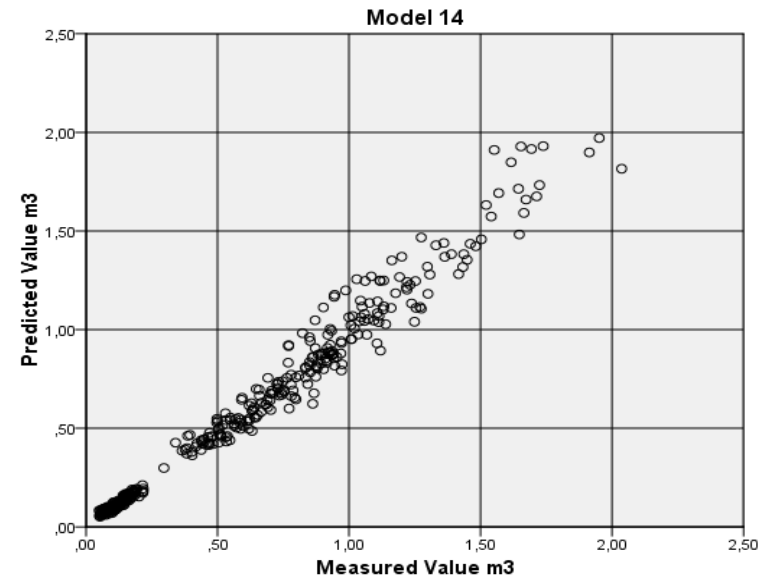
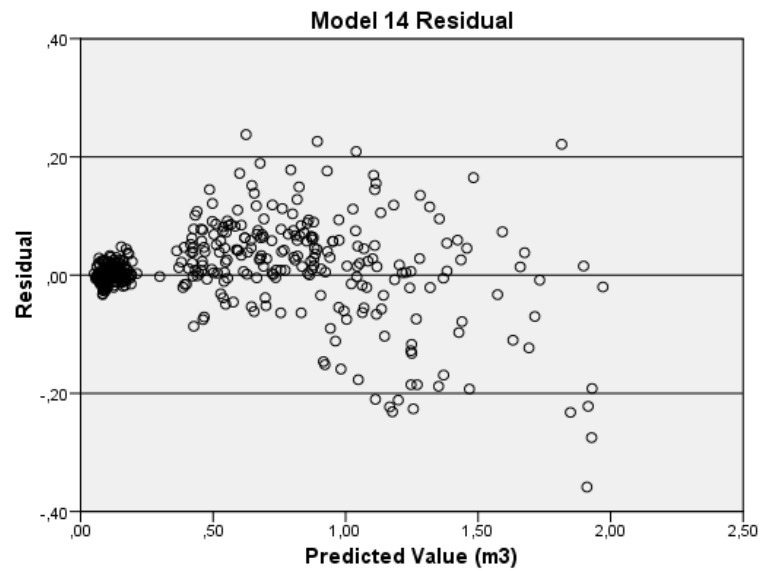


Model 14

Equation	N	Adj.R <sup>2</sup>	RMSE for V	Bias for V	F-value	sig. (p)	Model Ranking
$V=a*dbh^2*H$	399	0.992	0.07361	-0.009821	40804.339	0.000	9

Regression Coefficients	a
Value	0.00003273
Sig. (p)	0.000
Standard error	0.000

Residual plot:	SATISFACTORY
Obs / Pred plot:	GOOD

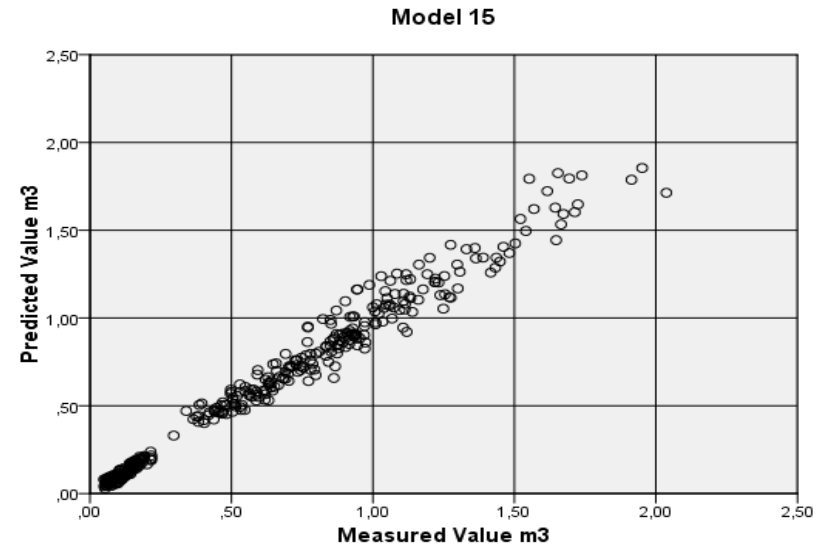
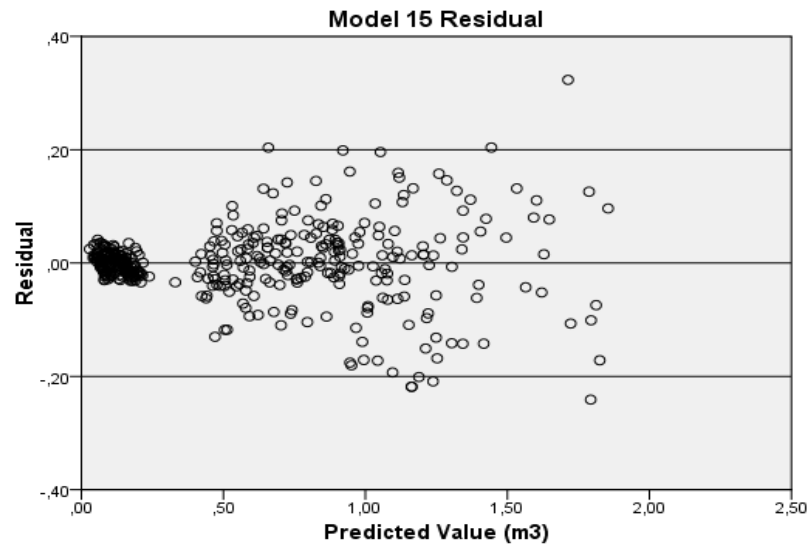


## Model 15

Equation	N	Adj. R <sup>2</sup>	RMSE for V	Bias for V	F-value	sig. (p)	Model Ranking
$V=a+b*dbh^c*H^d$	399	0.980	0.02098	0.00000001504	0,000	0,000	1

Regression Coefficients	a	b	c	d	e
Value	-0.06362	0.000223	1.7246	0.7338	
Sig. (p)	-	-	-	-	
Standard error	0.01415	0.000055	0.04220	0.06330	

Residual plot:	GOOD
Obs / Pred plot:	GOOD

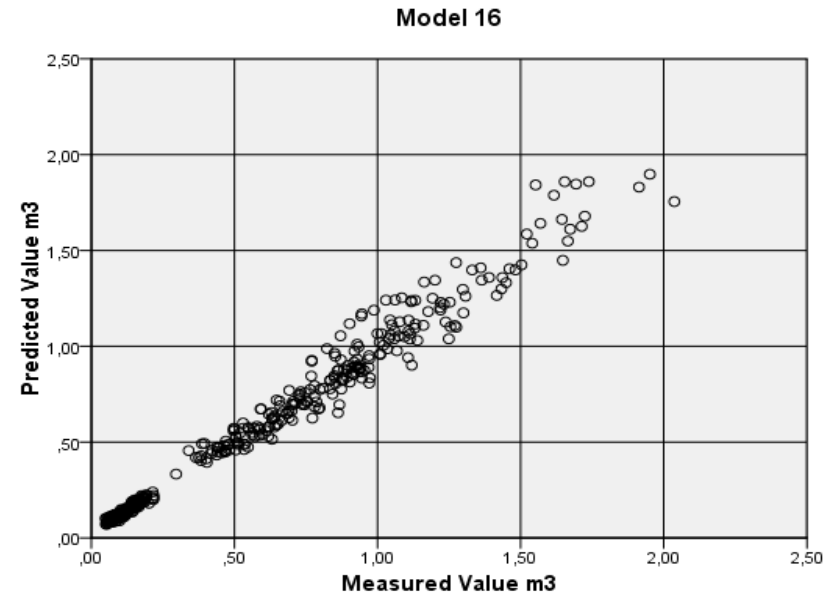
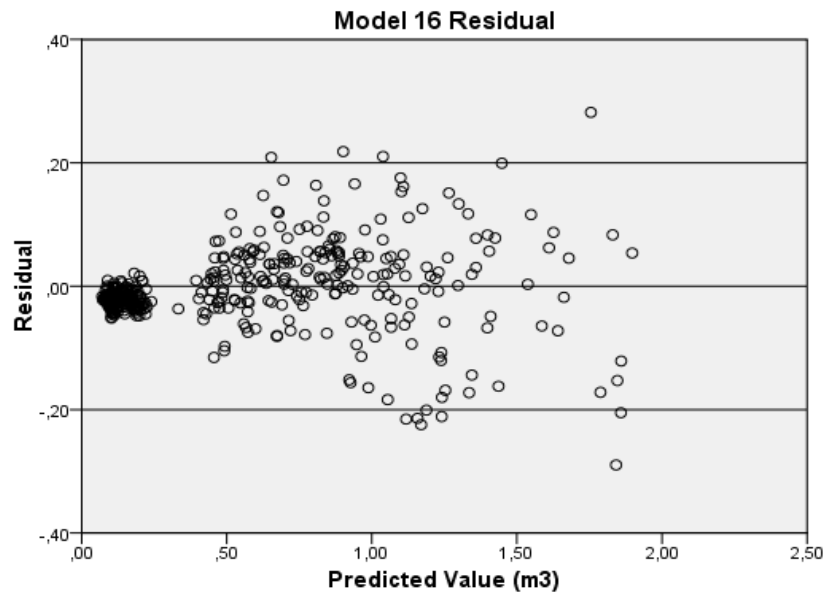


## Model 16

Equation	N	Adj.R <sup>2</sup>	RMSE for V	Bias for V	F-value	sig. (p)	Model Ranking
$V = a \cdot dbh^2 + b \cdot H^2 + c \cdot (dbh^2 \cdot H) + d \cdot (dbh \cdot H^2)$	399	0.991	0.06939	0.004563	11493.448	0.000	5

Regression Coefficients	a	b	c	d
Value	0.00008007	0.000134	0.00002763	-0.000001193
Sig. (p)	0.3906	0.3427	0.000066	0.8903
Standard error	0.000093	0.000141	0.000007	0.000009

Residual plot:	GOOD
Obs / Pred plot:	GOOD

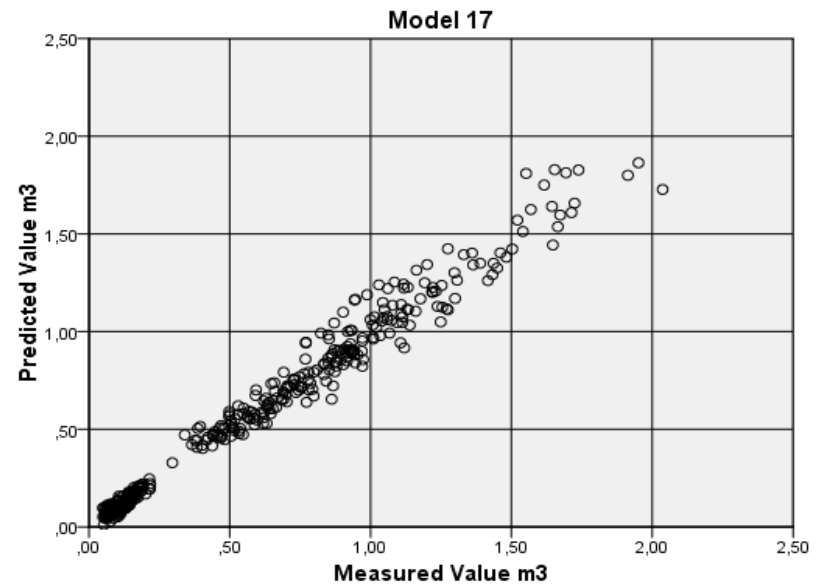
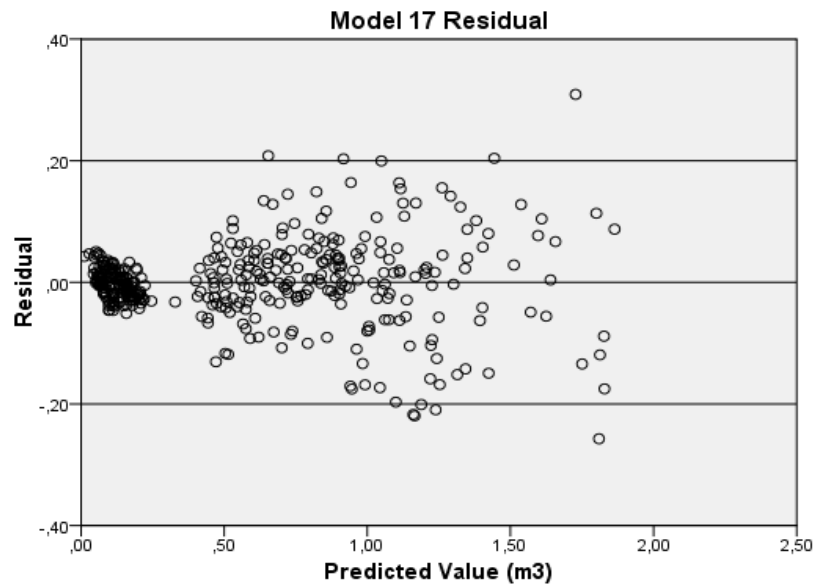


Model 17

Equation	N	Adj.R <sup>2</sup>	RMSE for V	Bias for V	F-value	sig. (p)	Model Ranking
$V=a+b*dbh+c*dbh^2+d*(dbh^2*H)$	399	0.979	0.06751	-0.0000002005	6225.697	0.000	5

Regression Coefficients	a	b	c	d
Value	-0.2081	0.01710	-0.000161	0.00002701
Sig. (p)	0.000	0.000	0.08507	0.000
Standard error	0.03259	0.002776	0.000093	0.000002

Residual plot:	GOOD
Obs / Pred plot:	GOOD

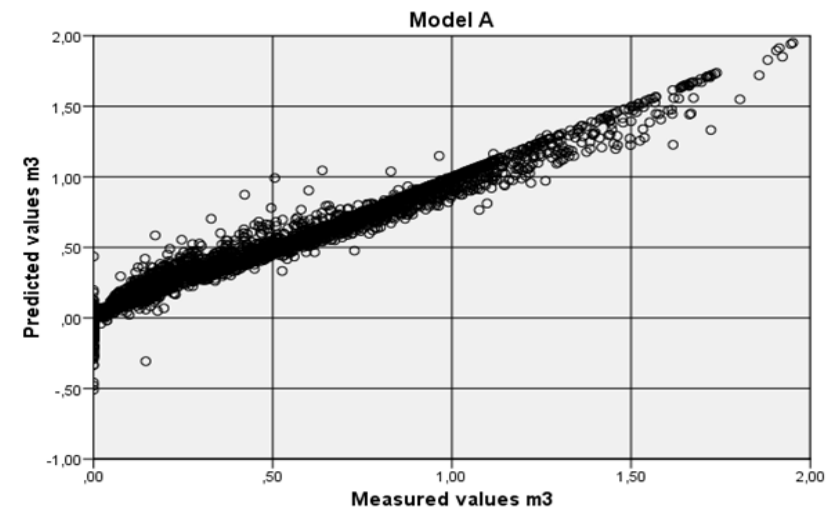
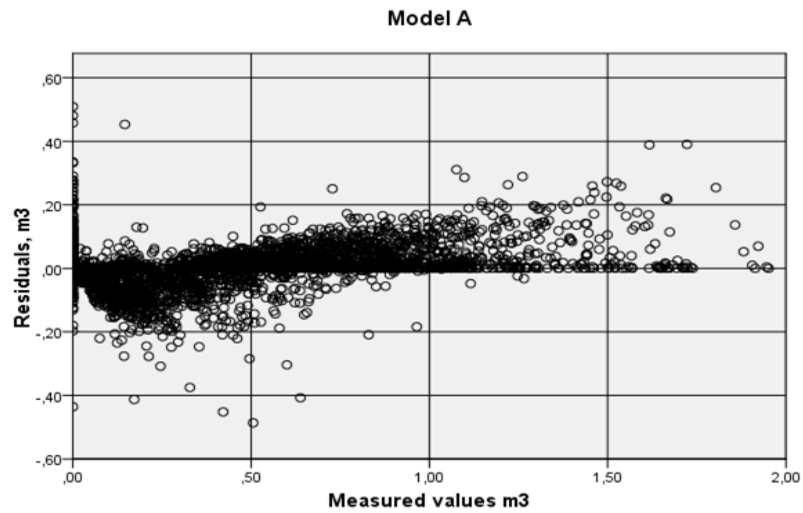


## Model A

Equation	N	Adj.R <sup>2</sup>	RMSE for V	Bias for V	Model Ranking
$V_m = V * (1 - (a * d^b * dbh^c))$	4378	0.982	0.05020	0.001149	1

Regression Coefficients	a	b	c
Value	0.2755	3.0041	-2.6785
Standard error	0.01416	0.01772	0.02131

Residual plot:	SATISFACTORY
Obs / Pred plot:	GOOD



## Model B

Equation	N	Adj.R <sup>2</sup>	RMSE for V	Bias for V	Model Ranking
$V_m = a \cdot dbh^b \cdot (H + (H-1,3) \cdot d/dbh) \cdot (H - (H-1,3) \cdot d/dbh)$	4378	0.924	0.1019	0.02086	2

Regression Coefficients	a	b
Value	0.0000209	1.2356
Standard error	0.000001	0.01729

Residual plot:	GOOD
Obs / Pred plot:	SATISFACTORY

