



**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO**  
**DIPARTIMENTO DEMETRA**  
Dottorato in Sistemi Arborei Agrari e Forestali

**PARAMETRI DI SVILUPPO E GESTIONE DELLA  
RISORSA IDRICA IN *Opuntia ficus-indica*.**

Settore scientifico disciplinare AGR03

TESI DEL DOTTOR  
GUGLIELMO INGLESE

COORDINATORE DEL DOTTORATO  
CHIAR.MO PROF. TIZIANO CARUSO

TUTOR  
CHIAR.MO PROF. PAOLO INGLESE

CO-TUTOR  
CHIAR.MA PROF. SIMONA CONSOLI

XXIII CICLO ANNO ACCADEMICO 2011-2012

DOTTORATO





**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO**  
**DIPARTIMENTO DEMETRA**  
Dottorato in Sistemi Arborei Agrari e Forestali

**PARAMETRI DI SVILUPPO E GESTIONE DELLA  
RISORSA IDRICA IN *Opuntia ficus-indica*.**

Settore scientifico disciplinare AGR03

TESI DEL DOTTOR  
GUGLIELMO INGLESE

COORDINATORE DEL DOTTORATO  
CHIAR.MO PROF. TIZIANO CARUSO

TUTOR  
CHIAR.MO PROF. PAOLO INGLESE

CO-TUTOR  
CHIAR.MA PROF. SIMONA CONSOLI

XXIII CICLO ANNO ACCADEMICO 2011-2012



# Indice

<b>ENGLISH ABSTRACT OF THE THESIS</b>	1
1. Introduction	1
2. Scientific background	1
3. Research needs	5
4. Materials and methods	6
5. Results and discussion	7
5.1. <i>Determination of seasonal dry matter accumulation and partitioning, total dry weight and leaf area index of a Cactus Pear orchard for fruit production.</i>	7
5.2. <i>Determination of evapotranspiration and crop coefficient in a Cactus Pear orchard under semi-arid conditions.</i>	8
5.3. <i>CO<sub>2</sub> uptake of Cactus Pear whole trees and single cladodes, in relation to plant water status and cladode age</i>	9
6. Conclusion	10
<b>PARTE GENERALE</b>	12
1. <i>Opuntia ficus-indica</i> : origine della specie e usi	13
2. Cenni sulla morfologia e l'anatomia della specie	15
3. Il metabolismo acido delle Crassulaceae e l'efficienza d'uso dell'acqua	17
4. Assorbimento di CO <sub>2</sub> e produttività di <i>Opuntia ficus-indica</i> in relazione ai parametri ambientali	22
4.1. <i>Gli scambi gassosi</i>	22
4.1.1. <i>Il ruolo della temperatura</i>	23
4.1.2. <i>Il ruolo della disponibilità di energia radiante</i>	23
4.1.3. <i>Il ruolo della disponibilità idrica</i>	24
4.1.4. <i>La concentrazione della CO<sub>2</sub> atmosferica</i>	25
4.2. <i>Gli indici di produttività ambientale e l'accumulo di biomassa epigea</i>	25
5. Domande aperte alle quali la tesi vuole rispondere	27
<b>PARTE SPERIMENTALE</b>	30
<b>Accumulo e Ripartizione della Sostanza Secca e Indici di Area Fogliare in <i>Opuntia ficus-indica</i> L. (Mill.).</b>	31
1. Introduzione	32
2. Materiali e metodi	32
2.1. <i>Caratteristiche del frutteto</i>	32
2.2. <i>Accumulo e ripartizione stagionale di sostanza secca nella parte epigea</i>	33
2.3. <i>Peso complessivo e indci di area fogliare delle piante</i>	34
3. Risultati	36
3.1. <i>Accumulo e ripartizione stagionale di sostanza secca nella parte epigea</i>	36
3.2. <i>Peso complessivo e indci di area fogliare delle piante</i>	37
4. Discussione e conclusione	40
<b>Stima di Evapotraspirazione e Coefficiente Colturale in un Impianto di <i>Opuntia ficus-indica</i> L. (Mill.) Attraverso una Tecnica di Bilancio Energetico</b>	43
1. Introduzione	44
2. Materiali e metodi	44
2.1. <i>Caratteristiche del frutteto</i>	44
2.2. <i>Stime micrometeorologiche</i>	45

3. Risultati	49
4. Discussione e conclusione	55
<b>Flussi di CO<sub>2</sub> in Piante Intere e Singoli Cladodi di <i>Opuntia ficus-indica</i> L. (Mill.)</b>	57
1. Introduzione	58
2. Materiali e metodi	58
2.1. <i>Piante intere allevate in vaso in relazione allo stato idrico</i>	60
2.2. <i>Scambi di CO<sub>2</sub> in singoli cladodi di 1 e 2 anni</i>	61
3. Risultati	62
3.1. <i>Piante intere allevate in vaso in relazione allo stato idrico</i>	62
3.2. <i>Scambi di CO<sub>2</sub> in singoli cladodi di 1 e 2 anni</i>	70
4. Discussione e conclusione	71
<b>CONCLUSIONI GENERALI SUGLI ESPERIMENTI CONDOTTI</b>	75
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	79
<b>CURRICULUM DEL DOTTORANDO</b>	91

# ENGLISH ABSTRACT OF THE THESIS

## 1. Introduction

*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill., also known as Cactus Pear, is a CAM species (*Crassulacean Acid Metabolism*) belonging to the Cactaceae family. This group of species has a nocturnal stomata opening with CO<sub>2</sub> uptake occurring, typically, from dusk to dawn. During the nighttime, through phosphoenolpyruvate (PEP) carboxylation, malate is formed and, then, stored in vacuoles, with a sensible increasing of acidity. During the daytime, while stomata are closed, CO<sub>2</sub> is released by decarboxylation of malate and fixed into photosynthetic products by Rubisco as for C<sub>3</sub> and C<sub>4</sub> plants (Nobel, 1988). The photosynthetic pathway of *O. ficus-indica* results in a higher water use efficiency (WUE) than any other C<sub>3</sub> and C<sub>4</sub> cultivated species (Nobel, 1988; Lüttge, 2004). In fact, during the night, lower temperature and water pressure deficit account for a lower evaporative demand than during the daytime, leading to a two- to six-fold (50 - 250 kg H<sub>2</sub>O kg<sup>-1</sup> dry matter) lower transpiration rate (TR) compared with the same degree of stomata opening during the day (De Kock, 1980; Nobel, 1988; Le Houèrou, 2000; San-José *et al.*, 2007). Moreover, cladodes, typical photosynthetic stems, are covered by a wax-made cuticle 5 to 30 µm of depth with a very low stomatal density, which is typically of 20 – 30 stomata mm<sup>-2</sup> (Conde, 1975; Pimienta-Barrios *et al.*, 1992). Underneath the cuticle, a thick layer of photosynthetic cells, the chlorenchyma surrounds the parenchyma, the inner tissue made up by cells with extensible walls, able to store considerable amounts of water.

## 2. Scientific background

Researches about the environmental biology of *Opuntia ficus-indica* begun when Nobel and Hartsock (1984) measured CO<sub>2</sub> uptake on single cladodes grown in growth chambers. From then onwards, cladodes gas exchange have been measured on single portions of both the cladode planar surfaces, at specific intervals (2 - 4 h) during the daytime, and specifically during the nighttime, whether in the field or in growth chambers, to understand the response to environmental factors, such as air temperature, light intensity, water availability and elevated

CO<sub>2</sub> conditions (Nobel, 1988, 2002). All this information was summarized to propose an environmental productivity index (EPI) able to predict plant performance under different ecological conditions (Nobel, 1988).

*Opuntia ficus-indica* can achieve an annual dry matter productivity that exceeds that of nearly all cultivated C<sub>3</sub> and C<sub>4</sub> species. For instance, a productivity of 47 tons (t) dry weight (dw) ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup> of cladodes (99%) and fruits (1%) has been predicted for high density plantings (24 plants m<sup>-2</sup>), while a productivity of nearly 15 t ha<sup>-1</sup> was measured for lower spacing (0.24 plants m<sup>-2</sup>), resulting in a lower vegetative vs reproductive growth (1:1 cladode vs fruit growth ratio), with early fruit cropping and a clear alternate bearing behavior (García de Cortazar and Nobel, 1992). Han and Felker (1997), working on *Opuntia ellisiana* reported an annual dry biomass productivity of 17.6 t dw ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup> with a LAI of 4. Greater values were reported by Nobel (1991, 1992) for high-density OFI plantings in Chile and Mexico, with productivities of 47 and 45 t dw ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup> respectively. García de Cortazar and Nobel (1992), showed even higher productions: 49.8 t ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup> dry mass in a 3-years-old OFI plot with 240,000 plants ha<sup>-1</sup>. All the values cited above were obtained in experimental sites with no concern to fruit size and overall quality parameters.

Cladode growth, in terms of surface area, is almost entirely completed at the end of its first growing season (May - November in temperate zones of the northern hemisphere); cladodes will continue to grow, in term of thickness and dry matter accumulation, during the next seasons, with great morphological and functional changes (Nobel, 1988).

The dry weight of newly developing, current-year cladodes increases more and more rapidly for about 30 days since bud burst and then linearly with time up to 65 - 100 days (Luo and Nobel, 1993; Inglese *et al.*, 1999). The competition between fruit and vegetative growth depends on their relative sink strength during their different developmental stages. Young cladodes are competitive sinks for carbohydrate resources during most of the fruit development period, while fruit became the strongest sink during the final swell of their core (Inglese *et al.*, 1999). One-year-old cladodes that have more dry weight (33 to 50 g) than the average for a particular size (excess dry weight) tend to be fruitful (De Cortazar and Nobel, 1992), two-years-old and elder cladodes are responsible for vegetative growth and have a limited fruiting potential (Inglese *et al.*, 2002). Fruit quality is also related to cladode dry weight (Inglese *et al.*, 2008) and the fruit have a very limited role in determining the whole plant net CO<sub>2</sub> uptake (Inglese *et al.*, 1994;

Nobel, 2002). Among other factors, productivity depends on plant spacing and canopy architecture that affect light interception. Fully exposed cladodes ( $15 \text{ mol m}^{-2} \text{ day}^{-1} \text{ PAR}$ ) may have a net  $\text{CO}_2$  uptake two-fold higher than sub-terminal cladodes that receive 65% of total PAR ( $10 \text{ mol m}^{-2} \text{ day}^{-1} \text{ PAR}$ ) (García de Cortazar and Nobel, 1986). However, PAR interception,  $\text{CO}_2$  uptake and, then, plant productivity depend on the stem area index (both sides of the cladode) per ground area (SAI), which is the equivalent of the leaf area index (LAI) (Nobel, 1988). Maximum productivity (tons of total biomass dry weight  $\text{ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ ) has been predicted for a LAI of 4 to 5 (Nobel, 1988). Three weeks of drought conditions are required for halving net  $\text{CO}_2$  uptake over 24-h period (Nobel, 1988), and after 50 days of drought net  $\text{CO}_2$  uptake of cladodes is around zero (Acevedo *et al.*, 1983). Moreover, three months of drought decreased nocturnal acid accumulation by 73%, essentially abolished transpiration and reduced cladode water content by 45% (Goldstein *et al.*, 1991). However, fruit quality, i.e. fruit size, is reduced by water deficit long before the tree shows any symptom of water stress (Gugliuzza *et al.*, 2002).

In the northern hemisphere, most of the fruit development period coincides with long and dry summers, with a water deficit period that may last for 3 - 4 months (June - September). Nerd *et al.* (1989) report that in the Negev desert, with an annual rainfall lower than 300 mm, winter irrigation is needed to reach a regular plant fertility at springtime. An annual volume of 60 - 100 mm of irrigation water, during the fruit development period, coupled with fruit thinning, is required to get export-size fruit with regular flesh percent (55 - 65%), and to increase marketable yield composition (Barbera, 1984; Gugliuzza *et al.*, 2002).

Only 2-week-old developing cladodes and flower buds have mostly daytime  $\text{CO}_2$  uptake (Acevedo *et al.*, 1983), but older cladodes show a typical CAM behavior. Instantaneous values of net  $\text{CO}_2$  uptake of 1-year-old cladodes may reach  $15 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  (Inglese *et al.*, 1994; Nobel, 1988; Pimienta-Barrios *et al.*, 2005) depending on environmental factors, such as air temperature, light intensity and water availability (Pimienta-Barrios *et al.*, 2000). Nobel and Hartsock (1984) have shown that under optimal conditions ( $25/15 \text{ }^\circ\text{C}$  day/night) and light saturation OFI may assimilate  $344 \text{ mmol m}^{-2} \text{ day}^{-1}$  of  $\text{CO}_2$ , and lower or higher temperature range result in consistent reduction of  $\text{CO}_2$  uptake. Cladode carbon gain is, indeed, 60% less when day/night thermal excursion is  $45^\circ/35^\circ\text{C}$ , because of stomata closure (Nobel, 1988). OFI nocturnal  $\text{CO}_2$  uptake is related to total daily photosynthetic active radiation (PAR), with a compensation level, on a total daily PAR basis, of about  $3 \text{ mol m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ , and a saturation point



of about  $23 \text{ mol m}^{-2} \text{ day}^{-1}$  (Nobel, 1988, Nobel and Hartsock, 1983). A total daily net  $\text{CO}_2$  uptake of  $618 \text{ mmol m}^{-2} \text{ day}^{-1}$  was measured on single cladodes of field grown trees of *O. ficus-indica* under optimal ( $26^\circ/16^\circ\text{C}$ ) air temperature and photosynthetic photon flux (PPF), and low soil moisture ( $< 10\%$ ); 60 days after the soil water content had reached below 5%, cladode net  $\text{CO}_2$  uptake decreased by 15%, to become negative only 90 days afterwards (Pimienta-Barrios *et al.*, 2000). On the other hand, 50 days of drought resulted in a complete reduction of net  $\text{CO}_2$  uptake of single cladodes growing under controlled conditions (Nobel and Hartsock, 1984). Cladode succulence acts as a buffer to maintain turgescence in the photosynthetic tissue (chlorenchyma); the proximity of the water storage tissue (parenchyma) and the photosynthetic tissue results, in fact, in rapid water movements towards the chlorenchyma, allowing the plant to keep on with its photosynthetic activity during dry periods (Nobel, 1988). However, Nobel and Hartsock (1984) have shown how after 17 days of drought, net  $\text{CO}_2$  uptake decreases of about 50%, and ends after 50 days. For OFI cladodes subjected to a 3-month drought, transpiration rate was  $0.1 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  and nocturnal acidity increase was  $97 \text{ mmol H}^+ \text{ m}^{-2}$  against a transpiration rate of  $1.1 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  and a nocturnal acidity accumulation of  $362 \text{ mmol H}^+ \text{ m}^{-2}$  measured in well watered plants, with a decrease in water content of 61% for the parenchyma and 27% for the chlorenchyma (Goldstein *et al.*, 1991). In fact, though net  $\text{CO}_2$  uptake over 24-h period is around zero after 50 days of drought, nocturnal acidity can be kept around 40% of maximal accumulation (Acevedo *et al.*, 1983), due to incorporation of  $\text{CO}_2$  released within the tissue by respiration, as was first recognized for *O. basilaris* (Szarek *et al.*, 1973). The response of 1-year-old cladodes to drought also depends on the presence of newly developing daughter cladodes; indeed, daily carbon gain of 1-year-old mother cladodes is reduced, during drought, as the number of current-year daughter cladode increases. Drought combined with an increase of daughter cladodes shortened the period of positive net  $\text{CO}_2$  uptake and reduced the maximum rates of  $\text{CO}_2$  uptake of 1-year-old mother cladodes, while total daily  $\text{CO}_2$  uptake does not change if trees are watered (Pimienta-Barrios *et al.*, 2005).

### 3. Research needs

Despite the fact that we have a sound amount of data on *Opuntia ficus-indica* environmental biology, achievable biomass productivity and gas exchange patterns, there is a lack of knowledge to fill in respect of some agronomic and physiological issues like those treated in this thesis.

Values of relative annual dry matter allocated to the fruit component are, in *O. ficus-indica*, quite similar to those of some perennial fruit trees, such as apple and peach (Inglese *et al.*, 1999), but there is no extensive analysis on whole tree – canopy and root components – dry matter partitioning and seasonal allocation between primary and secondary growth. Information on carbohydrate fluxes within the tree as a result of different sink to source relationship are erratic and indicate a massive carbon flow of assimilates among cladodes of different age (Luo and Nobel, 1994; Inglese *et al.*, 1994; Inglese *et al.*, 1999).

Even though irrigation is used and successful in all cultivated area for cactus pear fruit production (Barbera, 1984; Gugliuzza *et al.*, 2002; Nerd *et al.*, 1989; Van der Merwe *et al.*, 1996), its timing and applied volumes are still defined on an empiric basis. So far, evapotranspiration (ET) of cacti have been evaluated using the soil water balance technique (Han and Felker, 1997), and, measurements of mass ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ) and energy exchanges (solar radiation) for a CAM community was reported by Nobel and Bobich (2002) at the Biosphere 2 Center in Arizona. Micrometeorological approaches might provide a suitable mean to determine ET because CAM species (i.e. cactus pear, pineapple) growth can affect surface forcing conditions and partitioning of available energy into sensible (H) and latent (LE or ET) heat flux densities (Baldocchi, 1994). In this respect, micrometeorological approaches are of particular interest because of their ability to predict surface control of energy transfer in terms of canopy and environmental factors (Jarvis and McNaughton, 1986).

Moreover, to our knowledge there is no data on gas exchange which integrates all cladodes in a tree or an entire cladode of a certain age or tree positions, at the same moment, with continuous measurements. This information would very much increase our knowledge on all plant reaction to environmental constraints as well as on interaction between different cladodes of the same tree. For instance, spot measurements of net  $\text{CO}_2$  uptake made on single cladodes grown, in small pot, under controlled conditions, indicate a sharp decay of their photosynthetic activity (Nobel and Hartsock, 1984), much before any decrease occurs for field-grown 1-year-old

cladodes, whose relations with the mother tree are more complex (Pimienta-Barrios *et al.*, 2000). This makes difficult to upscale data taken from single cladodes to the whole tree response to environmental stresses, such as the water deficit. To obtain this information, the use of open system chambers, made up with polyethylene balloons, has been applied, in deciduous fruit trees like apple and grapevine, to measure whole tree gas exchange (Alterio *et al.*, 2006; Corelli Grappadelli and Magnanini, 1993, 1997; Mattii and Orlandini, 2005).

#### **4. Materials and methods**

The thesis includes three experiments.

The first one wants to help understand, over a cactus pear orchard in Sicily for fruit production, made by 10-years-old trees, which is the annual above ground biomass production, in terms of dry weight, and its partitioning into the trees components. Moreover, at the end of the season, three trees have been destroyed to investigate both the single tree and the orchard LAI, and the trees total dry weight allocated in every component (current-year cladodes, 1-year-old cladodes, 2 to 4-years-old cladodes, scaffolds, trunk, roots).

The same orchard was used also for the second experiment, in which energy flux densities were directly measured and estimated, from spring 2009 to autumn 2010, over two cropping seasons. The objective of this experiment was to evaluate the suitability of the Energy Balance combined with Surface Renewal technique to estimate evapotranspiration and crop coefficient of cactus pear under semi-arid conditions.

In this thesis, seasonal dry weight accumulation and evapotranspiration have been combined to investigate the values of the TR of the plants and the WUE of the system.

The goal of the third experiment was to determine the net CO<sub>2</sub> uptake of whole *Opuntia ficus-indica* trees, measuring carbon fluxes continuously over a 24-h period, on well-watered and droughted 3-year-old trees, using the open system chambers applied simultaneously on each of six trees. Samples of current-year, 1-year-old and 2-years-old cladodes were also taken, using a cork borer, to evaluate the amount of water in parenchyma and chlorenchyma tissues. Net CO<sub>2</sub> uptake was also measured for single 1-year-old and 2-years-old cladodes receiving the same daily PAR.

## 5. Results and discussion

### 5.1. *Determination of seasonal dry matter accumulation and partitioning, total dry weight and leaf area index of a Cactus Pear orchard for fruit production.*

Seasonal above ground dry matter productivity of the orchard was, in 2009, 12.9 t ha<sup>-1</sup>. Fruit production in terms of dry weight was 3.4 t ha<sup>-1</sup>. The new flush of vegetation represented almost 80% of the total dry weight fixed by the trees. In particular, current year cladodes accounted for 42.5% of the total dry mass accumulated during the growing season.

Within canopy allocation, number and age of cladodes influence light interception and, then, plant productivity, and OFI requires a LAI of about 4, for high biomass gain (García de Cortazar and Nobel, 1986). The LAI orchard and the LAI tree calculated in this experiment were 3.5 and 5.8. They refers to cladodes not older than 4 years, considering that elder cladodes tend to be lignified and, for LAI assessment, could be considered as a trunk or a scaffold, with no photosynthetic activity. Despite the high LAI, the proportion of annual dry matter allocated to the fruit component (Harvest Index = HI) was 26%, corresponding to almost 20 t ha<sup>-1</sup> of high quality fruit. Commercial LAI is very similar to values indicated by Nobel (1988), and close to values adopted in the temperate zone systems for fruit production (Faust, 1989). Liguori *et al.* (2009), in a 14-year-old ‘Tarocco’ orange orchard, spaced 4.5 x 4.5 m apart, with a fruit yield of 35 t ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup> and a LAI of 3.5, reported an annual dry matter fixation of 11.7 t ha<sup>-1</sup>. A 4-years-old peach orchard (*Prunus persica* L. Batsch “Flordaprince” on GF 677 rootstock), trained to a free standing central leader, 930 trees ha<sup>-1</sup> with a LAI of 5.4, had values of 15.7 t ha<sup>-1</sup> and an HI of 17.2% (Caruso *et al.*, 1999). Kappel (1991) carried out measurements on a 7-years-old ‘Lambert’ sweet cherry plantation (474 trees ha<sup>-1</sup>) on *Prunus avium* seedling rootstock in British Columbia. Annual dry weight fixed was 6.3 t ha<sup>-1</sup> with a LAI of 1.4 and an HI of 15%. Forshey *et al.* (1983) studying an 8-years-old McIntosh/MM106 apple orchard (*Malus domestica* Borkh.) trained to a modified central leader, reported 20.7 t ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup> dry weight fixed and a LAI of 4.1. During the first year, new cladodes completed 71.8% of their growth in terms of planar surface but just 32.4% in terms of dry weight, compared with 2- to 4-years-old cladodes. Trees dry weight was made, for the greatest part (66.2%), by non photosynthetic cladodes and roots (17.4%).

At last, even if the Cactus Pear orchard proved to be efficient for fruit production, dry matter accumulation and its partitioning to fruit component must be enhanced. One way to attempt it could be to decrease the number of non photosynthetic cladodes, limit the size of the trees and optimize light interception.

## **5.2. *Determination of evapotranspiration and crop coefficient in a Cactus Pear orchard under semi-arid conditions.***

Under the semi-arid conditions of the experimental site, the SR method proved to be useful and effective to measure the actual evapotranspiration for a CAM species, such as OFI. Indeed, the technique was able to detect the role of the species to control the available energy partition between different flux densities (H, G, LE). If we consider that measurements of soil water content or plant water status are difficult to apply for irrigation scheduling in succulent species, the relatively low-cost SR method provides an excellent approach to obtain evapotranspiration information which could be used as an effective mean for estimating crop water requirement in cactus pear. Further studies may relate the physiological status of the plant with micrometeorological information. For instance, gas exchange rate or fruit growth rate pattern versus energy balance. Moreover, there is no data on the relationship between fruit growth developmental stages and specific water requirement; Gugliuzza *et al.* (2002) showed that irrigation increases fresh weight and number of export-size fruit, only if coupled with fruit thinning. In any case, growth and ultimate fruit size are affected by water deficit long before any other plant response is apparent; this makes the understanding of irrigation timing, related to fruit quality, very difficult.

Total  $ET_c$  in 2009 and 2010 was 290.3 mm and 285.6 mm respectively. Trees transpiration was 214.8 mm in 2009 and 211.2 mm in 2010. Seasonal crop coefficient was 0.58 both in the former and in the latter year. The amount of water available to the orchard (rain and irrigation), during 2009 and 2010, was, 240 mm and 185 mm, which was 82.7% and 64.8% of  $ET_c$ , with no apparent effect on current year crop yield and quality. Deficit irrigation (DI) has been widely investigated and applied as a sustainable production strategy in semi arid and arid regions for fruit tree crops, such as olive (Moriani *et al.*, 2003), peach (Chalmers *et al.*, 1981; Goodwin *et al.*, 1998) and apple (Lötter *et al.*, 1985; Mpelasoka *et al.*, 2001). A 66% restitution of  $ET_c$  have been successfully applied for olive (Tognetti *et al.*, 2007), and our data may support the

hypothesis of DI application in cactus pear orchard. However, water supply should be optimized in relation to fruit quality and return bloom efficiency.

Ultimately, cactus pear orchards for fruit production couple the ability of using a limited water resource base with the efficiency of the system both in term of water use efficiency and dry matter diverted to the fruit component.

### **5.3. *CO<sub>2</sub> uptake of Cactus Pear whole trees and single cladodes, in relation to plant water status and cladode age***

In this experiment, continuous gas exchange measurements of entire well-watered and droughted trees, proved that *Opuntia ficus-indica* trees continued their photosynthetic activity 60 days after the irrigation was stopped and when soil water content was lower than 2%. At this stage, current-year and 1-year-old cladodes had become flaccid but still the daily net CO<sub>2</sub> uptake of droughted trees kept the same rate than at the beginning of the experiment, while, along with the season, well-watered trees had doubled their net CO<sub>2</sub> uptake, and the current-year cladode surface area was 50% higher in well-watered than in droughted trees. Though, during the drought period, the parenchyma had lost 100%, 67% and 54% fresh weight (fw), respectively in current-year, 1-year and 2-year-old droughted cladodes, the chlorenchyma fw decreased by 45% and 30%, respectively in 1-year- and 2-year-old droughted cladodes and marginally increased in current-year ones (+20%), most likely as a result of water movement from mother to daughter cladodes and inter-tissue water transfer from parenchyma to chlorenchyma (Barcikowski and Nobel, 1984; Nobel, 2006; Pimienta-Barrios *et al.*, 2000). The highest instantaneous rates and total daily net CO<sub>2</sub> uptake for both well-watered and droughted trees occurred in August 2010, 60 days after the onset of the dry period, when maximal instantaneous rates were 11.1 in well-watered and 8.4  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  in droughted trees. Similarly, Pimienta-Barrios *et al.* (2000) measured the highest maximal CO<sub>2</sub> assimilation rates in single cladodes of *Opuntia ficus-indica*, grown in a commercial orchard in Mexico, 60 days after the end of the rainy period, when soil moisture was lower than 10%. Averaged over the six measurements dates, from June to August, total daily net CO<sub>2</sub> uptake was 275.6  $\text{mmol m}^{-2} \text{day}^{-1}$  for well-watered tress and 175.6  $\text{mmol m}^{-2} \text{day}^{-1}$  for droughted trees. Considering a cladode surface area of 12,618  $\text{cm}^2$  for well-watered and 10,572  $\text{cm}^2$  for droughted trees, a daily amount of 4.2.  $\text{g C day}^{-1}$  was accumulated in well-irrigated trees

in that period, while droughted trees had 50% lower values. This value is the result of a lower seasonal assimilation rate and a lower surface area development of current-year cladode.

Few data are available on cladode net CO<sub>2</sub> uptake, according to cladode age. Samish and Ellern (1975) noted that titratable acidity decreased linearly with increasing age, and 1-year-old cladodes had a three times higher level of acidity than in 2-year-old cladodes, located in a basipetal position. Carbon translocation from 2-year-old cladodes to meet the photo-assimilate demand of 1-year-old fruiting cladodes, have been hypothesized (Inglese *et al.*, 1994; De La Barrera and Nobel, 2004), and carbon partitioning between mother and daughter cladodes changes with cladode developmental stages and environmental conditions (shading, water availability) (Luo and Nobel, 1992; Pimienta-Barrios *et al.*, 2005). Our data, taken on sunny exposed, apical 1-year- and 2-year-old cladodes, show that, over seven measurement dates in summer, differences between net CO<sub>2</sub> uptake for 1-year-old and 2-year-old cladodes occurred only twice, corresponding to the highest PPF rates and temperatures. Nevertheless, net CO<sub>2</sub> uptake of 2-year-old cladodes, averaged throughout the season, was 40% lower than for 1-year-old ones. This value could further decrease, considering their natural basipetal position within the tree that reduced PPF availability (Nobel, 1988); seasonal differences of C accumulation, according to cladode age, must be taken into account to set the optimal (LAI) in cactus pear fruit orchards.

In summary, the open system chamber, i.e. balloon, utilized in this experiment, can be successfully applied to measure whole tree or single organ net CO<sub>2</sub> uptake on Cactus Pear particularly to understand the response of the whole trees to environmental stress. In our case, it was possible to demonstrate how, after 60 days of drought, whole Cactus Pear trees were still keeping a same level of net CO<sub>2</sub> uptake, though a substantial water loss in the most photosynthetically active cladodes.

## **6. Conclusion**

The first experiment showed how the high annual productivity in terms of new developing cladodes (about 50% of the total gain over the season) and the low cladodes fertility rate, suggests to prune the trees to promote a canopy renewal, limiting the number of non-photosynthetic cladodes and decreasing trees LAI.

Coupling data relative to the first experiment (annual above ground dry biomass gain in 2009) with the second experiment (orchard and trees  $ET_c$  in 2009), a trees TR and a system WUE were calculated: TR by the trees was  $166.5 \text{ Kg H}_2\text{O Kg}^{-1}$  dry matter. This value become  $225 \text{ Kg H}_2\text{O Kg}^{-1}$  dry matter if we consider also the amount of water evaporated from the soil.

Continuous gas exchange measurements of entire well-watered or droughted trees (third experiment) remarked that water movement between different cladodes or different tissues (Parenchyma and Chlorenchyma) of the same cladode, coupled with the typical CAM behavior, allows trees to perform photosynthesis even after long periods with no water supply and high temperatures. Thus dehydration of the water storage tissue parenchyma occurs long before that chlorenchyma shows severe stress conditions.



# **Parte Generale**

## 1. *Opuntia ficus-indica*: origine della specie e usi

Il ficodindia, *Opuntia ficus-indica* L. (Mill.), è specie originaria degli altopiani messicani, giunta nel bacino del mediterraneo all'inizio del XVI sec. La sua morfologia, il particolare tipo di metabolismo che utilizza e la facile attitudine alla propagazione ne hanno favorito la diffusione in molte delle regioni a clima arido e semiarido, di ogni continente.

La specie appartiene alla famiglia delle *Cactaceae*, contenente circa 122 generi e più di 1600 specie diverse (Nobel, 1988). Il genere *Opuntia*, con più di 160 specie al suo interno, è il più numeroso della famiglia delle *Opuntioideae* (Figura 1).

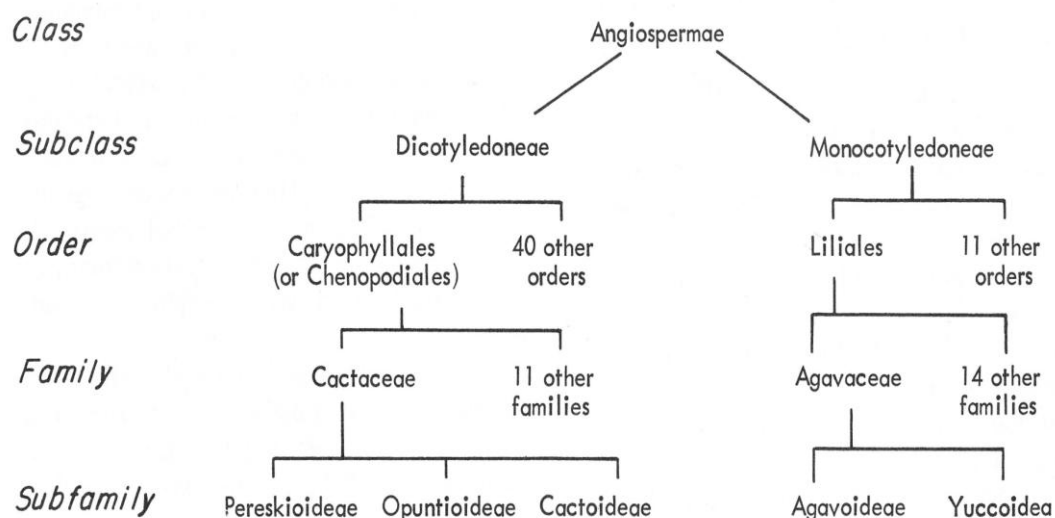


Figura 1. Inquadramento tassonomico relativo alla famiglia delle *Cactaceae*, alla quale *Opuntia ficus-indica* appartiene (Nobel, 88).

La prima descrizione dettagliata della pianta risale al 1535, ad opera dello spagnolo Gonzalo Fernández de Oviedo y Valdés nella sua *Historia general y natural de las Indias*. Linneo, nel suo *Species Plantarum* (1753), descrisse due differenti specie: *Cactus opuntia* e *C. ficus-indica*. Fu Miller, nel 1768, a classificare la specie *Opuntia ficus-indica*.

La specie viene coltivata prevalentemente per la produzione di biomassa ad uso foraggero e per la produzione di frutti. In diverse regioni del mondo, tra le quali molti paesi dell'America centro-meridionale, Texas, Sud Africa e Asia occidentale, i cladodi vengono, infatti, commercialmente utilizzati come foraggio per il bestiame (Mondragon-Jacobo and Pèrez-Gonzales, 2001). I paesi che producono maggiori quantità di frutti sono il Messico, la Sicilia, la Tunisia, l'Algeria, il

Marocco, il Cile, l'Argentina e la California (Inglese *et al.*, 2002) (Figura 2). Con i frutti vengono, inoltre, preparati e commercializzati liquori, conserve e succhi. In Messico soprattutto, ma anche in altri paesi, i giovani cladodi (chiamati *nopalitos*) vengono raccolti e consumati come verdura. Sempre in Messico, così come in altri paesi del Sud America la specie è utilizzata per l'allevamento del *Dactylopius coccus*, una cocciniglia che parassitizza i cladodi, da cui si ricava un pregiato colorante naturale, il carminio (Nobel, 2002). Altri utilizzi possibili sono rappresentati da alcuni prodotti per la cosmetica e per l'industria del benessere (creme, saponi, olii, rossetti) (Saenz, 2006).

In Sicilia il ficodindia viene coltivato (in coltura specializzata) esclusivamente per la produzione di frutti su una superficie complessiva di circa 4000 ettari, con una resa unitaria media di 15 t ha<sup>-1</sup> (Inglese *et al.*, 2010).

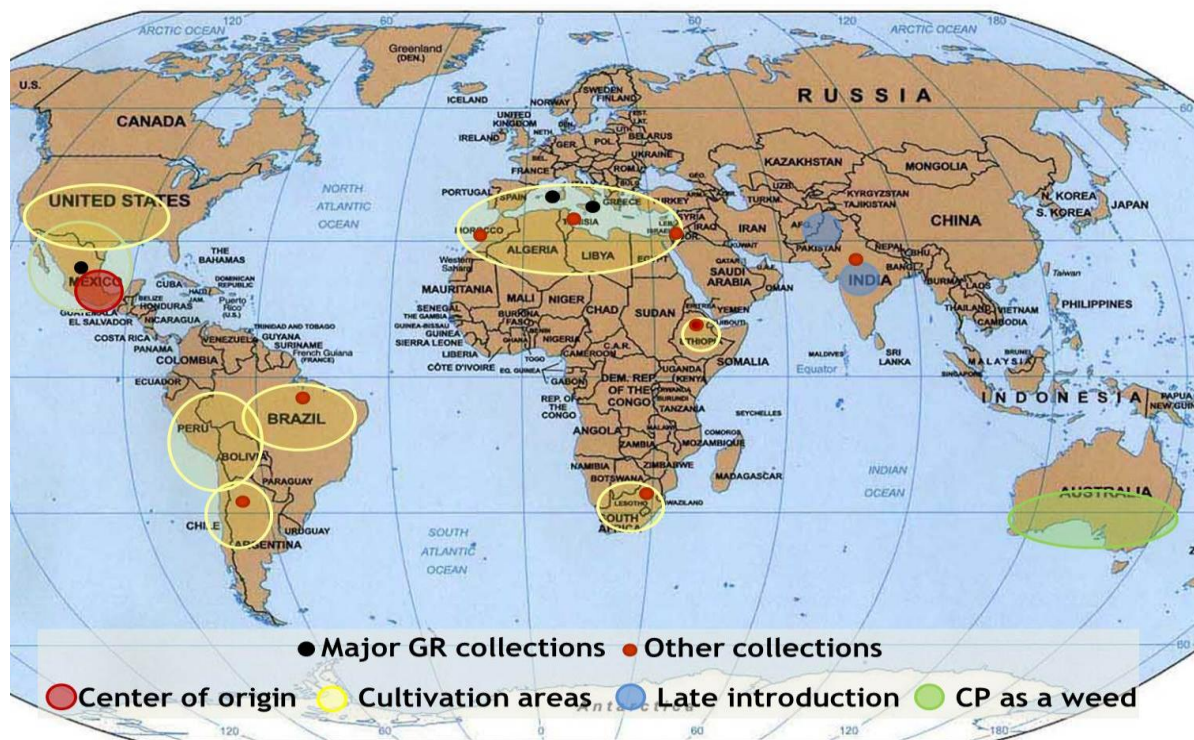


Figura 2. Aree di coltivazione di *Opuntia ficus-indica* nel mondo.

## 2. Cenni sulla morfologia e l'anatomia della specie

Il ficodindia è una pianta perenne, arborea e succulenta, con metabolismo CAM. La struttura epigea è costituita da cladodi, ovvero da steli fotosintetici dello spessore di 0,5 - 3,0 cm a maturità, e di forma ellissoidale.

Le vere foglie hanno una forma conica e sono lunghe appena qualche millimetro, appaiono sui cladodi giovani e sono effimere.

Alla base delle foglie si trovano le areole; sono provviste di un tessuto meristemico che si può differenziare, secondo i casi, in spine e glochidi, oppure in radici avventizie, giovani cladodi o fiori.

L'epidermide riveste i tessuti interni dei cladodi ed è formata da un solo strato di cellule e ricoperta da una cuticola cerosa spessa da 5 a 30  $\mu\text{m}$  che limita fortemente la traspirazione. La frequenza stomatica ha valori bassi (circa 20 - 30 stomi  $\text{mm}^{-2}$ ) (Conde, 1975; Pimenta-Barrios *et al.*, 1992), se paragonata a quella di specie da frutto con metabolismo  $\text{C}_3$  quali *Prunus armeniaca*, con un numero medio di 300 - 500 stomi  $\text{mm}^{-2}$  (Ilgin e Caglar, 2009), *Malus domestica* con 200 - 600 stomi  $\text{mm}^{-2}$  (Slack, 1974), oppure *Olea europaea*, in cui il numero di stomi per  $\text{mm}^2$  è compreso tra 200 e 700 (Gucci, 2006).

Sotto l'epidermide si trova il clorenchima, il tessuto fotosintetico; di colore verde intenso, in funzione dell'età del cladodio, può essere spesso 1 - 5 mm e contenere da 15 a 40 strati di cellule fotosintetiche (Nobel, 1988). I vacuoli delle cellule clorenchimatiche possono occupare più del 90% dell'intero volume cellulare per accumulare gli acidi formati durante la notte.

Il clorenchima circonda un parenchima acquifero formato da cellule elastiche di grandi dimensioni. Il parenchima funge da tessuto nel quale l'acqua e i sali minerali vengono immagazzinati.

I cladodi di età superiore ai 4 - 5 anni, presentano un elevato contenuto di lignina che si accumula gradualmente anno dopo anno, fino a formare un vero e proprio tronco.

I fiori, generalmente ermafroditi, sono a ovario infero e uniloculare. Il pistillo è sormontato da uno stimma multiplo. Gli stami sono molto numerosi. I sepali sono poco vistosi mentre i petali sono ben visibili e di colore giallo.

Il frutto è una bacca carnosa polispermica di 100 - 200 grammi di peso, contenente 100 - 400 semi. Contiene belanine, che ne determinano il colore della polpa, e ha un notevole valore nutrizionale essendo ricco di minerali, soprattutto calcio, potassio e fosforo.

La pianta presenta un apparato radicale molto superficiale; Cannon (1911) notò che la maggior parte delle radici delle Cactaceae si trovano 3 - 15 cm sotto la superficie del suolo; un aspetto molto interessante del sistema radicale delle cactacee è rappresentata dalla capacità di formare rapidamente radici in seguito a piogge o irrigazioni dopo lunghi periodo di siccità. Questo fenomeno fu studiato da Kaush (1965) il quale notò che nelle 24 ore successive alla bagnatura del terreno asciutto si aveva la formazione di radici avventizie.

### 3. Il metabolismo acido delle Crassulaceae l'efficienza d'uso dell'acqua

Il metabolismo acido delle *Crassulaceae* o CAM è una delle tre vie metaboliche esistenti tra le piante superiori. Le specie che lo utilizzano sono il 6 - 7% delle circa 250000 piante superiori classificate (Ting, 1985; Winter, 1985). La maggior parte di queste, il 92 - 93%, hanno un metabolismo di tipo C<sub>3</sub>, e solo l'1% sono C<sub>4</sub>.

Il ciclo CAM (Black e Osmond, 2003) è distinto da due tappe fondamentali, (Figura 3) riassumibili in:

- a) apertura degli stomi durante le ore notturne e fissazione della CO<sub>2</sub> atmosferica attraverso l'enzima Fosfoenolpiruvato-carbossilasi (PEPC) in acido ossalacetico, trasformato in seguito in acido malico e trasportato attivamente dal citosol ai vacuoli. Tale processo determina un sensibile abbassamento del pH;
- b) rimobilitazione diurna degli acidi dai vacuoli al citosol dove vengono scissi in acido piruvico e CO<sub>2</sub> che nei cloroplasti seguono il Ciclo di Calvin; rifissazione della CO<sub>2</sub> da parte del Ribulosio-1,5-bifosfato carbossilasi/ossigenasi (Rubisco) con sintesi di amido o altri glucani. Durante il giorno gli stomi sono chiusi e il pH aumenta.

Uno dei primi studiosi a effettuare delle osservazioni sull'accumulo notturno di acidità fu Nicolas Thèodore de Saussure, nel 1804, che su piante di *Opuntia*, dedusse che l'accumulo di CO<sub>2</sub> potesse avvenire durante le ore notturne. Già nel 1815 Benjamin Heyne sosteneva che durante la notte grandi quantità di acidi organici si accumulassero nelle foglie succulente di una pianta crassulacea, la *Kalanchoë pinnata*. Heyne non effettuò alcun esperimento scientifico, si limitò a mordere la pianta in tempi diversi, notando che la mattina le foglie avevano un gusto molto acido; durante il giorno l'acidità diminuiva per poi ritornare nuovamente alta la mattina seguente (Nobel, 1988). Herbert M. Richards (1915), professore di botanica alla Columbia University, pubblicò una ricerca riguardante le variazioni del contenuto acidico nei tessuti di *Opuntia versicolor* durante il giorno e la notte. Negli anni 50 l'utilizzo degli analizzatori di gas a infrarossi (IRGA) cominciò ad essere applicato sulle CAM rivelando il ruolo critico degli stomi e del ritmo stomatico nelle *Crassulaceae* (Black e Osmond, 2003). Gregory *et al.* (1954) pubblicarono una ricerca (che ebbe anche un seguito in Spear and Thimann, 1954) su *Kalanchoe blossfeldiana* nella quale misurarono i tassi notturni di accumulo della CO<sub>2</sub> associandoli erroneamente ad un effetto dello stimolo di induzione a fiore della pianta. La prima review sulle

piante CAM fu effettuata nel 1960 (Wolf, 1960). Nishida (1963) per la prima volta pubblicò una ricerca dove veniva mostrato un “ritmo stomatico giornaliero invertito” con conseguente risparmio idrico. Nel 1967, Brandon, effettuando studi *in vitro* sugli enzimi catalizzatori caratteristici delle piante *Crassulaceae*, riportò *optimum* di temperatura della PEPC e della Malato-deidrogenasi di circa 35°C; gli enzimi decarbossilativi avevano *optimum* ancora più elevati: circa 53°C. Più tardi, Buchanan-Bollig *et al.* (1984), evidenziarono invece come temperature al di sotto dei 20°C favorissero gli enzimi carbossilativi, mentre alte temperature favorissero gli enzimi della decarbossilazione. Successivamente, negli anni 80 e 90, molte ricerche vennero condotte sull’accumulo notturno di acidi e sugli scambi di CO<sub>2</sub> grazie anche allo sviluppo e alla diffusione degli IRGA portatili.

Sebbene l’assorbimento di anidride carbonica avvenga, in generale, durante la notte, l’apertura degli stomi può anche avvenire durante le ore del giorno in determinate condizioni ambientali, ad esempio nel periodo di tempo che intercorre tra la fine della notte e l’inizio del giorno, quando i flussi radiativi e di calore sensibile sono di bassa intensità. Il medesimo fenomeno succede alla fine della giornata (Ting, 1985; Nobel, 1988).

Alcune specie CAM, in condizioni di stress idrico, hanno inoltre la facoltà di mantenere gli stomi chiusi non solo durante il giorno ma anche di notte, e di usare per la fotosintesi solamente la CO<sub>2</sub> endogena rilasciata attraverso la respirazione cellulare notturna (Ting, 1985, Griffiths *et al.*, 1989). Altre specie, viceversa, mantengono gli stomi chiusi durante la notte, con riciclo dell’anidride carbonica respirata, e li aprono durante alcune ore del giorno (Sipes e Ting, 1985). I due fenomeni appena descritti possono verificarsi nella stessa pianta in momenti diversi, come ad esempio avviene nell’epifita *Codonanthe crassifolia* (Guralnick *et al.*, 1986), appartenente alla famiglia delle *Gesneriaceae*.

Le piante CAM sono generalmente, spesso correttamente, considerate a lenta crescita. In effetti, gli ambienti nei quali esse vivono sono spesso ostili e non agevolano di certo produttività elevate. *O. ficus-indica*, al contrario, può raggiungere, in determinate condizioni, produzioni di sostanza secca molto alte, fino a 50 t ha<sup>-1</sup> (Nobel, 1991).

Grazie al fatto che durante le ore notturne le temperature sono inferiori rispetto quelle del giorno, e l’umidità relativa è generalmente più elevata, la traspirazione delle CAM è da tre a cinque volte più bassa di quella delle piante aventi diverse vie metaboliche (Nobel, 1988). Inoltre, a stomi

aperti, la superficie stomatica è, nelle *Crassulaceae*, lo 0,5% circa di quella fotosintetica, ovvero da due a tre volte minore che nelle piante C<sub>3</sub> e C<sub>4</sub> (Nobel, 1988; Pimienta-Barrios *et al.*, 1992).

L'efficienza d'uso dell'acqua (WUE), definita come il rapporto tra la sostanza organica prodotta (o la CO<sub>2</sub> assorbita) e l'acqua traspirata nell'unità di tempo e di superficie (Stewart e Steiner, 1990, Nobel, 2009), è un parametro di grandissima importanza biologica e agronomica. Il reciproco della WUE, ovvero la quantità d'acqua traspirata sulla CO<sub>2</sub> assorbita o fissata, si definisce tasso di traspirazione (TR). WUE e TR rappresentano il “costo” della produzione per una pianta, essendo l'acqua, nella maggior parte dei casi, il fattore limitante che incide maggiormente sulle produzioni.

In condizioni di carenza idrica le piante tendono a chiudere gli stomi per risparmiare acqua; in dipendenza del grado di chiusura stomatica anche la CO<sub>2</sub> diventa un fattore limitante e la fotosintesi decresce. Inoltre la traspirazione è fondamentale perchè regola il trasporto di acqua e nutrienti all'interno dei vasi xilematici e abbassa la temperatura degli organi fotosintetici (Nobel, 1988). Molte piante erbacee e arboree, per la verità, mostrano valori di WUE più elevati (ovvero sono più efficienti) se sottoposte a moderato stress idrico di quanto non avvenga con illimitate disponibilità idriche (Blum, 2005). Nei programmi di miglioramento genetico, uno dei maggiori obiettivi consiste proprio nell'aumentare la WUE delle piante agrarie. L'impellente bisogno di raggiungere risultati importanti in questi termini viene dettato dal dato secondo il quale circa l'80% delle risorse idriche oggi utilizzate sono ad uso agricolo (Hamdy *et al.*, 2003). Livelli del genere non saranno ancora a lungo sostenibili se si considerano previsioni di un aumento della popolazione di due miliardi di persone entro i prossimi 30 - 40 anni. L'efficienza d'uso dell'acqua di una specie viene determinata dal rapporto tra il suo potenziale produttivo e la resistenza alla siccità (Blum, 2005). Fino ad oggi, le variazioni genotipiche attuate nei programmi di miglioramento genetico delle piante agrarie hanno inciso in maniera maggiore sull'utilizzo dell'acqua e l'adattamento allo stress idrico di quanto non abbiano fatto per i potenziali produttivi (Blum, 2005). In questi termini la sfida consiste nel riuscire ad aumentare la produttività senza far aumentare anche i consumi idrici delle specie agrarie.

Downes (1969) ha raggruppato una serie di dati riguardanti studi sulla WUE di piante in contenitore e calcolato valori medi per le piante C<sub>3</sub> e C<sub>4</sub> rispettivamente di 1,5 mg sostanza secca (s.s.) g<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>O e 3,3 mg s.s. g<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>O. Una WUE pari a 1,4 mg s.s. g<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>O è stata calcolata su *Atriplex canescens*, una pianta arbustiva che cresce in zone desertiche con metabolismo C<sub>4</sub> e



messa a confronto con valori di piante C<sub>3</sub> (desertiche) aventi una efficienza d'uso dell'acqua media di 0,7 mg s.s. g<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>O (Dwyer e De Garmo, 1970). Studi comparativi tra sorgo (C<sub>4</sub>) e soia (C<sub>3</sub>) hanno evidenziato come la prima specie avesse una WUE tre volte maggiori (con picchi di 7 mg s.s. g<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>O) della seconda (Teare *et al.*, 1973). Black (1973) ha riportato valori medi di TR di circa 50 - 125 Kg H<sub>2</sub>O Kg<sup>-1</sup> s.s. nelle piante CAM, 250 - 350 Kg H<sub>2</sub>O Kg<sup>-1</sup> s.s. nelle C<sub>4</sub> e 450 - 950 Kg H<sub>2</sub>O Kg<sup>-1</sup> s.s. nelle C<sub>3</sub>. Tra le specie CAM, Joshi *et al.* (1965), in una piantagione di *Ananas comosus* coltivata in serra, hanno calcolato una TR pari a 50 Kg H<sub>2</sub>O Kg<sup>-1</sup> s.s., mentre Neales *et al.* (1968) hanno misurato valori di 154 mg H<sub>2</sub>O mg<sup>-1</sup> s.s. su *Aeonium hawarthii*, 47 mg H<sub>2</sub>O mg<sup>-1</sup> s.s. su *Agave americana* e 116 mg H<sub>2</sub>O mg<sup>-1</sup> s.s. su *Ananas comosus*. Nobel (1977), nel deserto del Colorado, su *Ferocactus acanthodes*, ha riportato valori di TR di 105 mg H<sub>2</sub>O mg<sup>-1</sup> s.s. durante i mesi caldi e di 18 - 24 mg H<sub>2</sub>O mg<sup>-1</sup> s.s. durante la stagione fredda. Han e Felkler (2005) hanno misurato, in un impianto sperimentale di *Opuntia ellisiana* al quarto anno dall'impianto, una TR di 162 Kg H<sub>2</sub>O Kg<sup>-1</sup> s.s.

In *O. ficus-indica* Nobel (1988) riporta valori di WUE compresi tra 0,0059 e 0,0131 mol CO<sub>2</sub> mol<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>O. Silva e Acevedo (1995) hanno calcolato valori stagionali di WUE pari a 0,054 g di sostanza secca prodotta per g di acqua traspirata.

Le piante che meglio si adattano ad ambienti aridi e semiaridi sono quindi quelle che hanno saputo mettere in atto strategie di adattamento allo stress idrico, termico o salino. Ciò detto, non stupisce che moltissime specie CAM prosperino in ambienti estremi dove la maggior parte delle piante non potrebbero sopravvivere. Inoltre la grandissima parte delle specie *Crassulaceae* sono piante succulente, possiedono cioè un parenchima capace di trattenere elevate quantità di acqua al proprio interno. Tra queste le più rappresentative sono le piante appartenenti alla famiglia delle *Cactaceae*.

Va, infine, sottolineato come i meccanismi di adattamento all'aridità non necessariamente siano altrettanto validi in relazione alle alte temperature. *Opuntia ficus-indica*, in particolare, è originaria delle *mesas* messicane, dove la stagione arida coincide con l'inverno freddo, mentre la stagione calda, durante la quale si sviluppano i frutti e avvengono il germogliamento e l'accrescimento vegetativo, è fortemente umida e piovosa. Esattamente il contrario di quanto avviene negli areali mediterranei, dove la stagione di deficit idrico, 3 - 4 mesi, è anche quella più calda, durante la quale si sviluppano i frutti e la nuova vegetazione (Inglese *et al.*, 2002).

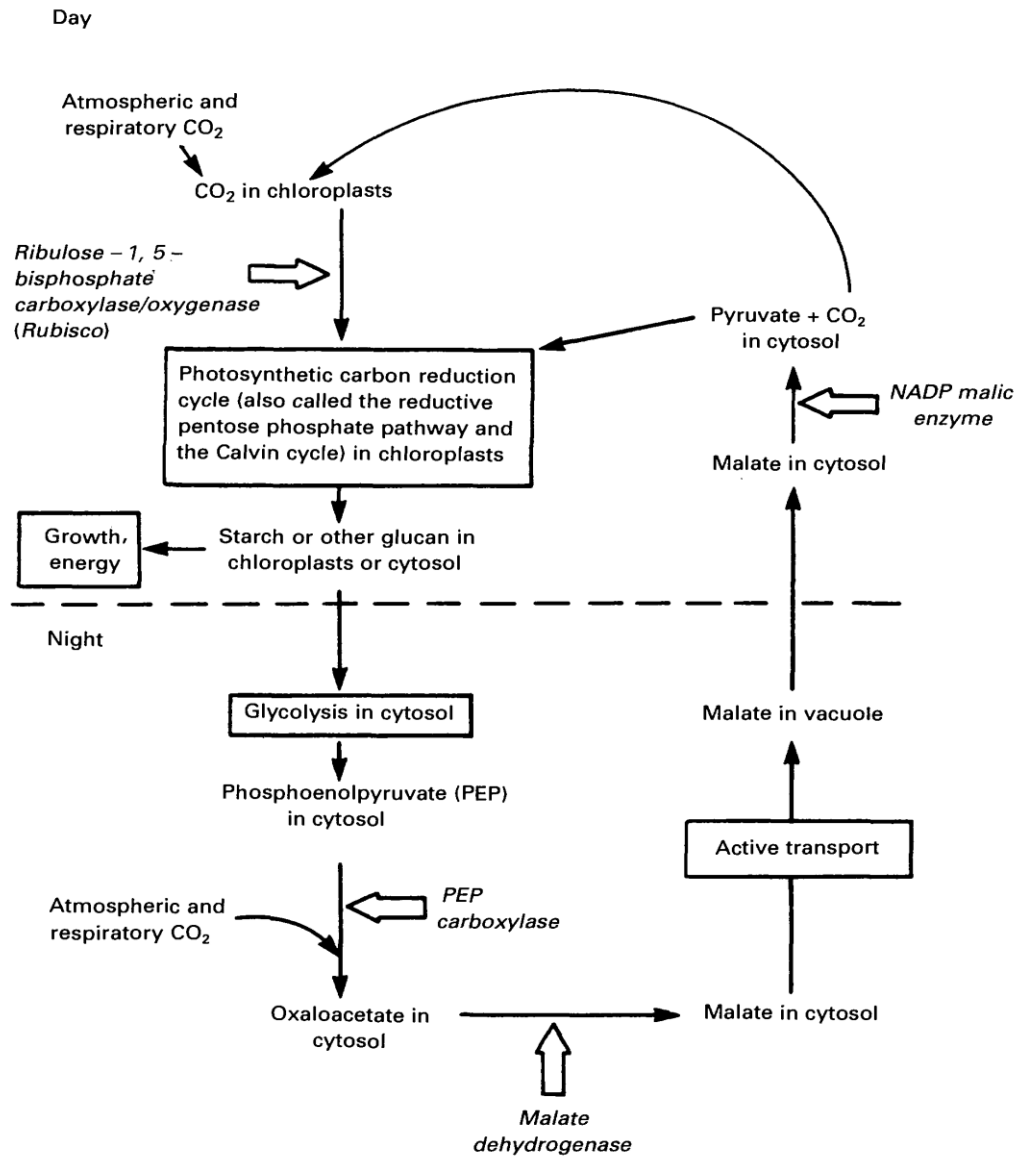


Figura 3. Schematizzazione degli eventi biochimici fondamentali nel ciclo delle piante CAM (Nobel, 1988).

## 4. Assorbimento di CO<sub>2</sub> e produttività di *Opuntia ficus-indica* in relazione ai parametri ambientali

La produttività di una pianta di *Opuntia ficus-indica*, in quanto condizionata dalle variabili ambientali, può essere considerata il frutto della sua interazione con il potenziale d'acqua nel suolo e l'evoluzione del regime termico e radiativo. Tali variabili ambientali influenzano i tassi di assorbimento della CO<sub>2</sub> e quindi l'accumulo di carbonio (Nobel, 1988; García de Cortazar e Nobel, 1990). Accanto a questi fattori di tipo ambientale, ve ne sono poi altri, ovvero quelli di tipo agronomico, capaci di modificare le interazioni tra le piante e le variabili ambientali (Felker e Inglese, 2002). Ad esempio la densità d'impianto e le forme di allevamento incidono sui rapporti di competizione tra le piante per l'acqua e i nutrienti del suolo come anche per l'intercettazione e l'utilizzazione della luce all'interno della superficie fotosintetica (Inglese *et al.*, 1995).

### 4.1. Gli scambi gassosi

Le misure degli scambi gassosi in OFI sono incominciate nei primi anni 80, quando Nobel e Hartsock (1983) misurarono l'assorbimento di CO<sub>2</sub> di singoli cladodi allevati in camere di crescita. In seguito, l'utilizzo di IRGA portatili con le camere fogliari (cuvette) adattate alla morfologia dei cladodi, consentì di effettuare misure istantanee ad intervalli prestabiliti (2 - 4 ore) su piccole porzioni di pianta (Nobel, 1988). Tali misure, inoltre, furono effettuate con parametri ambientali controllati al fine di definire la risposta dei cladodi in termini di potenziali di scambio di anidride carbonica e acqua al variare di intensità luminosa, temperatura, disponibilità idrica, e concentrazioni di CO<sub>2</sub> (Nobel e Hartsock, 1983, 1984; Nobel, 1988, 2002). In condizioni ottimali di disponibilità idrica, temperatura e luce, l'accumulo di CO<sub>2</sub> in piante di *Opuntia ficus-indica* può raggiungere valori massimi di 618 mmol m<sup>-2</sup> giorno<sup>-1</sup> (Pimienta-Barrios *et al.*, 2005). Nobel e Hartsock (1984) calcolarono valori massimi giornalieri di cladodi allevati in camere di crescita di 344 mmol m<sup>-2</sup> giorno<sup>-1</sup>.

I più alti tassi istantanei di assimilazione notturna di CO<sub>2</sub> pari a 15 - 25 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> sono stati misurati in cladodi di un anno (Inglese *et al.*, 1994; Nobel, 1988; Pimienta Barrios *et al.*, 2005), mentre pochi sono i dati relativi a cladodi di 2 o più anni di età. In ogni caso le piante di OFI, tra tutte le specie appartenenti al genere *Platyopuntia*, hanno mostrato di avere i più alti tassi di

accumulo di carbonio (Nobel, 1988). In realtà i tassi istantanei di accumulo della CO<sub>2</sub> non sono così importanti nel predire la produttività delle piante come lo sono quelli giornalieri; inoltre non è sempre facile metterli in relazione con i fattori ambientali (García de Cortazar *et al.*, 1985; García de Cortazar e Nobel, 1990). Ad esempio nelle CAM la CO<sub>2</sub> viene assorbita durante la notte, quando il PAR è zero (García de Cortazar e Nobel, 1990).

#### **4.1.1. Il ruolo della temperatura**

L'assorbimento notturno di CO<sub>2</sub> in *Opuntia ficus-indica* è massimo a temperature comprese tra 10°C e 20°C (Nobel e Hartsock, 1984; Nobel, 1988). Temperature troppo alte o troppo basse influenzano negativamente l'accumulo di anidride carbonica: con 35/25°C si assiste ad un decremento nell'assorbimento di CO<sub>2</sub> pari al 60%, mentre, con valori di 44/34°C, l'accumulo è uguale a zero (Nobel, 1988). Temperature di 1/5°C causano decrementi del 18% rispetto ai livelli massimi di assorbimento, e minime comprese tra -5°C e -15°C comportano lesioni al livello cellulare che, se prolungate, portano alla necrosi dei tessuti e alla morte della pianta (Nobel, 1988). Comunque i valori più alti di accumulo di anidride carbonica nel corso delle 24 ore, si verificano con temperature notturne piuttosto basse: 11 - 12°C (Nobel e Hartsock, 1984). Le temperature del giorno sono meno importanti in OFI così come in molte altre specie CAM (García de Cortazar e Nobel, 1990).

#### **4.1.2. Il ruolo della disponibilità di energia radiante**

*O. ficus-indica* si avvantaggia di elevate densità di flusso fotonico fotosintetico (PPF). L'accumulo di CO<sub>2</sub>, diventa positivo con densità di flusso di 3 mol m<sup>-2</sup> giorno<sup>-1</sup> (punto di compensazione) mentre con 12 mol m<sup>-2</sup> giorno<sup>-1</sup> risulta circa il 50% di quello ottimale. Con valori di 30 mol m<sup>-2</sup> giorno<sup>-1</sup> si raggiunge il punto di saturazione, ovvero l'assorbimento di carbonio diventa massimo e un ulteriore aumento di PPF, non comporta nessun incremento significativo (Nobel e Hartsock, 1983; Nobel, 1988, 1990, 2002). I cladodi esposti in posizione terminale possono raggiungere tassi di assorbimento dell'anidride carbonica 2,5 volte maggiori rispetto ai cladodi di 2 o 3 anni (meno efficienti) in posizione sub-terminale riceventi una quota del PPF pari al 65% (García de Cortazar e Nobel, 1986; Nobel, 1988). In uno studio sull'accumulo notturno di acidità in cladodi di diversa età ed esposizione, Samish and Ellern (1975) hanno evidenziato come i cladodi di 2 anni accumulassero mediamente il 60% in meno

rispetto quelli di 1 anno, mentre quelli di 5 anni avessero valori di accumulo di  $H^+$  nei succhi cellulari pari al 20% dei cladodi di 1 anno. La quantità di luce disponibile non è solo funzione della disposizione dei cladodi sulla pianta ma anche della densità di impianto. Studi sull'intercettazione della luce in impianti di OFI con vari indici di superficie fogliare hanno determinato valori ottimali di LAI di circa 4 (García de Cortazar *et al.*, 1985; García de Cortazar e Nobel, 1986). Aumentando il valore di LAI la densità delle piante aumenta senza nessun aumento significativo della produttività (García de Cortazar e Nobel, 1986).

#### ***4.1.3. Il ruolo della disponibilità idrica***

La risposta delle piante succulente a periodi di carenza idrica avviene più lentamente che nelle piante  $C_3$  e  $C_4$  a causa dei tessuti parenchimatici che conservano l'acqua per poi ridistribuirli ai tessuti fotosintetici (Nobel, 1988).

La disponibilità d'acqua gioca un ruolo fondamentale nei livelli di assimilazione della  $CO_2$ . Nobel and Hartsock (1984) hanno mostrato come 17 giorni di siccità possano causare un decremento del 50% nei tassi di accumulo di carbonio fino ad arrivare a livelli prossimi allo zero dopo 50 giorni. Goldstein *et al.* (1991) mostrarono inoltre come, dopo 3 mesi di siccità, il tasso di traspirazione dei cladodi di ficodindia fosse pari a  $0,1 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  e l'incremento notturno di acidità di  $97 \text{ mmol H}^+ \text{ m}^{-2}$ , e come, l'incremento di acidi di piante irrigate, invece, fosse di  $362 \text{ mmol H}^+ \text{ m}^{-2}$  con valori di traspirazione di  $1,1 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . Un accumulo di acidi nei tessuti clorenchimatici pari al 40% di quello massimo è stato calcolato da Acevedo *et al.* (1983) durante periodi prolungati di carenza idrica, con tassi di assorbimento dell'anidride carbonica uguali a zero nell'arco delle 24 ore. Un aumento dell'acidità nei succhi cellulari si verifica sempre anche in piante che non mostrano tassi di accumulo della  $CO_2$ : ciò avviene a causa del riciclo della  $CO_2$  endogena, come dimostrato su *Opuntia basilaris* da Szarek *et al.* (1973). Come già sottolineato, durante i periodi secchi, avviene un trasferimento di acqua dai tessuti parenchimatici verso quelli fotosintetici dei cladodi. Goldstein *et al.* (1991), lavorando sempre con singoli cladodi allevati in camere di crescita, dimostrarono che tre mesi di carenza idrica causano una diminuzione del peso fresco del parenchima pari al 61%, mentre il clorenchima perde solamente il 27% d'acqua. La risposta dei cladodi di 1 anno in condizioni di siccità dipende inoltre dal numero e dall'età dei giovani cladodi che essi portano. I cladodi di 1 - 3 settimane si comportano infatti come *sinks* di acqua e nutrienti, a spese, quindi, dei cladodi di 1 anno che li portano. Già dalla quarta settimana,

però questi diventano capaci di svolgere fotosintesi. Così, l'accumulo di carbonio in cladodi di 1 anno portanti cladodi nelle prime fasi di sviluppo, in condizioni di stress idrico, risulta inversamente proporzionale al numero di giovani cladodi che da essi si sviluppano (Pimienta-Barrios *et al.*, 2005). Nerd *et al.* (1989), riferiscono che nel deserto del Negev, caratterizzato da precipitazioni annuali non superiori ai 300 mm, l'irrigazione è fondamentale per garantire una regolare fertilità delle piante. E' noto inoltre che un volume irriguo di 60 - 100 mm durante la stagione secca, coincidente con il periodo di sviluppo del frutto, è necessario per ottenere frutti di buona qualità con un contenuto di polpa del 55% - 65% (Barbera, 1984; Gugliuzza *et al.*, 2002). In ogni caso, condizioni di carenza idrica determinano effetti negativi sulla qualità dei frutti prima che la pianta mostri qualsiasi segno visibile di stress (Gugliuzza *et al.*, 2002).

#### ***4.1.4. La concentrazione della CO<sub>2</sub> atmosferica***

Un aumento della concentrazione di anidride carbonica atmosferica di due volte, comporta, dopo otto settimane, un incremento del tasso netto di assorbimento della CO<sub>2</sub> pari al 49% (Cui *et al.*, 1993), e ciò porta ad un corrispondente incremento nella produzione di biomassa. In particolare, Nobel e García de Cortazar (1991) hanno rilevato incrementi del 23% della sostanza secca nei cladodi dell'anno dopo sei mesi di crescita con livelli di CO<sub>2</sub> doppi rispetto a quelli attuali. L'assimilazione giornaliera netta di CO<sub>2</sub>, in piante di OFI cresciute per 13 mesi in camere di crescita a concentrazioni doppie di CO<sub>2</sub>, è del 35% più elevate che in condizioni normali, mentre l'accumulo di biomassa secca è del 40% più elevato alla concentrazione atmosferica di 720 piuttosto che 370  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ; nello stesso tempo aumenta anche il rapporto radici/chioma (Nobel e Israel, 1994).

#### ***4.2. Gli indici di produttività ambientale e l'accumulo di biomassa epigea***

In OFI, così come per altre specie CAM, Nobel e Hartsock (1986) hanno elaborato degli indici ambientali, ovvero un indice PAR, un indice di temperatura e un indice di disponibilità d'acqua, con lo scopo di formulare un indice di produzione ambientale (EPI) che racchiudendoli potesse fornire informazioni previsionali sui potenziali di crescita della specie nelle varie regioni e fasce climatiche di coltivazione:

$$\text{EPI} = \text{water index} * \text{temperature index} * \text{PPF index}$$

(Nobel e Hartsock, 1986; Nobel, 1988). La produttività della specie usando l'EPI è stata calcolata da García de Cortazar e Nobel (1990) nelle varie fasce climatiche comprese tra l'equatore e il 60° parallelo terrestre assumendo un valore di accumulo massimo della CO<sub>2</sub> pari a 344 mmol m<sup>-2</sup> giorno<sup>-1</sup>, 27 g di biomassa secca accumulata per mole di CO<sub>2</sub> assorbita (Salisbury e Ross, 1985) e LAI di 4. In zone come sud degli Stati Uniti, Messico nord e Sud Africa sono state calcolate produzioni annuali di 15 – 25 t ha<sup>-1</sup> con valori massimi di 30 t ha<sup>-1</sup> in Cile. Tuttavia, è importante sottolineare come misure puntuali riguardanti l'accumulo di anidride carbonica di singoli cladodi, allevati in contenitore, in ambiente controllato, abbiano mostrato potenziali fotosintetici sensibilmente minori rispetto a cladodi della stessa età, portati da piante allevate in pieno campo (344 mmol m<sup>-2</sup> giorno<sup>-1</sup> contro 618 mmol m<sup>-2</sup> giorno<sup>-1</sup>) (Nobel e Hartsock, 1984; Pimienta-Barrios *et al.*, 2000). Così, è difficile prevedere la risposta ai fattori ambientali se le misure effettuate, lavorando su singoli cladodi, devono essere riportate a livello di intere piante. Infatti, produzioni annuali di sostanza secca considerevolmente più elevate di quelle previste con gli EPI sono state riportate in giovani impianti in Cile e Messico: 47 e 45 t ha<sup>-1</sup> rispettivamente (Nobel, 1991, 1992). Ancora, García de Cortazar e Nobel (1992), hanno svolto studi su impianti con produzioni perfino maggiori: 49,8 t ha<sup>-1</sup> anno<sup>-1</sup> di sostanza secca in un impianto di 3 anni con una densità di 240000 piante per ettaro. Tuttavia, in letteratura, sono anche stati riportati valori considerevolmente inferiori sull'accumulo di biomassa: Acevedo *et al.* (1983), in Cile, in un impianto di 5 anni e 4 mesi, hanno misurato produzioni di biomassa secca di 10 t ha<sup>-1</sup> anno<sup>-1</sup> e di 3 t ha<sup>-1</sup> anno<sup>-1</sup> rispettivamente in cladodi e frutti; infine, su *Opuntia ellisiana*, Han e Felker (1997), lavorando in un impianto sperimentale di 3 anni, con un LAI di 4, hanno raggiunto valori di produzione annuale di biomassa secca di 17,6 t ha<sup>-1</sup>.

## 5. Domande aperte alle quali la tesi vuole rispondere

Nelle piante arboree, la ripartizione dei carboidrati nei vari organi della pianta dipende da fattori genetici (De Jong e Doyle, 1984), dall'età delle piante (Chalmers e Van den Ende, 1975), dalla densità d'impianto e dalla forma di allevamento (Chalmers e Van Den Ende, 1975; Caruso *et al.*, 1999), dal carico produttivo (Miller e Walsh, 1988) e dal portinnesto (Caruso *et al.*, 1995, 1997). La distribuzione dei fotoassimilati e della produttività primaria netta che deriva dalla fotosintesi è definita dalle competizioni interne al sistema pianta ed è un parametro chiave per definire l'efficienza produttiva di una specie. La ripartizione dei fotoassimilati è, infatti, condizionata dalla forza di richiamo degli organi di crescita (sink), nei confronti degli organi di produzione (source). Ad esempio, l'accrescimento limitato dei singoli organi della pianta può avvenire o a causa di una scarsa disponibilità di assimilati (source limitation) o da una bassa efficienza nella loro utilizzazione (sink limitation) (Wareing e Patrick, 1975). La forza di un sink è definita, in genere, dalla sua massa, in termini di sostanza secca, e dal suo tasso di crescita. Inoltre i sink possono essere di tipo meristemato, di distensione (cellulare) oppure di stoccaggio (Gifford e Evans, 1981). E' quindi un quadro necessariamente dinamico, nell'arco stagionale e in quello di vita di una pianta, quello della reciproca forza di attrazione dei diversi sink del 'sistema pianta'. Nell'ambito di una determinata varietà, la produttività della pianta dipende quindi dal suo indice di area fogliare (LAI), dall'efficienza fotosintetica, ma anche dalla capacità di distribuzione dei fotosintetati verso gli organi economicamente utili (Inglese e De Salvador, 1996). Parametri come l'Harvest Index (HI), definito come la quota di sostanza secca investita nella fruttificazione rispetto a quella complessivamente prodotta, sono di grande importanza nella valutazione della capacità produttiva di singole piante o di interi sistemi frutticoli, proprio perchè identifica la capacità della pianta di distribuire le sue risorse verso gli organi economicamente utili.

Per quanto riguarda il ficodindia, Inglese *et al.* (1999) hanno svolto uno studio su ripartizione, allocazione di risorse e modelli di crescita di cladodi e frutti nei due flussi di vegetazione (primaverile ed estivo) della coltura, evidenziando una competizione tra cladodi dell'anno e frutti in entrambi i flussi, seppure con differenti tassi di crescita e durata del periodo di sviluppo. Tuttavia non esistono ancora studi o dati, capaci di descrivere, come largamente fatto in molte specie arboree, l'efficienza sia del singolo albero, sia del sistema frutteto, in termini di allocazione delle risorse, rapporti funzionali tra superficie fotosintetica e biomassa prodotta,



dinamica degli investimenti della pianta tra un anno e il successivo. Si sa, ad esempio, che OFI tende all'alternanza di produzione, ma non sono affatto chiare le ragioni (Inglese *et al.*, 1995). E' poi, largamente variabile la produttività del frutteto (Felker e Inglese, 2002), anche in dipendenza del disegno dell'arboreto e dell'architettura della pianta, la cui demografia produttiva è soltanto in parte nota.

Il ciclo riproduttivo di questa specie avviene durante la stagione estiva, caratterizzata, in ambienti di tipo mediterraneo, da periodi caldi e secchi che possono perdurare perfino tre o quattro mesi. Nonostante la pratica dell'irrigazione della coltura sia adottata con successo in tutte le aree di produzione (Barbera, 1984; Gugliuzza *et al.*, 2002; Nerd *et al.*, 1989; Van der Merwe *et al.*, 1996), importanti parametri come i volumi irrigui da somministrare e le frequenze di adacquamento vengono ancora oggi definiti esclusivamente su basi empiriche, piuttosto che scientifiche.

Inoltre per stimare i tassi di accumulo istantanei di cladodi attraverso misure puntuali effettuate con un IRGA, l'accumulo di CO<sub>2</sub> della superficie misurata deve essere moltiplicato per la superficie dell'intero cladodio, supponendo che, misure di questo tipo, effettuate su piccole porzioni, siano valide per l'intera superficie (Nobel, 1988). Nel caso di piante intere, essendo queste composte da cladodi di diversa età, esposizione alla luce ed efficienza fotosintetica (Samish e Ellern, 1975), l'accuratezza della stima è proporzionale all'età e quindi alla complessità delle piante stesse. Nonostante le ricerche effettuate su svariati aspetti della biologia ambientale di OFI, non ci sono stati, fino ad oggi, lavori riguardanti misure in continuo di scambi gassosi di piante intere o porzioni di piante (costituite da cladodi di età diverse) in condizioni di campo e quindi soggette ai tipici fattori di stress delle regioni con clima semiarido (quali alte temperature e periodi di siccità), dove il ficodindia è maggiormente coltivato. Dati di questo tipo possono essere di grande utilità nella comprensione dei meccanismi di interazione tra piante intere o porzioni di queste e fattori ambientali. Per questo genere di informazioni, misure continue effettuate a livello di pianta, attraverso sistemi aperti costituiti da palloni di polietilene (Alterio *et al.*, 2006; Corelli Grappadelli e Magnanini, 1997; Mattii e Orlandini, 2005), sono già state condotte su specie da frutto come melo (Corelli-Grappadelli e Magnanini, 1993; Giuliani *et al.*, 1997) e vite (Miller *et al.*, 1996; Alterio *et al.*, 2007).

Quanta biomassa (frutti e complessiva) per unità di superficie produce OFI, allevata in frutteto? Quanta biomassa 'frutto' per unità di superficie fotosintetizzante? Qual'è l'evapotraspirazione

effettiva di impianti del genere e che valori si raggiungono in termini di efficienza d'uso dell'acqua? Qual'è il coefficiente colturale in impianti del genere? Quali valori, in termini di accumulo istantaneo, giornaliero o stagionale di CO<sub>2</sub> raggiungono piante intere di OFI con elevata disponibilità d'acqua e in stress idrico? Quali sono le potenzialità di assorbimento della CO<sub>2</sub> di cladodi di 1 e 2 anni ricevuti le stesse densità di flusso fotosintetico? Queste sono solo alcune delle domande ancora aperte e alle quali questa tesi vuole incominciare a fornire un utile contributo di conoscenza.

# **Parte Sperimentale**



**Accumulo e Ripartizione della Sostanza Secca e Indici  
di Area Fogliare in *Opuntia ficus-indica* L. (Mill.).**

## 1. Introduzione

Una delle problematiche aperte in OFI, in termini di performance produttive delle piante e degli impianti è legata alla conoscenza dei parametri di efficienza produttiva che, in altre specie, sono conosciuti in base a relazioni funzionali tra gli organi fotosintetizzanti (foglie), gli organi riproduttivi (frutti) e le parti strutturali della pianta (scheletro, tronco, radici). La conoscenza delle priorità di ripartizione stagionale degli assimilati, insieme ai dati di accumulo poliennale di sostanza secca nei diversi organi, consentono di capire come e a quale organo una pianta destina le sue risorse e in quale momento del ciclo stagionale e della sua vita biologica-economica.

L'esperimento è stato condotto allo scopo di quantificare l'accumulo della biomassa, in termini di peso fresco e secco, dell'impianto e di individuarne la ripartizione nella componente epigea delle piante. Inoltre, per la prima volta, viene affrontato uno studio su piante adulte individuando il LAI reale del sistema calcolato in base ai cladodi effettivamente fotosintetizzanti discriminando i vari indici di area fogliare, riferiti alla singola pianta e all'impianto, per classi di età e quindi di efficienza fotosintetica.

## 2. Materiali e metodi

### 2.1. Caratteristiche del frutteto

Il lavoro è stato svolto nell'azienda Garufa che si trova nel territorio del comune di Roccapalumba (37°48'N; 13°38'E, 330 m s.l.m.). Le precipitazioni medie annuali ammontano a circa 650 mm.

L'impianto è costituito da piante di *Opuntia ficus-indica* di 10 anni della varietà "Gialla" (80%), "Rossa" (18%) e "Bianca" (2%), disposte in sesto rettangolare e distanziate 6 x 5 m, con un numero complessivo di 333 piante ha<sup>-1</sup>. I filari sono orientati N - S. La forma di allevamento adottata è il vaso pieno. L'altezza media delle piante è di 3 m. La produzione media di frutti è di 18 t ha<sup>-1</sup>.

La tessitura del terreno è di tipo franco-argilloso (classificazione USDA) con percentuali di sabbia, limo e argilla rispettivamente del 40%, 22% e 38%. (media di campionamenti effettuati rispettivamente a 15 e 30 cm di profondità). I contenuti idrici del suolo sono stati misurati con il metodo delle piastre di Richards ai valori di potenziale standard e sono risultati pari a 0,35 m<sup>3</sup>

$m^{-3}$  e  $0,10 m^3 m^{-3}$  rispettivamente alla capacità di campo ( $h = - 330$ ) e al punto di appassimento ( $h = - 15300$ ).

L'impianto irriguo è composto da un'ala gocciolante (diametro 16) per ogni fila di piante sulla quale sono installati microsprinkler da  $40 l h^{-1}$  ad una pressione di 150 kPa. Il volume d'acqua distribuita nel corso della stagione irrigua del 2009 è stato di 120 mm, con turni di 4 - 7 giorni.

La fertilizzazione è stata effettuata, distribuendo 80 - 100 Kg  $ha^{-1}$  di azoto; due terzi della quantità totale sono stati somministrati nel periodo antecedente il risveglio vegetativo e un terzo dopo la scozzolatura, in fertirrigazione. Durante il periodo invernale, inoltre, sono stati apportati concimi fosfatici e potassici alle dosi di 100 Kg  $ha^{-1}$  e 80 Kg  $ha^{-1}$  rispettivamente.

## ***2.2. Accumulo e ripartizione stagionale di sostanza secca nella parte epigea***

L'esperimento di tesi è stato condotto durante la stagione vegetativa del 2009. Ogni operazione eseguita è stata ripetuta su sei piante di *O. ficus-indica* cv. "Gialla", usate come singolo blocco sperimentale.

I cladodi di ciascuna pianta sono stati classificati in cinque categorie: cladodi dell'anno, di un anno (1 anno), di età compresa tra 2 e 4 anni (2 - 4 anni), scaffold (impalcatura) e tronco (formato da cladodi con avanzato grado di lignificazione e spesso non identificabili in singole unità). E' stato necessario inserire la categoria scaffold in quanto, nella zona interna delle piante, i cladodi mostravano una totale scomparsa dei tessuti fotosintetici ed erano coperti da un'epidermide parzialmente lignificata. Al fine di valutare il quantitativo di biomassa fissata durante l'anno, sono stati monitorati i flussi primaverile ed estivo di nuova vegetazione (flusso annuale di nuova vegetazione) e l'accumulo di sostanza secca in cladodi emessi negli anni passati.

Il flusso annuale di nuova vegetazione è formato dai cladodi dell'anno, dai fiori e dai frutti che ne derivano. In particolare, la coltura del ficodindia è caratterizzata da un'operazione colturale denominata 'scozzolatura'. Tale pratica agronomica consiste nella rimozione dell'intero primo flusso di fiori e di cladodi per favorire, circa un mese più tardi, una seconda fioritura dalla quale si svilupperanno i frutti a maturazione autunnale, di pezzatura maggiore, per via delle condizioni di temperature più favorevoli che caratterizzano gran parte del loro periodo di sviluppo e maturazione.

Nel mese di giugno (primo flusso di vegetazione), i fiori e i cladodi scozzolati dalle sei piante sono stati contati e ne è stato misurato il peso fresco. Al fine di valutare il contenuto di sostanza secca presente, sono stati prelevati campioni costituiti da 100 fiori e 50 cladodi per ogni pianta. Questi sono stati pesati individualmente per valutarne il peso fresco e in seguito messi in stufa ventilata (M-250-VF, MPM Instruments srl, Bernareggio, Italy) a 50°C fino a raggiungimento di peso costante. Si è così misurato il contenuto di biomassa secca del campione e calcolata la sostanza secca dei fiori e dei cladodi rimossi con la scozzolatura.

Durante l'emissione del secondo flusso di vegetazione (seconda settimana di luglio) i nuovi fiori e cladodi emessi, sono stati contati.

Nel mese di dicembre, i cladodi di nuova formazione (cladodi dell'anno) di ognuna delle sei piante prese in esame sono stati rimossi e ne è stato misurato il peso fresco. In ogni pianta, un campione di 50 cladodi è stato quindi messo in stufa per misurarne il peso secco.

La raccolta dei frutti è avvenuta in tre staccate: il 30 ottobre, il 13 novembre e il 30 novembre 2009. In ogni data è stato misurato il peso totale dei frutti raccolti e un campione di 30 frutti per pianta è stato pesato prima e dopo essere stato messo in stufa ventilata per la determinazione del peso fresco e del peso secco.

L'accumulo di sostanza secca nei cladodi emessi in anni passati (cladodi di 1 anno, di 2 - 4 anni e scaffold) è stato misurato attraverso campionamenti effettuati all'inizio (maggio) e alla fine (dicembre) della stagione vegetativa. In ogni pianta, campioni di 50 cladodi di 1 anno e 50 di età compresa tra 2 e 4 anni, sono stati prelevati con un succhiello di 1,4 cm di diametro, pesati e messi in stufa ventilata per misurarne la sostanza secca (2 campionamenti, in maggio e in dicembre, effettuati nella zona centrale di ciascun cladodio). La differenza in termini di contenuto di biomassa secca a inizio e fine anno ha costituito l'accumulo di peso secco stagionale.

### ***2.3. Peso complessivo e indici di area fogliare delle piante***

Alla fine della stagione vegetativa (dicembre 2009) tre piante sono state interamente distrutte al fine di valutare la ripartizione della sostanza secca nei diversi organi, nonché l'effettiva superficie fotosintetica attiva e gli indici di area fogliare (LAI pianta e LAI impianto).

Tutti i cladodi appartenenti a ciascuna delle categorie di età (cladodi dell'anno, di 1 anno, di 2 - 4 anni e scaffold) sono stati misurati in termini di numero complessivo, peso fresco, larghezza,

lunghezza e spessore. Campioni di 50 cladodi appartenenti a ciascuna delle suddette categorie sono stati prelevati al fine di misurarne il peso secco e la superficie. Tronco e radici sono stati misurati in termini di peso fresco e secco attraverso campionamenti di porzioni essiccate in stufa ventilata.

I cladodi dell'anno, di 1 anno e di età compresa tra 2 e 4 anni, costituiscono la parte fotosinteticamente attiva della pianta.

La superficie di 100 cladodi è stata misurata con un Leaf area Meter (Delta-T Devices LTD, Cambridge, UK) ed è stata ottenuta la regressione  $Y = 0,8571(DL*DT) + 0,3652$  ( $R^2 = 0,96$ ), tra il prodotto del diametro longitudinale (DL) per il trasversale (DT) e la superficie dei cladodi (Figura 4). Il valore calcolato è stato duplicato dato che entrambe le facce dei cladodi svolgono fotosintesi.

Infine sono stati calcolati gli indici di area fogliare: LAI pianta, ovvero il rapporto tra la superficie fotosintetica e la superficie di suolo sulla quale insiste la pianta, e LAI impianto, ovvero il rapporto tra area fogliare e superficie effettivamente destinata alla pianta, definita cioè dalla distanza tra le piante e dal sesto d'impianto.

L'analisi statistica è stata necessariamente di tipo descrittivo. Per l'analisi dei dati di sostanza secca e di LAI, si riportano le medie e l'errore standard, mentre nel caso di confronto tra le medie si è utilizzato il test di Tukey.

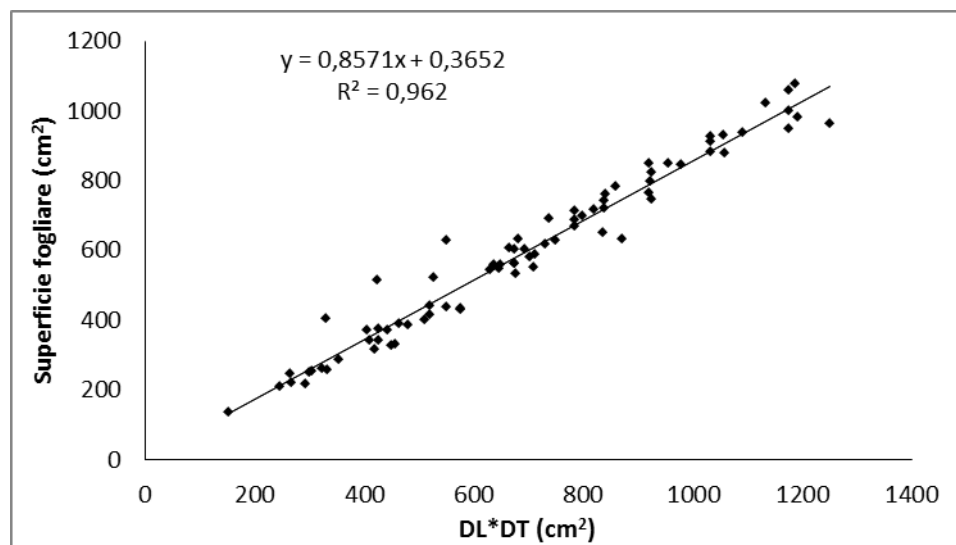


Figura 4. Correlazione tra il prodotto del diametro longitudinale (DL) per il trasversale (DT) e la superficie dei cladodi dell'anno, di 1 anno e di 2 anni in piante di *Opuntia ficus-indica*.



### 3. Risultati

#### 3.1. *Accumulo e ripartizione stagionale di sostanza secca della parte epigea*

Durante il 2009 le piante, tra il primo ed il secondo flusso di nuova vegetazione, hanno emesso una media  $314 \pm 31,2$  cladodi. Di questi,  $80 \pm 14,2$  cladodi dell'anno sono stati eliminati con la scozzolatura (Tabella 1). La biomassa fresca così allontanata è stata di  $9,5 \pm 0,3$  Kg pianta<sup>-1</sup>, pari a  $2,0 \pm 0,06$  Kg di sostanza secca, ovvero il 5,1% del totale (Tabella 1). I  $234 \pm 17,1$  cladodi lasciati sulle piante hanno costituito il numero effettivo di cladodi dell'anno il cui accumulo di sostanza secca è stato misurato al termine del primo anno di crescita. Il loro peso fresco complessivo, a fine anno, è stato di  $226,7 \pm 14,3$  Kg pianta<sup>-1</sup>, e la biomassa secca pari a  $16,5 \pm 1,1$  kg. La biomassa secca accumulata nei cladodi dell'anno durante il 2009 è stata il 42,05% di quella complessivamente fissata durante l'intero anno (Tabella 1).

In giugno, il numero medio di fiori rimossi dalle piante con la scozzolatura è stato di  $1600 \pm 93,0$ . Il peso fresco e il peso secco dei fiori rimossi da ognuna delle sei piante esaminate tramite questa operazione è risultato di  $32,1 \pm 0,77$  Kg e  $2,1 \pm 0,07$  Kg. La percentuale di sostanza secca nei fiori è stata del 6,6% (Tabella 3). La biomassa secca rimossa con la scozzolatura è stata pari al 5,4% del totale fissato dalla pianta nel corso della stagione vegetativa (Tabella 1).

La produzione media di frutti (secondo flusso) per pianta è stata di  $59,8 \pm 1,4$  Kg, mentre il peso secco di  $10,2 \pm 0,2$  kg pianta<sup>-1</sup>, pari al 26,3% del totale fissato durante l'anno (Tabella 1). Il loro peso medio è stato di  $153 \pm 4,5$  g. Il contenuto medio in zuccheri dei frutti è risultato di  $13,1 \pm 0,24$  °Brix, la sostanza secca, invece, è pari al 17,1% del peso fresco (Tabella. 3). La quantità di frutti in termini di sostanza secca espressa per unità di superficie di terreno è risultata di  $0,34$  Kg m<sup>-2</sup>.

L'accumulo di sostanza secca nei cladodi di 1 anno è stato pari a  $2,0 \pm 0,07$  Kg, ovvero il 5,1% del totale. Le classi 2 - 4 anni e scaffold, ovvero la restante parte dei cladodi escluso quelli costituenti il tronco, hanno fissato, invece,  $6 \pm 0,2$  Kg s.s. pianta<sup>-1</sup>, pari al 15,6% del peso secco complessivamente accumulato nelle piante durante il 2009. I dati sopra riportati, hanno mostrato come il 20,6% della biomassa secca fissata durante l'anno sia stata destinata ai cladodi formati in anni passati (Tabella 1).

\*Include anche l'accrescimento annuale della porzione non fotosintetizzante (scaffold).

	Numero	Peso fresco (Kg)	Peso secco (Kg)	Biomassa (% peso secco)
<b>Cladodi dell'anno eliminati con la scozzolatura</b>	80 ± 14,2	9,5 ± 0,3	2,0 ± 0,06	5,1
<b>Cladodi dell'anno a fine ciclo</b>	234 ± 17,1	226,7 ± 14,3	16,5 ± 1,1	42,5
<b>Fiori eliminati con la scozzolatura</b>	1600 ± 93,0	32,1 ± 0,77	2,1 ± 0,07	5,4
<b>Frutti</b>	398 ± 35,3	59,8 ± 1,4	10,2 ± 0,2	26,3
<b>Incremento di peso secco nei cladodi di 1 anno</b>	219 ± 12,5	-	2,0 ± 0,07	5,1
<b>Incremento di peso secco nei cladodi di 2 - 4 anni*</b>	398 ± 25,0	-	6,0 ± 0,2	15,6
<b>Totale</b>			38,8 ± 1,7	100

Tabella 1. Numero, peso fresco e peso secco (media ± e.s.) delle varie componenti di piante di 10 anni (n = 6) di *Opuntia ficus-indica* cv. "Gialla", allevate a vaso pieno.

I cladodi di età maggiore di 2 anni evidenziano un accumulo medio annuale di sostanza secca pari a circa 15 g, mentre i cladodi dell'anno accumulano circa 10 g di sostanza secca nell'arco della stagione di crescita; quelli dell'anno accumulano, ciascuno, a fine stagione, circa 70 g di sostanza secca. L'accumulo medio di sostanza secca del frutto è invece pari a circa 25 g. L'accumulo complessivo di sostanza secca nelle piante, durante il 2009 è stato di 38,8 ± 1,7 kg, corrispondente ad una produzione di biomassa secca su base ettariale pari a di 12,9 tonnellate (Tabella 1).

La biomassa secca stagionale destinata ai frutti (Harvest Index) è risultata essere il 26,3% di quella totale (Tabella 1). Considerando anche i fiori del primo flusso di vegetazione scozzolati, l'Harvest Index è pari al 31,7%. Il rapporto tra la sostanza secca investita nell'accrescimento vegetativo e quella destinata ai frutti è pari a 3:1.

### **3.2. Peso complessivo e indici di area fogliare delle piante**

Il numero medio di cladodi dell'anno, alla fine della stagione vegetativa, è stato pari a 231 ± 14,1 (Tabelle 2 e 4). La biomassa pesata (peso fresco) è stata di 232,9 ± 8,9 Kg per pianta, ovvero 17,7 ± 1,1 Kg di sostanza secca, corrispondenti al 5,6% del peso secco totale delle piante (Tabella 2). Il peso secco medio di ciascun cladodio è risultato di 76,4 ± 0,31 g (Tabella 4) e la superficie media di 1242,9 ± 3,19 cm<sup>2</sup> (Tabella 4). Il contenuto medio di sostanza secca è stato

del 7,6% del peso fresco (Tabella 3). I cladodi dell'anno, a dicembre, avevano un peso secco per unità di superficie di  $61,4 \pm 0,17 \text{ mg cm}^{-2}$  (Tabella 4). La superficie fotosintetica complessiva dei cladodi dell'anno, nelle tre piante, è risultata pari a  $28,7 \pm 1,77 \text{ m}^2$  (Tabella 4).

Alla fine del 2009, le piante erano composte da una media di  $219 \pm 12,7$  cladodi di 1 anno (Tabelle 2 e 4). Il peso complessivo della loro massa fresca è risultato di  $301,9 \pm 9,3 \text{ Kg}$ , il peso della massa secca invece  $28,5 \pm 1,6 \text{ Kg}$ , ovvero il 9,1% del totale dell'intera pianta (Tabella 2). Il peso secco medio per cladodio è risultato essere di  $130,6 \pm 0,4 \text{ g}$  (Tabella 4). Il contenuto medio di sostanza secca nei cladodi di 1 anno è stato il 9,4% del peso fresco (Tabella 3), mentre la superficie media  $1425,5 \pm 3,33 \text{ cm}^2$  (Tabella 4). I cladodi, a dicembre, avevano un peso secco per unità di superficie di  $91,6 \pm 0,50 \text{ mg cm}^{-2}$  (Tabella 4). La loro superficie fotosintetica, nelle tre piante, è risultata pari  $31,2 \pm 1,85 \text{ m}^2$  (Tabella 4).

Il numero medio di cladodi con età compresa tra 2 e 4 anni è stato, nelle tre piante, di  $262 \pm 10,2$  (Tabelle 2 e 4). Il loro peso fresco complessivo è stato pari a  $550,3 \pm 14,8 \text{ Kg}$ , il secco, invece  $60,9 \pm 1,6 \text{ Kg}$  (Tabella 2). Il peso secco medio per singolo cladodio è risultato essere di  $235,6 \pm 4,23 \text{ g}$  (Tabella 4), la superficie fotosintetica invece  $1731,9 \pm 9,97 \text{ cm}^2$  (Tabella 4). Il contenuto percentuale di sostanza secca sul fresco è risultato pari al 11,1% (Tabella 3). Il peso secco dei cladodi della classe 2 - 4 anni è risultato pari al 19,2% del totale (Tabella 2).

	<b>Numero</b>	<b>Peso fresco (Kg)</b>	<b>Peso secco (Kg)</b>	<b>Biomassa (% peso secco)</b>
<b>Cladodi dell'anno</b>	$231 \pm 13,7$	$232,9 \pm 8,9$	$17,7 \pm 1,1$	5,6
<b>Cladodi di 1 anno</b>	$219 \pm 12,7$	$301,9 \pm 9,3$	$28,5 \pm 1,6$	9,0
<b>Cladodi di 2 - 4 anni</b>	$259 \pm 9,0$	$550,3 \pm 14,8$	$60,9 \pm 1,6$	19,2
<b>Scaffold</b>	$88 \pm 8,5$	$288,9 \pm 8,6$	$31,7 \pm 1,6$	10,0
<b>Tronco</b>	-	$723,8 \pm 15,3$	$123,1 \pm 6,6$	38,8
<b>Radici</b>	-	$152,3 \pm 8,6$	$55,0 \pm 1,8$	17,4
<b>Totale</b>	-	$2250,1 \pm 65,5$	$316,9 \pm 14,3$	100

Tabella 2. Numero, peso fresco e peso secco (media  $\pm$  e.s.) dei vari organi costituenti piante di 10 anni (n = 3) di *Opuntia ficus-indica* cv. "Gialla", allevate a vaso pieno.

I cladodi, a dicembre, avevano un peso secco per unità di superficie di  $136,1 \pm 2,71 \text{ mg cm}^{-2}$  (Tabella 4). La media della superficie fotosintetica dei cladodi di 2 - 4 anni, è risultata pari a  $44,8 \pm 1,44 \text{ m}^2$  (Tabella 4).

La classe scaffold, composta da una media di  $88 \pm 8,5$  cladodi per pianta, ha costituito il 10% del peso secco complessivo delle piante (Tabelle 2 e 4). La biomassa fresca e la biomassa secca sono risultate pari a  $288,9 \pm 8,6 \text{ Kg}$  e  $31,7 \pm 1,6 \text{ Kg}$  rispettivamente, con una percentuale media di sostanza secca uguale all'11% di quella fresca (Tabella 3).

Alla fine del 2009, il 38,8% della massa secca totale delle piante era costituita dal tronco, avente pesi fresco e secco rispettivamente di  $723,8 \pm 15,3 \text{ Kg}$  e  $123,1 \pm 6,6 \text{ Kg}$  (Tabella 2) e una percentuale di massa secca pari 17% di quella fresca (Tabella 3).

<b>Contenuto percentuale di sostanza secca</b>								
	<b>Cladodi dell'anno</b>	<b>Cladodi di 1 anno</b>	<b>Cladodi di 2 - 4 anni</b>	<b>Scaffold</b>	<b>Tronco</b>	<b>Fiori</b>	<b>Frutti</b>	<b>Radici</b>
<b>% s.s.</b>	7,6	9,4	11,1	11,0	17,0	6,5	17,1	34,7

Tabella 3. Contenuto percentuale medio di sostanza secca nei diversi organi costituenti piante di 10 anni (n = 3) di *Opuntia ficus-indica* cv. "Gialla", allevate a vaso pieno.

L'apparato radicale ha costituito il 17,4% del peso secco complessivo delle piante. Il suo peso fresco è risultato di  $152,3 \pm 8,6 \text{ Kg}$ , il secco, invece, di  $55 \pm 1,8 \text{ Kg}$  (Tabella 2). Mediamente, la biomassa secca ha costituito il 34,7% di quella fresca (Tabella 3). In particolare, il ceppo principale e il capillizio radicale hanno mostrato avere percentuali medie di massa secca del 36,8% e 38,4% rispettivamente, mentre, le radici primarie, più grosse e carnose, soltanto il 28,8%.

La superficie fotosintetica complessiva delle piante, formata dai cladodi dell'anno, di 1 anno e di 2 - 4 anni, è risultata essere pari a  $104,7 \pm 3,09 \text{ m}^2$  (Tabella 4). La superficie fotosintetica dei cladodi di 2 - 4 anni è risultata la più elevata ( $44,8 \pm 1,44 \text{ m}^2$ ) di quella dei cladodi dell'anno e di 1 anno, con superfici di  $28,7 \pm 1,77 \text{ m}^2$   $31,2 \pm 1,85 \text{ m}^2$  rispettivamente (Tabella 4).

Il valore di LAI pianta calcolato è stato di  $5,8 \pm 0,17$ , il LAI impianto, invece,  $3,5 \pm 0,10$  (Tabella 4). Gli indici di area fogliare sono stati ben ripartiti tra i cladodi a maggiore efficienza fotosintetica (cladodi dell'anno e di 1 anno) con valori di LAI impianto pari a 1,0 in entrambe le classi e di LAI pianta di 1,6 e 1,7 rispettivamente (Tabella 4). Anche in questo caso i cladodi meno efficienti dal punto di vista fotosintetico hanno avuto i valori di LAI più elevati:  $2,5 \pm 0,08$

(LAI pianta) e  $1,5 \pm 0,05$  (LAI impianto) in virtù del loro maggior numero e della loro superficie media (Tabella 4).

	Cladodi	Peso	Peso secco per unità di superficie	Superficie media	Superficie complessiva	LAI Pianta	LAI Impianto
	(n)	(g s.s.)	(mg s.s. cm <sup>-2</sup> )	(cm <sup>2</sup> )	(m <sup>2</sup> )		
<b>Cladodi dell'anno</b>	231 ± 13,7	76,4 ± 0,31	61,4 ± 0,17	1242,9 ± 3,19	28,7 ± 1,77	1,6 ± 0,10	1,0 ± 0,06
<b>Cladodi 1 anno</b>	219 ± 12,7	130,6 ± 0,41	91,6 ± 0,50	1425,5 ± 3,33	31,2 ± 1,85	1,7 ± 0,10	1,0 ± 0,06
<b>Cladodi 2-4 anni</b>	259 ± 9,0	235,6 ± 4,23	136,1 ± 2,71	1731,9 ± 9,97	44,8 ± 1,44	2,5 ± 0,08	1,5 ± 0,05
<b>Totale</b>	709 ± 24,4	-	-	-	104,7 ± 3,09	5,8 ± 0,17	3,5 ± 0,10

Tabella 4. Numero, peso, superficie dei cladodi fotosinteticamente attivi e LAI di piante (n = 3) di *Opuntia ficus-indica* cv. "Gialla", allevate a vaso pieno.

#### 4. Discussione e conclusione

Una quota consistente di sostanza secca viene accumulata annualmente dai cladodi dell'anno e dai frutti (Tabella 1). In particolare, il 2009 è stato contrassegnato da una fortissima produzione di nuovi cladodi, come numero (314 in totale dei quali 234 tenuti sulla pianta fino a fine ciclo) ma anche in termini di biomassa ripartita dal sistema pianta alla loro formazione e al loro sviluppo (47,6% di s.s. ripartita nella formazione dei cladodi dell'anno) (Tabella 1). La quantità di sostanza secca destinata alla componente riproduttiva è risultata del 31,7% se si include, oltre ai frutti, anche il primo flusso di fiori scozzolati a giugno (Tabella 1). Il 20,7% di quanto fissato nel corso della stagione è stato ripartito ai cladodi di 1 anno, 2 - 4 anni e scaffold (Tabella 1). La produzione annuale di biomassa secca, pari a  $12,9 \text{ t ha}^{-1}$ , è in realtà sottostimata, se si considera che è molto difficile misurare l'accrescimento annuale e quindi la sostanza secca accumulata nel tronco e nelle radici.

La produzione primaria netta epigea del sistema studiato per unità di superficie è risultata di  $1,29 \text{ Kg m}^{-2}$ . Acevedo *et al.* (1983), in un impianto di OFI in Chile, hanno misurato una produzione di sostanza secca pari a  $1 \text{ Kg m}^{-2}$  per i cladodi e  $0,3 \text{ Kg m}^{-2}$  per i frutti. Nobel (1988) riporta valori massimi di accumulo in OFI pari a  $2 \text{ Kg m}^{-2} \text{ anno}^{-1}$  di sostanza secca.

Le dinamiche di sviluppo dei cladodi di nuova formazione (cladodi dell'anno) in termini di peso e superficie, rispetto a quelli della classe 2 - 4 anni (Tabella 4), hanno indicato come alla fine della stagione vegetativa 2009 (dicembre) la superficie dei cladodi dell'anno sia stata il 71,8% di quella dei cladodi di 2 - 4 anni, il peso invece solamente il 32,4%. Questi valori evidenziano come, dopo i primi mesi di sviluppo, i nuovi cladodi tendano ad accumulare le sostanze di riserva attraverso l'ispessimento dei tessuti parenchimatici e clorenchimatici piuttosto che aumentando la superficie. Inoltre, sebbene fortemente rallentata, l'espansione della superficie planare dei cladodi continua anche dopo il primo anno: infatti la superficie media dei cladodi di 1 anno risulta minore del 17,7% rispetto quella dei cladodi 2 - 4 anni (Tabella 4).

Nel presente lavoro, per la prima volta, sono stati misurati indici di area fogliare considerando cladodi che avessero realmente un potenziale fotosintetico e non l'intera massa componente la pianta. I valori di LAI pianta e impianto calcolati, ovvero 5,8 e 3,5 rispettivamente (Tabella 4), sono comparabili con valori raggiunti da altre specie frutticole nelle zone temperate (Faust, 1989). I cladodi di 2 - 4 anni, incidono per il 42,8% dell'intera superficie fotosintetica (Tabella 4). Il loro numero medio è risultato, infatti, leggermente maggiore rispetto a quello dei cladodi dell'anno e di 1 anno (Tabella 4). Inoltre la superficie media dei cladodi di 2 - 4 anni è il 28,2% e il 17,7% maggiore di quella dei cladodi di 1 e 2 anni (Tabella 4). In OFI, soltanto il 57% del PAR è trasmesso attraverso la cuticola, l'epidermide e l'ipoderma dei cladodi, ed è così disponibile per essere assorbito dalla clorofilla (Nobel, 1988). Siccome il clorenchima dei cladodi è spesso diversi millimetri e contiene grandi quantità di clorofilla, solamente l'1% circa del PAR incidente passa attraverso il tessuto clorenchimatico (Nobel e Hartsock, 1983). Samish e Ellern (1975), confrontando l'accumulo notturno di acidi in cladodi di età compresa tra 1 e 5 anni, evidenziarono come cladodi di 2 anni accumulassero circa il 60% in meno dei cladodi di 1 anno. Se si considera quanto detto, soltanto i cladodi dell'anno e di 1 anno possono essere considerati ad alta efficienza fotosintetica: la loro superficie fogliare risulta il 57,2% di quella complessiva, pari a circa  $60 \text{ m}^2 \text{ pianta}^{-1}$  (Tabella 4). I valori di LAI pianta e impianto così ottenuti sarebbero di 3,3 e 2 rispettivamente.

Nel ficodindia si conoscono le relazioni funzionali tra accrescimento dei frutti e dei cladodi dell'anno (Inglese *et al.*, 1999) ma fino ad oggi nulla era noto sulle relazioni tra superficie fogliare e fruttificazione, ovvero sul LAI. Se il numero totale di frutti viene messo in relazione alla superficie fotosintetica, si arriva a valori di  $6,6 \text{ frutti m}^{-2}$ , cioè a circa 1 Kg di frutti  $\text{m}^{-2}$  (peso

fresco). L'elevato numero di cladodi di 1 anno e la buona produttività complessiva riscontrata (quasi 60 Kg di frutti per pianta, ovvero quasi 20 t ha<sup>-1</sup>) è in contrasto con la bassa produttività media per singolo cladodio. Infatti calcolando una percentuale del 90% di fiori allegati arrivati a maturazione, ovvero circa 440 fiori portati da un numero medio di 219 cladodi di 1 anno, la fertilità media risultante è di 2 fiori per cladodio.

La produzione di frutti nel presente lavoro è risultata di 2,0 Kg m<sup>-2</sup> e 0,34 Kg m<sup>-2</sup> rispettivamente in peso fresco e secco. Inglese *et al.* (2010) riportano, in Sicilia, produzioni medie di frutti (peso fresco) di 1,73 ± 0,33 Kg m<sup>-2</sup>. Reñasco (1976), in Cile, ha misurato una produzione di frutti (peso fresco) pari a 1,6 Kg m<sup>-2</sup>. Acevedo *et al.* (1983) hanno riportato, sempre in Cile, valori di 0,3 Kg m<sup>-2</sup> peso secco di frutti. Malgrado la bassa fertilità dei cladodi, l'elevata produttività dell'impianto sembra essere causata da un maggior peso medio dei frutti, pari a 153 ± 5,2 g. Inglese *et al.* (1999) hanno misurato in un impianto di Santa Margherita Belice, in Sicilia, pesi medi dei frutti di 139 g e 135 g rispettivamente nei flussi primaverile ed estivo.

I LAI pianta e frutteto calcolati nel presente lavoro di tesi, come anche la produzione di biomassa complessiva, sono simili a quelli di altre specie da frutto. Liguori *et al.* (2009), in un agrumeto tradizionale (4,5 x 4,5 m) con piante di Tarocco di 14 anni di età, una produzione di frutti di 35 t ha<sup>-1</sup> e un LAI di 3,5, hanno calcolato una produzione complessiva di biomassa secca pari a 11,7 t ha<sup>-1</sup>. In un pescheto di 4 anni (*Prunus persica* L. Batsch, cv. "Flordaprince" su GF 677), con LAI di 5,4 e densità di 930 piante ha<sup>-1</sup>, è stata riportata una produzione annuale di sostanza secca di 15,7 t ha<sup>-1</sup> e un H.I. del 17,2% (Caruso *et al.*, 1999). Uno studio inerente un meleto di 8 anni di età, varietà McIntosh su MM106, con LAI pari a 4,1, ha riportato valori di accumulo di peso secco stagionale pari a 20,7 t ha<sup>-1</sup> (Forshey *et al.*, 1983).

In ultima analisi, dalla distruzione delle 3 piante è risultato che il 66,2% dell'intera massa secca è composta da radici, tronco e cladodi non fotosintetici (scaffold) (Tabella 2). Potrebbe così essere vantaggioso, negli anni a venire, capitozzare le piante per favorire una rapida formazione di cladodi giovani, abbassando e ottimizzando gli indici di area fogliare e garantendo quindi, in pochi anni, performance produttive ancora maggiori.



**Stima di Evapotraspirazione e Coefficiente  
Colturale in un Impianto di *Opuntia ficus-indica*  
L. (Mill.) Attraverso una Tecnica di Bilancio  
Energetico**



## **1. Introduzione**

Nello studio di tesi, la stima dei flussi energetici di un ficodindieto è stata effettuata dalla primavera del 2009 all'autunno del 2010, ovvero durante 2 stagioni vegetative. L'obiettivo del lavoro è consistito nell'applicazione dell'equazione di bilancio dei flussi energetici superficiali, in cui il calore sensibile (flusso di energia scambiato dal sistema vegetazione-atmosfera) è stato determinato attraverso la tecnica micrometeorologica denominata Surface Renewal. L'applicazione dell'approccio micrometeorologico ha consentito di determinare l'evapotraspirazione effettiva e i valori del coefficiente colturale di un impianto di ficodindia per la produzione di frutti.

Come riporta la più recente letteratura, approcci di tipo micrometeorologico sono risultati utili per la determinazione dell'evapotraspirazione (ET) colturale. In particolare, l'accrescimento delle specie CAM potrebbe, infatti, influire sull'accumulo e la ripartizione dell'energia disponibile in termini di densità di flusso di calore sensibile (H) e latente (LE, ET) (Baldocchi, 1994). Le applicazioni di tipo micrometeorologico sono di particolare interesse in quanto capaci di determinare i meccanismi di trasferimento energetico tra la vegetazione, il suolo e l'atmosfera e di metterli in relazione a fattori ambientali e fisiologici peculiari (Jarvis and McNaughton, 1986).

## **2. Materiali e metodi**

### ***2.1. Caratteristiche del frutteto***

Il presente studio è stato condotto presso l'azienda Garufa, sita nel territorio del comune di Roccapalumba (37°48'N; 13°38'E, 330 m s.l.m.). Le precipitazioni medie annuali ammontano a circa 650 mm. I valori medi delle temperature minime e massime durante l'anno oscillano dai 9°C nel mese di febbraio a circa 30°C nel mese di luglio, con dei picchi di massime che raggiungono i 35° in luglio e agosto (Tabella 6).

La superficie aziendale si estende per 2,5 ettari e l'intera area è circondata da impianti con le medesime caratteristiche, tali da garantire condizioni di omogeneità colturale utili per l'applicazione delle tecniche micrometeorologiche. La densità d'impianto è di circa 333 piante

ha<sup>-1</sup> (sesto 6 x 5 m). I filari sono orientati in direzione N - S. Le piante, di 10 anni di età, presentano un'altezza media di 3 metri. Le varietà coltivate sono Gialla (80%), Rossa (18%) e Bianca (2%). La forma di allevamento adottata è il globo. La produzione media di frutti è di 18 t ha<sup>-1</sup>. La tessitura del suolo presso l'area in studio corrisponde al tipo franco-argilloso (classificazione USDA) con percentuali di sabbia, limo e argilla rispettivamente del 40, 22 e 38% (media di campionamenti effettuati rispettivamente a 15 e 30 cm di profondità).

Le caratteristiche idrauliche del suolo sono state determinate con test di laboratorio usando campioni di terreno (10 cilindri di acciaio con volume interno di 10<sup>-4</sup> m<sup>3</sup>) prelevati alle profondità di 15 e 30 cm. La conducibilità idraulica del suolo in condizioni di saturazione ( $K_s$ ), è stata determinata in laboratorio con il metodo del "permeometro a carico variabile", ed è risultata pari a 10<sup>-5</sup> m s<sup>-1</sup>. Il contenuto idrico del suolo è stato determinato con metodi tensiometrici utilizzando "cassette tensiometriche del tipo Stackman" e piastre di Richards; i valori di contenuto idrico corrispondenti alla capacità di campo e al punto critico colturale sono risultati, rispettivamente, pari a 0,35 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> e 0,10 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>.

L'impianto irriguo è composto da un'ala gocciolante per ciascuna fila di piante (diametro 16 mm) sulla quale sono installati microsprinkler da 40 l h<sup>-1</sup> ad una pressione di 150 kPa. Nel corso delle due stagioni irrigue (giugno - settembre) sono stati distribuiti volumi idrici pari a 120 e 150 mm rispettivamente, con turni di 4 - 7 giorni.

## ***2.2. Stime micrometeorologiche***

Durante le due stagioni vegetative, attraverso l'utilizzo di una stazione climatica ubicata presso il sito in studio, sono state misurate le seguenti grandezze meteorologiche: temperatura e umidità dell'aria (HMP45C Vaisala, Campbell Scientific, USA), velocità e direzione del vento (05103 RM, Young, USA), pressione atmosferica (CS106, Campbell Scientific, USA) e precipitazione (CS-700 L, Campbell Scientific, USA). L'evaporazione dell'acqua dal suolo è stata misurata attraverso microlisimetri (tubi di alluminio spessi 3 mm, alti 12,5 cm e con un diametro di 11,5 cm), durante periodi continui di 15 giorni da giugno a ottobre. Le differenze di peso sono state misurate attraverso una bilancia elettronica portatile di precisione.

La stima del flusso di calore sensibile scambiato dal sistema vegetazione-atmosfera è stata effettuata attraverso misurazioni ad alta frequenza (4 Hz) della temperatura dell'aria al di sopra della copertura vegetale. I valori di temperatura dell'aria, così misurati, presentano un tipico

andamento a “rampe”, delle quali sono stati determinati i valori caratteristici (ampiezza e periodo). L’analisi delle rampe di temperatura, in genere di forma triangolare e costituite da un periodo (intervallo di tempo necessario per la formazione della rampa) e un’ampiezza (gradiente termico) (Figura 4), rappresenta il fondamento della tecnica micrometeorologica Surface Renewal (SR).

Le dimensioni delle rampe di temperature identificano strutture denominate in letteratura “coerenti”, cioè vortici (eddies), responsabili dello scambio e del trasporto turbolento di massa (H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>) e di energia (radiazione solare) (Paw U *et al.*, 1995).

Il metodo Surface Renewal è basato sulla risoluzione dell’equazione di conservazione di massa, applicata ad un flusso turbolento idealmente stazionario ed incompressibile.

Per il flusso di calore sensibile (H), ipotizzando che una ipotetica particella d’aria sia uniformemente riscaldata o raffreddata, può essere utilizzata l’espressione (Paw U *et al.*, 1995):

$$H_{SR} = \rho C_p (\alpha z) \frac{A}{\tau} \quad (1)$$

dove: z è l’altezza (m) della misurazione delle rampe di temperatura; ρ la densità dell’aria (g m<sup>-3</sup>); C<sub>p</sub> il calore specifico dell’aria a pressione costante (J (g•K)<sup>-1</sup>); A e τ sono, rispettivamente, l’ampiezza ed il periodo medio delle rampe di temperatura. α è un coefficiente di correzione per tener conto della poco uniforme distribuzione dei flussi di calore al di sotto dei sensori. Il flusso di calore sensibile così stimato (H<sub>SR</sub>) deve essere calibrato (per la determinazione di α) attraverso la misura diretta di H tramite il metodo rigoroso di Eddy Covariance (H<sub>EC</sub>). Quest’ultimo richiede l’utilizzo di un anemometro sonico tridimensionale.

Le grandezze A e τ (dimensioni delle rampe) sono state determinate come descritto da Van Atta (1977), utilizzando “Funzioni di struttura” S<sup>n</sup><sub>(r)</sub>, essendo r l’intervallo di tempo ed n l’ordine della funzione (r = 2, 3 e 5).

La determinazione dell’ampiezza (A) delle rampe di temperature è ottenuta risolvendo la seguente equazione di 3°:

$$A^3 = -\frac{S^3 \tau}{r} \quad (2)$$

Nel corso della sperimentazione, due termocoppie sensibili ad alta frequenza, con un diametro di 76 μm, sono state installate 0,5 m sopra la massima copertura della vegetazione (a 3,5 m dal suolo); tali sensori hanno, dunque, consentito di misurare le fluttuazioni di temperatura dell’aria

ad alta frequenza (4Hz). La stima di H è stata eseguita usando le funzioni di struttura, con intervalli di ritardo nella registrazione di 0,25 e 0,5 secondi.

I valori di calore sensibile determinati tramite il metodo SR ( $H_{SR}$ ,  $W m^{-2}$ ) sono stati calibrati attraverso misure indipendenti di H ottenute, come detto precedentemente, con un anemometro sonico 3-D ad alta frequenza (10Hz) (Windmaster Pro, Gill Instruments Ltd), collocato ad un'altezza dal suolo di 4,5 m. Il fattore di calibrazione di  $H_{SR}$  (valore di  $\alpha$  dell'equazione 1) è stato ottenuto come pendenza della retta di regressione (passante per l'origine) tra la variabile dipendente  $H_{EC}$  e la variabile indipendente  $H_{SR}$ .

Le tre componenti della velocità del vento, misurate dall'anemometro sonico, sono state opportunamente ruotate ed allineate come suggerito da Kaimal e Finnigan (1994).

La radiazione netta,  $R_n$ , è stata misurata attraverso un radiometro (CNR1, Kipp & Zonen) posto ad un'altezza di 6 m dalla superficie del suolo, mentre il flusso di calore nel suolo, G (Fuchs and Tanner, 1967), è stato determinato usando quattro piastre di flusso (HFP01, Campbell Scientific Ltd), due poste nell'interfila e due nella fila, nella zona ombreggiata sotto le piante (alla profondità di 0,05 m).

Il flusso di calore latente, o evapotraspirazione del sistema frutteto, è stato determinato attraverso la soluzione dell'equazione di bilancio energetico:

$$LE = R_n - G - H \quad (3)$$

dove LE è il calore latente,  $R_n$  la radiazione netta (risultante dal bilancio di tutte le componenti radiative: onde lunghe e onde corte), G il flusso di calore nel suolo e H il calore sensibile determinato con il metodo SR. Ciascun termine è espresso in  $W m^{-2}$ .

L'evapotraspirazione effettiva della coltura ( $ET_c$ ) è stata determinata dividendo LE per il calore latente di vaporizzazione dell'acqua, pari a  $2,45 MJ m^{-2} mm^{-1}$ . Ipotizzando che il regime irriguo somministrato al frutteto in studio sia tale da garantire condizioni di rifornimento potenziali, l'evapotraspirazione effettiva determinata dall'eq. 3 è stata uguagliata all'ET massima colturale ( $ET_c$ ). Ne segue che il coefficiente colturale,  $K_c$ , è stato determinato dal rapporto (FAO, 1998) tra l'evapotraspirazione effettiva della coltura ( $ET_c$ ) e quella di riferimento ( $ET_0$ ) calcolata utilizzando l'equazione modificata di Penman-Monteith (Allen *et al.*, 2005):

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \left( \frac{1000}{T + 273} u_2 (e_s - e_a) \right)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} \quad (4)$$

dove  $\Delta$  è la pendenza della curva della pressione di vapore saturo ( $\text{kPa K}^{-1}$ ) - temperature media dell'aria,  $\gamma$  è la costante psicrometrica ( $\text{kPa K}^{-1}$ ),  $T$  è la temperature media dell'aria ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $u_2$  è la velocità media del vento ( $\text{m s}^{-1}$ ),  $e_s$  ed  $e_a$  sono rispettivamente la pressione di vapore saturo alla temperatura dell'aria e la pressione di vapore effettiva ( $\text{kPa}$ ).

Al fine di analizzare lo stato termico della vegetazione nel corso del monitoraggio, la temperatura della vegetazione  $T_c$  è stata determinata dalla formula (Adams *et al.*,1991):

$$T_c = T_a + \frac{H}{\rho C_p g_a} \quad (5)$$

dove  $T_a$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) è la temperatura dell'aria,  $H$  ( $\text{W m}^{-2}$ ) è il calore sensibile stimato attraverso la tecnica SR,  $\rho$  e  $C_p$ , rispettivamente, la densità ( $\text{kg m}^{-3}$ ) e il calore specifico ( $\text{J kg}^{-1}\text{^{\circ}\text{C}^{-1}}$ ) dell'aria,  $g_a$  ( $\text{m s}^{-1}$ ) è la conduttanza aereodinamica al trasferimento del vapore acqueo (che può ben rappresentare la velocità di trasferimento dei flussi evapotraspirativi attraverso il sistema vegetazione-atmosfera).

Su tre piante selezionate presso l'areale in studio, è stata misurata, attraverso sensori (HOBO H-08, Onset, Bourne, MA, USA) dotati di sonde inserite nel parenchima, la temperatura interna di tre cladodi di 1 anno esposti in piena luce. Le stesse misure sono state effettuate anche in altri tre cladodi di 1 anno collocati nella parte bassa delle piante, a circa 0,5 m dal suolo, riceventi una aliquota giornaliera di PAR (radiazione fotsinteticamente attiva) del 30%.

Attraverso l'equazione di Penman (Monteith *et al.*, 1965) è stata inoltre svolta un'analisi comparativa sui processi che controllano il trasferimento di energia. La conduttanza aereodinamica del vapore acqueo ( $g_a$ ) è stata calcolata dai dati di turbolenza come:

$$g_a^{-1} = \frac{u}{u^*} + \frac{1}{ku^*} \left( \ln \frac{Z_0}{Z_H} + \Psi_m - \Psi_H \right) \quad (6)$$

dove  $u$  ( $\text{m s}^{-1}$ ) è la velocità orizzontale del vento misurata ad un altezza di riferimento sopra la vegetazione,  $u^*$  ( $\text{m s}^{-1}$ ) è la velocità di frizione misurata dall'anemometro sonico,  $k$  è la costante di von Karman e  $Z_0/Z_H$  è il rapporto tra i parametri di scabrezza della vegetazione per il trasferimento delle quantità di moto ( $Z_0$ ) e di calore ( $Z_H$ ) (Verma, 1989). Il rapporto  $Z_0/Z_H$  è stato assunto pari a 10, tipico valore usato per la vegetazione omogenea (Garrat e Hicks, 1973), mentre  $\Psi_m$  e  $\Psi_H$  rappresentano i fattori di correzione adiabatica per il trasferimento di quantità di

moto e di calore rispettivamente (Paulson, 1970), calcolati con la formula di Businger-Dyer (Sugita e Brutsaert, 1990) per condizioni atmosferiche instabili (Businger, 1988). L'eq. 6 esprime la resistenza offerta dal sistema vegetazione-atmosfera al trasferimento dei flussi evapotraspirativi (o di vapore acqueo).

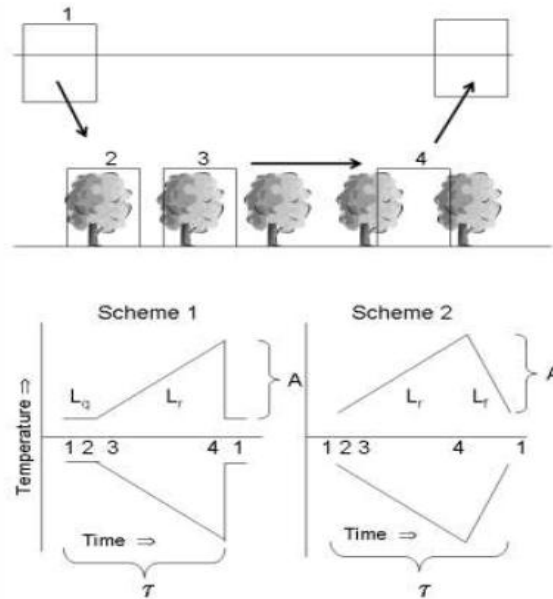


Figura 4. Modelli ideali di rampe di temperatura dove  $L_r$ ,  $L_q$  and  $L_f$  denotano, rispettivamente, riscaldamento, quiescenza e raffreddamento.  $A$  è l'ampiezza (positiva o negativa nei casi di atmosfera instabile o stabile rispettivamente),  $\tau$  è la durata della singola rampa.

### 3. Risultati

Durante le due stagioni vegetative oggetto di monitoraggio (484 giorni dal 4 giugno 2009 al 30 settembre 2010), i dati meteorologici registrati (Tabella 5) mostrano precipitazioni totali pari a 935 mm. Il periodo estivo delle due annate è ben rappresentato dal tipico modello semi-arido mediterraneo, caratterizzato da estati siccitose con elevata umidità relativa. L'evapotraspirazione di riferimento ( $ET_0$ ), in entrambi gli anni, è stata superiore alle piogge di circa due volte. La temperatura media giornaliera dell'aria è variata da  $13,2 \pm 5,2^\circ\text{C}$  a  $25,4 \pm 3,1^\circ\text{C}$ .

Il tasso di evaporazione dal suolo durante le due stagioni osservate è risultato pari al 26% di LE, corrispondente ad un valore di 0,64 e 0,63 mm al giorno rispettivamente nel 2009 e nel 2010.

In entrambe le stagioni, il flusso di calore dal suolo ( $G$ ) medio giornaliero è stato vicino allo zero. Il calore latente  $H$  è diminuito da valori di 9,3 rilevati a fine giugno a  $-1,5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ giorno}^{-1}$  in settembre, con un valore medio di  $5,2 \text{ MJ m}^{-2} \text{ giorno}^{-1}$ . La radiazione netta ( $R_n$ ) ha raggiunto valori medi di  $12 \text{ MJ m}^{-2} \text{ giorno}^{-1}$ . Il flusso di calore latente ( $LE$ ) medio è stato di  $6,2 \text{ MJ m}^{-2} \text{ giorno}^{-1}$ , con variazioni tra  $15,2$  e  $-1,8 \text{ MJ m}^{-2} \text{ giorno}^{-1}$ .

Nel corso della stagione estiva, la frazione evaporativa (energia disponibile che si trasforma in calore latente o evapotraspirazione) media ( $LE/R_n - G$ ) diurna è risultata del 50%, con una leggera variabilità (circa 6%) a seguito della presenza di copertura nuvolosa.

Durante condizioni atmosferiche stabili, quando l'energia disponibile ( $R_n - G$ ) risulta negativa, (approssimativamente dal tramonto all'alba), i flussi di  $H$  sono risultati molto modesti a seguito della mancata formazione delle rampe di temperatura. Durante la notte, i valori di  $LE$  (da risoluzione dell'equazione di bilancio energetico) sono risultati negativi. In particolare, nelle ore notturne, è stata rilevata una condizione di condensazione, dovuta all'incremento nei valori di umidità relativa dell'aria (anche superiori al 90%) e ai valori di temperatura dell'aria vicini a quelli relativi al punto di rugiada (dew point) (Figure 5 e 6).

I valori di  $H_{EC}$  e  $H_{SR}$  sono risultati ben correlati ( $R^2=0,92$ ); il valore di  $\alpha$  è risultato pari a 0,58 (Figura 7).

Per livelli di  $R_n$  di modesta intensità ( $< 250 \text{ W m}^{-2}$ ), l'inclinazione della retta di correlazione tra  $H$  ed  $R_n$  è stata simile a quella tra  $G$  ed  $R_n$ ; nel caso, invece, di elevati valori di  $R_n$ , le inclinazioni sono risultate maggiori e i dati più sparsi. In condizioni atmosferiche di instabilità (condizioni turbolente diurne) il calore sensibile  $H$  aumenta molto rapidamente a seguito dei più efficienti trasferimenti di energia per convezione.

I dati orari di  $ET_c$ ,  $ET_o$  e  $K_c$  sono stati confrontati durante le due stagioni irrigue e sono risultati molto simili (Figure 8 e 9). Nel 2009, l'evapotraspirazione effettiva della coltura è stata ottenuta come termine residuo dell'equazione di bilancio energetico, sia utilizzando  $H_{SR}$  sia  $H_{EC}$ . I risultati mostrano differenze poco significative (Figura 8).

I valori medi orari di  $K_c$  nei due anni sono stati pari a 0,53, 0,65, 0,63 e 0,60, rispettivamente, nel corso dei mesi di giugno, luglio, agosto e settembre. Così, il  $K_c$  medio stagionale è stato di 0,58 (in entrambi gli anni), mentre  $ET_c$  e  $ET_o$  medi giornalieri, durante il 2009, sono stati rispettivamente 2,5 e 4,2 mm. Nel 2010, invece i valori di  $ET_c$  ed  $ET_o$  sono risultati, rispettivamente, pari a 2,4 e 4,1 mm (Figure 8 e 9).

L'ET<sub>c</sub> complessiva durante il periodo di monitoraggio (4 giugno - 30 settembre) è stata di 290,3 mm nel 2009 e di 285,6 mm nel 2010. Attraverso i microlisimetri è stata misurata una quota evaporativa media dal suolo pari a 0,64 mm giorno<sup>-1</sup> nel 2009 e di 0,63 mm giorno<sup>-1</sup> nel 2010; i valori cumulati nei periodi di misurazione sono risultati rispettivamente 75,5 mm e 74,3 mm. La quantità d'acqua traspirata dalle piante è stata calcolata pari a 214,8 mm nel 2009 e di 211,2 mm nel 2010.

Ben correlati sono risultati anche i valori della temperature dell'aria e quella dei cladodi (Figura 10). I sensori inseriti nella parte interna dei cladodi, posizionati nella parte alta delle piante (esposizione massima), hanno registrato temperature superiori, mediamente di 4 – 5 °C, rispetto a quelle dell'aria, con valori massimi di 44°C. Le temperature interne dei cladodi poco esposti (parte bassa della pianta), invece, sono risultate in linea con quelle dell'aria (Figura 11).

I valori di g<sub>a</sub> sono solo parzialmente ben correlati con quelli di LE. Il valore medio della conduttanza aereodinamica è risultato di 0,03 m s<sup>-1</sup>, il linea con i valori riportati da San-Josè *et al.* (2007) e White *et al.* (2008) nei loro lavori per la medesima coltura.

Periodo	Precipitazioni (mm)	T (°C)	RH (%)	u (m s <sup>-1</sup> )	R <sub>n</sub> (W m <sup>-2</sup> )
<b>2009</b>					
<b>Giugno - Settembre</b>	120	25,4	67	1,8 ± 0,08	155,4 ± 36,9
<b>Ottobre - Dicembre</b>	395	14,8	84	1,3 ± 0,47	
<b>2010</b>					
<b>Gennaio - Maggio</b>	385	13,2	74,2	1,23 ± 0,99	
<b>Giugno - Settembre</b>	35	23,7	62,6	2,02 ± 0,09	160,7 ± 34,8
<b>Ottobre - Dicembre</b>	248	16,3	85	1,5 ± 0,68	

Tabella 5. Caratteristiche climatiche osservate durante le due stagioni vegetative in studio.

T: temperatura media giornaliera; RH: umidità relativa media giornaliera; u: velocità del vento (± e.s.); R<sub>n</sub>: valori medi giornalieri (± e.s.) di intensità di flusso radiativo. Le precipitazioni corrispondono al totale del periodo considerato.



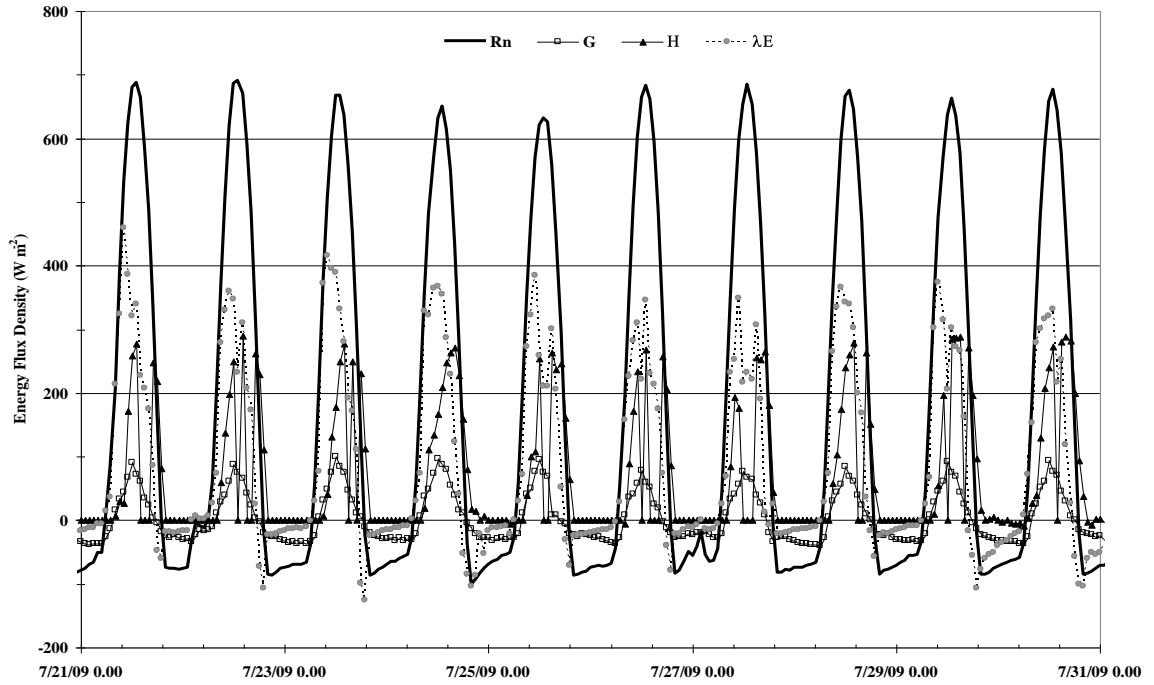


Figura 5. Diagramma dei valori orari delle componenti del bilancio energetico superficiale dal 21 al 31 luglio 2009 misurate nell'impianto di *Opuntia ficus-indica* oggetto del presente studio.

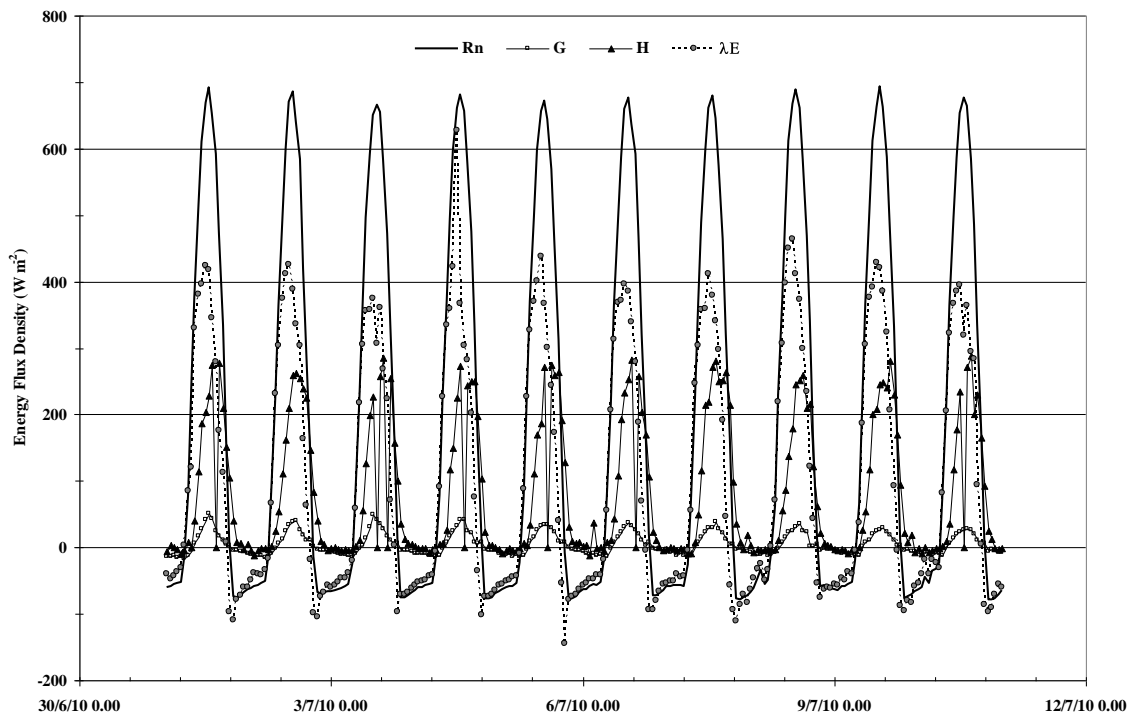


Figura 6. Diagramma dei valori orari delle componenti del bilancio energetico superficiale dall'1 all'11 luglio 2010 misurate nell'impianto di *Opuntia ficus-indica* oggetto del presente studio.

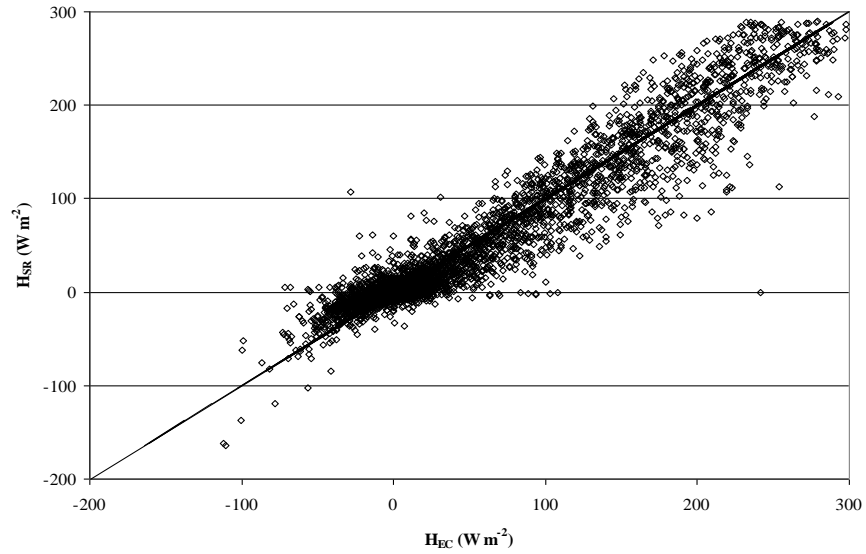


Figura 7. Correlazione tra flusso di calore sensibile misurato attraverso l'anemometro sonico ( $H_{EC}$ ) e flusso di calore sensibile stimato da SR ( $H_{SR}$ )

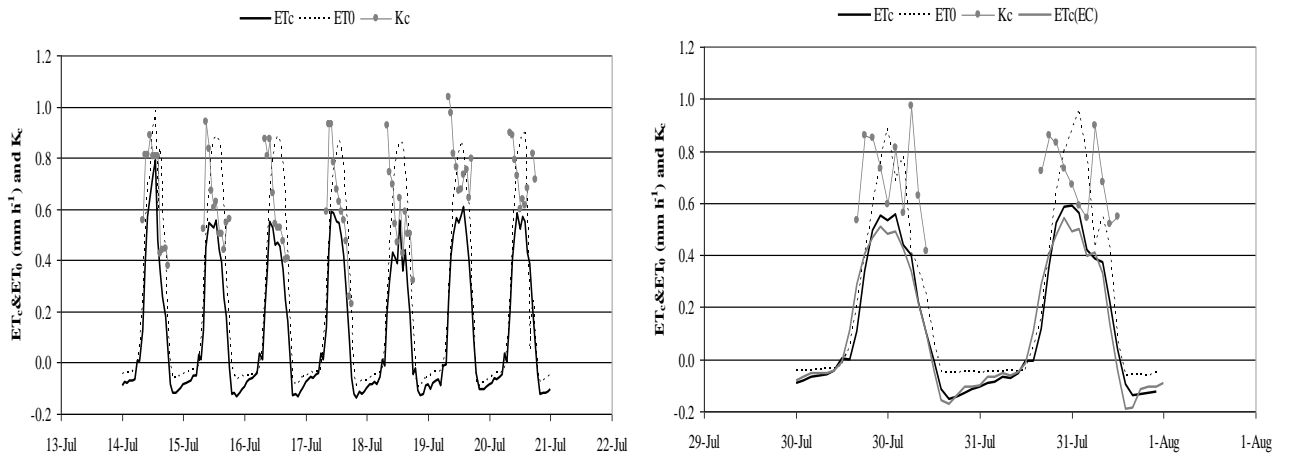


Figura 8. Diagramma dei valori orari di  $ET_o$ ,  $ET_c$  e  $K_c$  dal 14 al 21 luglio 2009. A destra le differenze tra i valori dei flussi di ET e  $K_c$  riscontrati utilizzando sia  $H_{SR}$  che  $H_{EC}$  per la risoluzione dell'equazione di bilancio

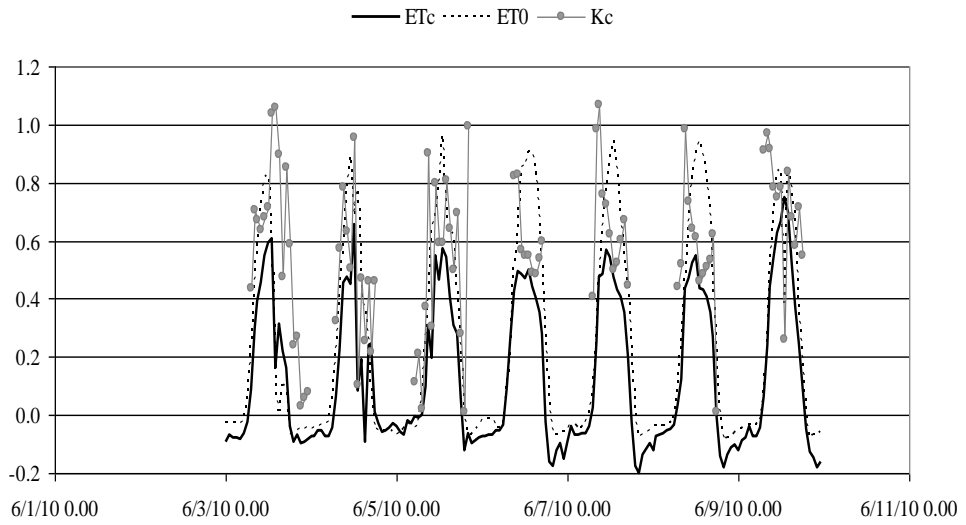


Figura 9. Diagramma dei valori orari di  $ET_0$ ,  $ET_c$  e  $K_c$  dal 3 al 10 giugno 2010

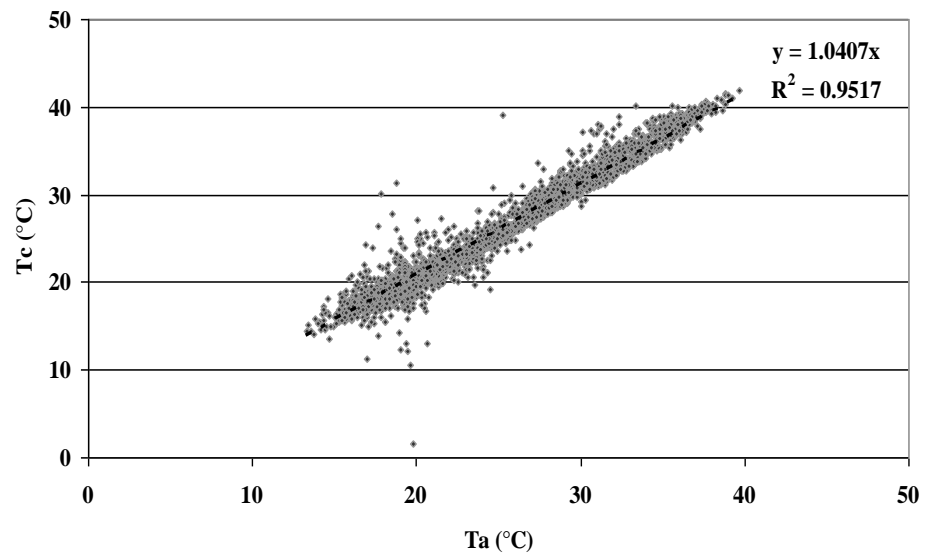


Figura 10. Correlazione tra i valori di temperatura della vegetazione ( $T_c$ ) e quelli dell'aria ( $T_a$ )

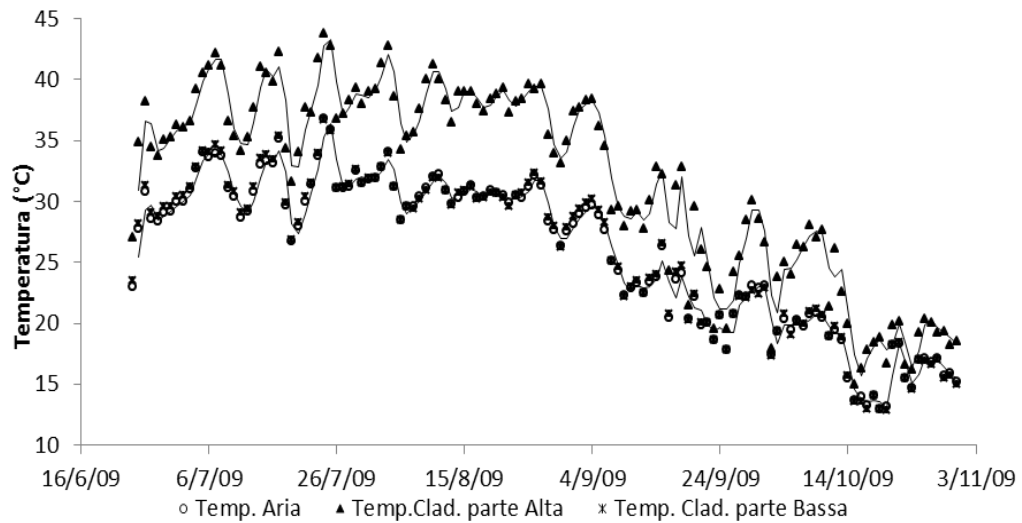


Figura 11. Andamento medio delle temperature diurne (valori medi registrati tra le 8:30 e le 18:30) dell'aria e delle temperature interne di 6 cladodi di 1 anno appartenenti a 3 piante di *Opuntia ficus-indica* riceventi il 100% (parte alta delle piante) e il 30% (parte bassa delle piante) del PAR totale, dal 24 giugno al 30 ottobre 2009.

#### 4. Discussione e conclusione

L'applicazione della tecnica Surface Renewal, nelle due stagioni osservate, è risultata idonea ed accurata per la stima dei flussi di calore sensibile nel ficodindieto in studio. Inoltre, il sistema micrometeorologico, messo a punto presso il sito in esame, è stato in grado di rilevare il ruolo della specie nel controllare la ripartizione dell'energia disponibile ( $R_n - G$ ) tra le varie componenti di bilancio (LE, H).

Va rilevato che nelle piante CAM semplici misure di contenuto idrico nel suolo hanno mostrato di non essere sufficienti al fine di valutare l'effettivo stato idrico della coltura, la quale, come è noto, immagazzina grandi quantità d'acqua nel tessuto parenchimatico dei cladodi, per indirizzarla, nei momenti di carenza idrica, verso il tessuto fotosintetico (clorenchima). La tecnica SR può costituire un valido approccio nell'individuazione degli effettivi fabbisogni irrigui della specie. Inoltre, a differenza di altri sistemi come ad esempio l'eddy covariance e il sistema lisimetrico, i costi non eccessivi e la relativa facilità nella installazione della strumentazione forniscono un'ulteriore motivazione di convenienza nell'utilizzo della SR.

Ulteriori studi potrebbero, sicuramente, consentire di definire lo stato fisiologico della coltura e gli scambi di energia attraverso il sistema continuo in esame. Inoltre, non esistono ancora informazioni precise riguardo le relazioni che intercorrono tra le varie fasi di accrescimento dei frutti e lo stato idrico della pianta. Gugliuzza *et al.* (2002) hanno mostrato come l'irrigazione accresce il peso fresco e la percentuale di frutti commercializzabili solo se si effettua anche il diradamento dei frutti. In ogni caso, la crescita e la pezzatura finale dei frutti risentono di eventuali carenze idriche ancora prima che queste si manifestino in qualsiasi altra parte della pianta; questo rende molto difficile l'individuazione di opportuni piani irrigui per accrescere la qualità dei frutti.

Nel corso delle due stagioni analizzate, il volume d'acqua irrigua distribuito è stato di 120 e 150 mm. Da giugno a settembre 2009 gli eventi meteorici sono stati di notevole intensità (120 mm); viceversa, nello stesso periodo del 2010 la quantità d'acqua apportata con le piogge (35 mm) è risultata in linea con il modello di clima mediterraneo caratterizzato da estati calde e asciutte. Sommando i quantitativi di acqua apportati al sistema tramite le irrigazioni e le piogge, nel 2009 l'acqua disponibile al sistema è risultata di 240 mm, pari al 82,7% del totale evapotraspirato. Nel 2010, invece, la restituzione complessiva (185 mm) è stata circa il 64,8% dell' $ET_c$ . Nonostante, durante il secondo anno di monitoraggio, l' $ET_c$  sia stata notevolmente superiore alla quantità di acqua disponibile, la qualità dei frutti non ha subito peggioramenti e la produzione si è mantenuta superiore a  $18 \text{ t ha}^{-1}$ .

L'irrigazione con deficit controllato (DI) è stata, per molte specie da frutto e non, studiata ed applicata come strategia di produzione delle colture in ambienti aridi e simiaridi. Ad esempio, la DI è stata applicata con successo nel pesco (Chalmers *et al.*, 1981; Goodwin *et al.*, 1998), nel melo (Lötter *et al.*, 1985; Mpelasoka *et al.*, 2001) e nell'olivo (Moriani *et al.*, 2003), dove sono state attuate restituzioni pari al 66% dell' $ET_c$  (Moriani *et al.*, 2003; Tognetti *et al.*, 2007). I dati ottenuti nel presente lavoro ed i meccanismi di risparmio idrico e di sostentamento dei parametri produttivi a bassi livelli di stress, come ad esempio il passaggio di acqua dai tessuti di riserva (parenchima) verso quelli di produzione (clorenchima), potrebbero suggerire l'ipotesi di adottare tale strategia anche per il ficodindia. Ad ogni modo tali strategie dovrebbero essere ottimizzate rispetto la qualità dei frutti e la rifioritura durante il secondo flusso di vegetazione.



**Flussi di CO<sub>2</sub> in Piante Intere e Singoli Cladodi di  
*Opuntia ficus-indica* L. (Mill.)**

## 1. Introduzione

Nonostante si possano trovare, in letteratura, diversi lavori sulla biologia ambientale e sugli scambi gassosi in OFI (Nobel, 1988; De la Barrera e Smith, 2009), non esistono dati di accumulo della CO<sub>2</sub> che integrino piante intere, formate quindi da cladodi di età diverse. Molte delle misurazioni effettuate sono riferibili a singoli cladodi allevati in ambiente controllato, per i quali poche o nessuna interazione sussisteva tra organi della stessa pianta. La risposta della pianta ai fattori ambientali, sebbene nota, non è esaustiva se si considera che in pieno campo, diversamente da quanto avviene in ambiente controllato, le interazioni tra i fattori abiotici, descritte da sistemi estremamente complessi, sono molto difficili da definire, come lo sono i tipi di risposta delle piante ad essi. Sono inoltre poche le informazioni riguardanti i diversi potenziali di accumulo dell'anidride carbonica in relazione all'età dei cladodi e quelli disponibili integrano l'effetto dell'età con quello della posizione subterminale, con profili luminosi del tutto diversificati (Samish e Ellern, 1975).

L'obiettivo di questo esperimento consiste nel determinare, attraverso misure in continuo, i tassi di accumulo giornaliero della CO<sub>2</sub> in intere piante di 3 anni di *Opuntia ficus-indica*, in condizioni sia di ampia disponibilità che di carenza idrica. Inoltre sono stati misurati i potenziali di accumulo di cladodi di 1 e 2 anni di età in piante di 8 anni allevate in pieno campo, in posizione terminale e riceventi la stessa densità di flusso fotosintetico.

## 2. Materiali e metodi

L'obiettivo di tesi è stato quello di misurare il potenziale di assorbimento netto di CO<sub>2</sub> in:

- piante intere di *Opuntia ficus-indica* cultivar “Gialla” allevate in vaso in relazione allo stato idrico;
- singoli cladodi di 1 e 2 anni.

I rilievi sono stati effettuati in un sito sperimentale situato presso i campi del Dipartimento DEMETRA dell'Università degli Studi di Palermo (38°06' N, 13°21' E, 40 m s.l.m.) durante la stagione vegetativa del 2010. Le misure riguardanti gli scambi di anidride carbonica sono state condotte utilizzando un IRGA portatile con la metodologia a sistema aperto (Corelli Grappadelli

e Magnanini, 1993; Francesconi *et al.*, 1997), ovvero con palloni applicati ad intere piante o singoli cladodi. I palloni, costituiti da polietilene tereftalato (nome commerciale *Milar*, 95% di trasparenza), sono stati fissati sulle piante o su porzioni di esse durante le ore del primo (piante intere) o del tardo pomeriggio (cladodi di 1 e 2 anni). Un flusso di aria costante è stato immesso nei palloni attraverso ventilatori a centrifuga alimentati da motori elettrici, di capacità pari a 6 - 10 l s<sup>-1</sup> (litri secondo<sup>-1</sup>), portanti tubi di conduzione in PVC di 2 metri di lunghezza e 5,4 cm di diametro interno. Misure di flusso dell'aria sono state condotte ogni ora nel punto medio dei tubi di conduzione attraverso un anemometro a filo caldo portatile (Testo 405-V1, Testo S.p.a., Italy). La velocità dell'aria è stata rilevata, lungo il diametro trasversale dei tubi, in 3 punti differenti: posizionando cioè la testina dell'anemometro nel punto centrale e ad 1 cm circa dai bordi di entrambi i lati, e supponendo che la velocità del flusso lungo il diametro interno dello stesso tubo fosse uguale a zero. La portata volumetrica d'aria è stata calcolata moltiplicando la velocità media dell'aria rilevata attraverso le 2 misure orarie effettuate con l'anemometro per l'area della sezione interna dei tubi. La portata è stata inoltre verificata anche attraverso l'utilizzo di un venturimetro (FMD-01, GMR Strumenti, Firenze, Italy). La concentrazione di CO<sub>2</sub> in entrata e uscita dai palloni è stata misurata attraverso un analizzatore di gas ad infrarossi (IRGA) (CIRAS-1, PP-Systems, Hitchin Herts, UK). Le misure giornaliere sono state effettuate dalle ore 14:00 con cicli di 24 ore. Le misure condotte su singoli cladodi sono state effettuate dalle ore 20:00 con cicli di 12 h. Le concentrazioni di anidride carbonica in entrata ed uscita sono state rilevate contemporaneamente su 6 palloni per mezzo di un campionatore costruito in laboratorio e controllato da un data-logger (CR1000, Campbell Scientific Ltd., Logan, USA) che ha permesso l'alternanza dei rilievi, in modo tale da ottenere 6 misure da 10 minuti per ogni ora.

Il tasso di assimilazione della CO<sub>2</sub> "A" (μmol s<sup>-1</sup>) è stato calcolato usando la seguente equazione (Alterio *et al.*, 2006):

$$A = F * \Delta CO_2$$

dove "F" è il flusso molare d'aria (mol s<sup>-1</sup>) immesso nei palloni; "ΔCO<sub>2</sub>" è la differenza tra le concentrazioni di CO<sub>2</sub> (μmol mol<sup>-1</sup>) rilevate dall'IRGA in entrata e in uscita dai palloni.

Il "time reading" del CIRAS-1 è stato settato su 1 minuto, in modo tale che in ognuno dei 6 palloni fossero effettuate 10 misure in 10 minuti. La media oraria è stata infine calcolata moltiplicando il valore medio derivante dalle 10 misurazioni per 3600 (il numero dei secondi in



un ora). L'accumulo netto giornaliero di CO<sub>2</sub> è stato calcolato integrando i valori orari delle 24 ore di rilievo (Nobel, 1988).

Nei giorni in cui sono state svolte le misurazioni, il flusso fotonico fotosintetico (PPF;  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) è stato misurato ogni ora attraverso un piranometro portatile (LI-190, LI-COR, Lincoln, NE, USA). I valori orari ottenuti sono stati infine integrati per determinare la radiazione fotosintetica attiva (PAR) giornaliera ( $\text{mol m}^{-2} \text{giorno}^{-1}$ ).

I dati sono infine stati sottoposti ad analisi della varianza (ANOVA) e le medie confrontate tramite il test di Tukey ( $P \leq 0,05$ ). Le analisi statistiche sono state condotte utilizzando Systat 10 (Systat, USA).

### ***2.1. Piante intere allevate in vaso in relazione allo stato idrico***

#### *Scambi di CO<sub>2</sub>*

Le misure relative agli scambi di CO<sub>2</sub> di sei piante di OFI di 3 anni allevate in vaso sono state effettuate:

- su tre piante irrigate (tesi in irriguo) nelle quali il contenuto di acqua nel terreno è stato mantenuto su valori compresi tra il 70% e il 90% della capacità di campo;
- su altre tre piante, tenute costantemente in asciutto, dal 3 giugno al 12 agosto 2010.

I rilievi sono stati effettuati 0, 1, 3, 6, 8 settimane dopo la sospensione delle irrigazioni nelle piante appartenenti alla tesi in asciutto, ovvero dal 4 giugno al 2 agosto 2010. Il 12 agosto, è stata effettuata, nella tesi in asciutto, un'irrigazione di soccorso. Un ultimo rilievo è stato eseguito, due settimane dopo la reidratazione delle piante, per valutare la capacità di recupero delle piante della tesi in asciutto.

Le piante sono state poste in vasi di poliestere da 250 litri nel mese di marzo. Il suolo è di tessitura franco-argillosa con una capacità di campo pari al 26,3% (contenuto idrico volumetrico,  $\theta$ , corrispondente ai potenziali  $h = -330$  cm) ed un punto di appassimento uguale al 12,3% (contenuto idrico volumetrico,  $\theta$ , corrispondente ai potenziali  $h = -15300$  cm).

Nei mesi di maggio e settembre, è stata calcolata la superficie totale (entrambi i lati) delle piante (tutti i cladodi) attraverso delle repliche di carta nelle quali è stata tracciata, e successivamente misurata in laboratorio attraverso un Leaf Area Meter (Delta-T Devices LTD, Cambridge, UK), la sagoma di ciascun cladodio. Le piante irrigate avevano  $12 \pm 0$  cladodi di 1 anno, mentre quelle

in asciutto  $10 \pm 1$  cladodi di 1 anno. Il numero dei cladodi di nuova formazione, provenienti dal flusso primaverile dei cladodi di 1 anno, è stato mantenuto pari a  $3 \pm 1$  in entrambe le tesi. Tutte le gemme a fiore formatesi nei flussi primaverile ed estivo e i nuovi cladodi del flusso estivo, sono stati rimossi al momento della loro formazione. Temperatura e umidità relativa dell'aria sono state costantemente monitorate attraverso sensori meteorologici (HOBO H-08, Onset, Bourne, MA, USA) posizionati a breve distanza dalle piante. Il contenuto d'acqua volumetrico del terreno è stato misurato attraverso rilevatori di umidità (EC-10 Soil Moisture Smart Sensor - S-SMB-M005, Onset, Bourne, MA, USA). Inoltre ogni 15 giorni, un campione di terra per ogni vaso è stato posto in stufa ventilata (M-250-VF, MPM Instruments srl, Bernareggio, Italy) per verificarne il contenuto idrico (differenza tra peso fresco e peso secco). Il flusso fotonico fotosintetico è stato misurato, in ogni pianta, con cadenza oraria, poggiando il sensore di luce su due cladodi scelti come riferimento, esposti uno in direzione Nord-Sud e l'altro in direzione Est-Ovest, ed in seguito indirizzando il sensore allo zenit. I valori orari calcolati in ciascuna pianta sono stati ottenuti mediando i flussi fotonici rilevati nelle cinque misure (Nord, Sud, Est, Ovest e zenit) ed il PAR giornaliero calcolato come descritto in precedenza. Gli scambi di  $CO_2$  sono stati misurati, attraverso un IRGA, come descritto in precedenza.

#### *Accumulo di peso fresco e peso secco nei cladodi di 1 e 2 anni*

Il 12 giugno, 12 luglio, 28 luglio e 29 agosto 2010, tra le 9:00 e le 10:00 del mattino, tre campioni (un cladodio dell'anno, uno di 1 anno e uno di 2 anni) sono stati prelevati in ognuna delle piante appartenenti alle due tesi utilizzando un succhiello di 1,4 cm di diametro; le parti di tessuto vegetale campionate sono state quindi separate, con un bisturi, per ottenere porzioni di parenchima e clorenchima, pesate individualmente e messe in stufa ventilata (M-250-VF, MPM Instruments srl, Bernareggio, Italy) fino al raggiungimento del peso costante, al fine di misurarne il peso fresco e secco. Il prelievo dei campioni è avvenuto sempre sugli stessi cladodi, nella zona centrale. I fori sono stati ricoperti con mastice per innesti per evitare perdite di acqua dai tessuti.

#### **2.2. Scambi di $CO_2$ in singoli cladodi di 1 e 2 anni**

Da maggio a settembre 2010 sono state effettuate sette misure di scambi di anidride carbonica in tre cladodi di 1 anno e tre di 2 anni al fine di valutare differenze nei tassi di assorbimento e quindi di efficienza fotosintetica. I sei cladodi, selezionati su tre piante (un cladodio di 1 anno e

uno di 2 anni in ogni pianta) di 8 anni allevate in pieno campo, con forma di allevamento a globo, presso un sito sperimentale del Dipartimento DEMETRA, sono stati scelti in posizione terminale. All'inizio e alla fine della stagione vegetativa, attraverso repliche di carta, è stata misurata la superficie fogliare dei cladodi selezionati per mezzo di un Leaf Area Meter (Delta-T Devices LTD, Cambridge, UK). Temperatura e umidità relativa dell'aria sono state rilevate attraverso sensori meteorologici (HOBO H-08, Onset, Bourne, MA, USA).

Le misure, effettuate attraverso un IRGA secondo il metodo a sistema aperto precedentemente descritto, sono iniziate, nelle date di rilievo, alle ore 20:00 e si sono concluse il mattino seguente alle ore 8:00. Il PPF è stato misurato ogni ora attraverso sensori poggiati su entrambe le facce di ciascun cladodio ed il PAR giornaliero calcolato integrando i dati orari.

### **3. Risultati**

#### ***3.1. Piante intere allevate in vaso in relazione allo stato idrico***

##### *Scambi di CO<sub>2</sub>*

All'inizio dell'esperimento la superficie dei cladodi di 1 e 2 anni delle piante appartenenti alle due tesi è risultata simile: 7974 cm<sup>2</sup> and 7536 cm<sup>2</sup> rispettivamente nelle piante irrigate ed in quelle non irrigate. Alla fine di agosto, ovvero due settimane dopo l'irrigazione di soccorso effettuata nella tesi non irrigata, la superficie complessiva dei cladodi dell'anno sia nelle piante irrigate che in quelle mantenute in asciutto era rispettivamente di 4644 cm<sup>2</sup> e 3036 cm<sup>2</sup>, ovvero maggiore del 24% e del 33% rispetto alla superficie totale delle piante all'inizio della stagione. La media delle temperature registrate (giorno/notte) sono variate da 27/18°C il 3 giugno a 30/25°C il 15 agosto, con medie di 29/19°C il 29 giugno, 32/24°C il 15 luglio e 31/25°C l'1 agosto. Il contenuto volumetrico di acqua nel suolo è variato, nella tesi non irrigata, dal 18% del 4 giugno al 6, 5 e 2% dei rilievi effettuati il 20 giugno, il 16 luglio ed l'1 agosto. Il PPF ha subito un costante incremento dall'inizio di giugno (25 mol m<sup>-2</sup> giorno<sup>-1</sup>) alla metà di agosto, quando ha raggiunto valori di 39,2 mol m<sup>-2</sup> giorno<sup>-1</sup>.

Durante il primo rilievo, il 4 giugno, tutte le piante presentavano un contenuto volumetrico di acqua nel suolo non inferiore al 18%; Le differenze dei tassi di assorbimento istantanei di CO<sub>2</sub>, così come quelli giornalieri, non sono risultate maggiori del 15%. Il tasso di accumulo istantaneo

medio di anidride carbonica è stato pari a  $3,5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , corrispondente ad un accumulo giornaliero di  $138,6 \text{ mmol m}^{-2} \text{giorno}^{-1}$  (dato non mostrato).

Il 25 giugno, tre settimane dopo il primo rilievo, il contenuto volumetrico di acqua nei vasi delle piante appartenenti alla tesi non irrigata mostrava valori inferiori del 50% rispetto al punto di appassimento. L'accumulo di  $\text{CO}_2$  della tesi in asciutto, a questo stadio, è stato inferiore del 25% rispetto quello delle piante irrigate. I tassi di accumulo medio sono stati, infatti, di  $4,4 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  e  $3,3 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  rispettivamente nella tesi in irriguo ed in quella in asciutto, corrispondenti a valori di assorbimento giornaliero pari a  $174,6 \text{ mmol m}^{-2} \text{giorno}^{-1}$  e  $130,7 \text{ mmol m}^{-2} \text{giorno}^{-1}$  (Figura 13).

Il 16 luglio 2010, sei settimane dopo la sospensione delle irrigazioni, il contenuto di acqua nei vasi della tesi non irrigata è risultato del 5%. L'accumulo istantaneo medio notturno di  $\text{CO}_2$  è stato di  $6,1 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  nella tesi irrigua e  $4,1 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  nella tesi in asciutto (Figura 14), con valori giornalieri pari a  $242 \text{ mmol m}^{-2} \text{giorno}^{-1}$  e  $156,8 \text{ mmol m}^{-2} \text{giorno}^{-1}$ . L'accumulo medio istantaneo notturno nelle piante in stress idrico è stato inferiore del 33% rispetto a quello della tesi irrigata.

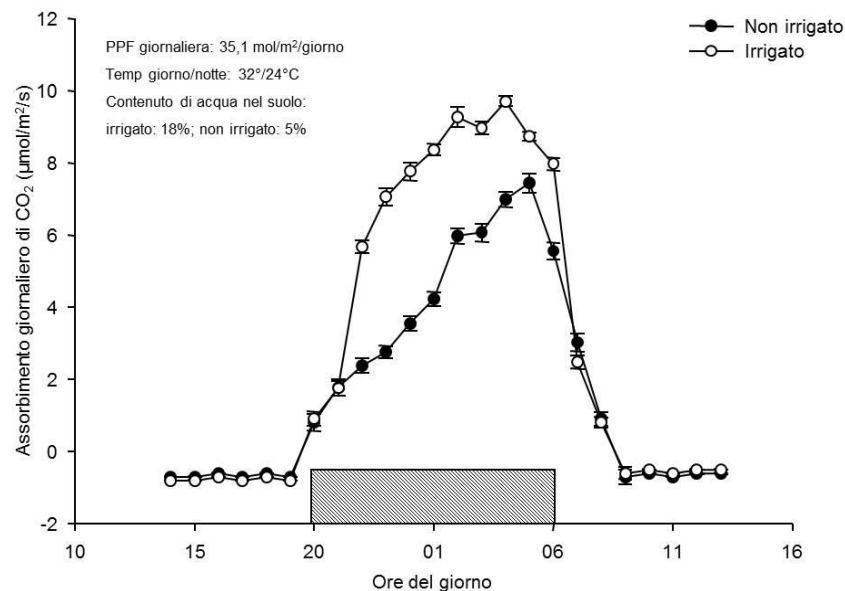


Figura 13. Assorbimento medio giornaliero di  $\text{CO}_2$ , misurato su piante di *Opuntia ficus-indica*, irrigue e sottoposte a stress idrico. La misura è stata effettuata il 25 giugno 2010, 21 giorni dopo l'interruzione dell'irrigazione nella tesi in asciutto. Ogni punto rappresenta la media oraria ( $\pm$  e.s.) delle tre piante appartenenti ad ognuna delle due tesi.

L'1 agosto, otto settimane dopo l'inizio dei rilievi, i valori istantanei di assorbimento notturno di  $\text{CO}_2$  sono risultati, nella tesi non irrigata, inferiori del 45% rispetto quelli nella tesi in irriguo,

ovvero pari a  $4,4 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , contro i  $7,6 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  misurati nelle piante non stressate (Figura 15). L'accumulo giornaliero è stato di  $173,8 \text{ mmol m}^{-2} \text{ giorno}^{-1}$  nelle piante della tesi non irrigata e di  $302,9 \text{ mmol m}^{-2} \text{ giorno}^{-1}$  in quella in irriguo.

Nel corso dei rilievi effettuati, in entrambe le tesi, all'aumentare delle temperature sono proporzionalmente aumentati anche i tassi istantanei e giornalieri di accumulo di anidride carbonica. I valori istantanei di accumulo notturno sono stati sempre superiori nelle prime ore della notte, in particolare fino alle 3:00.

Due settimane dopo l'irrigazione di soccorso effettuata il 12 agosto nella tesi in asciutto (27 agosto), l'assorbimento notturno di  $\text{CO}_2$  è stato pari a  $6,6 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  nelle piante della tesi non irrigata e di  $7,9 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  nelle piante della tesi in irriguo, con temperature di  $23^\circ/16^\circ\text{C}$ . Dopo una sola irrigazione di soccorso, quindi, le piante della tesi in asciutto hanno mostrato una grande capacità di recupero, con valori istantanei di accumulo inferiori del 16,5% rispetto a quelli misurati nella tesi in irriguo, probabilmente legati alla diversa superficie fotosinteticamente attiva dei cladodi nelle piante in asciutto e in irriguo.

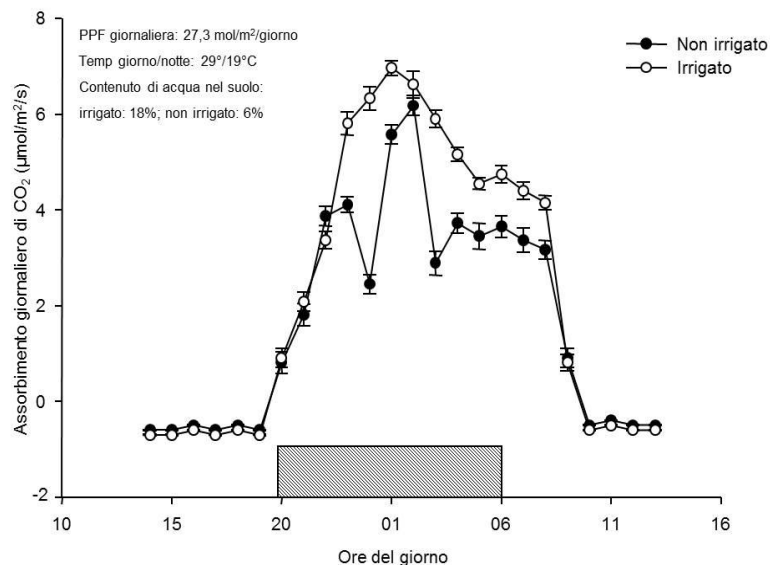


Figura 14. Assorbimento medio giornaliero di  $\text{CO}_2$ , misurato su piante di *Opuntia ficus-indica*, irrigue e sottoposte a stress idrico. La misura è stata effettuata il 16 luglio 2010, 42 giorni dopo l'interruzione dell'irrigazione nella tesi in asciutto. Ogni punto rappresenta la media oraria ( $\pm$  e.s.) delle tre piante appartenenti ad ognuna delle due tesi.

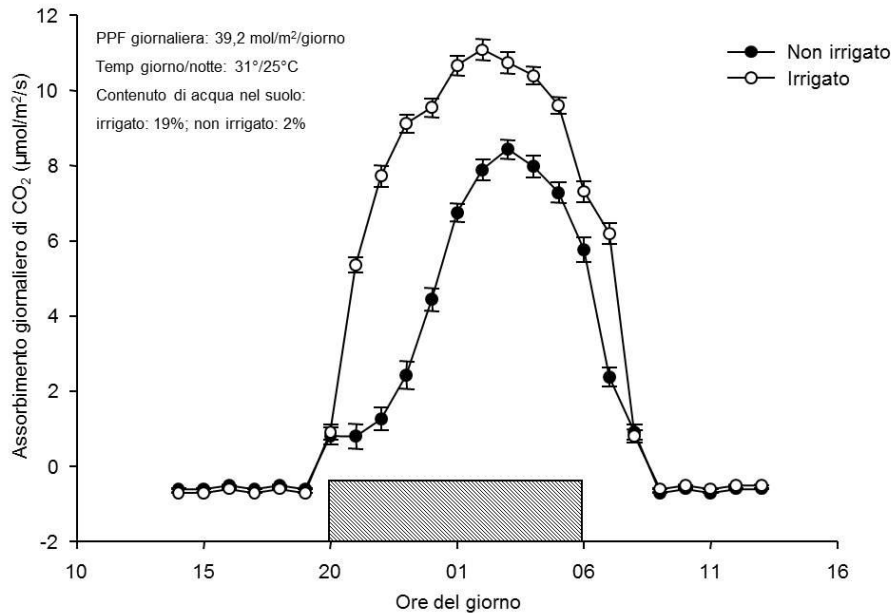


Figura 15. Assorbimento medio giornaliero di CO<sub>2</sub>, misurato su piante di *Opuntia ficus-indica*, irrigate e sottoposte a stress idrico. La misura è stata effettuata l'1 agosto 2010, 58 giorni dopo l'interruzione dell'irrigazione nella tesi in asciutto. Ogni punto rappresenta la media oraria ( $\pm$  e.s.) delle tre piante appartenenti ad ognuna delle due tesi.

#### *Accumulo di peso fresco e peso secco nei cladodi di 1 e 2 anni*

All'inizio dell'esperimento, ovvero nella prima data di rilievo, non sono state osservate differenze statistiche in termini di peso fresco (PF) e secco (PS) nei campioni dei cladodi di 1 e 2 anni prelevati tramite succhiello (Figure 16 e 17). Nel corso della stagione il peso fresco dei cladodi di 1 e 2 anni delle piante irrigate è aumentato del 15% e del 50% rispettivamente, mentre, nelle piante non irrigate, è risultato minore del 60% e del 45% (Figura 16 a, b). Nelle piante in stress idrico, il peso fresco del parenchima dei cladodi di 1 e 2 anni è diminuito rispettivamente del 65% e del 55%, mentre nelle piante irrigate ha subito un incremento del 20% nei cladodi di 1 anno e del 70% in quelli di 2 anni (Figura 16 a, b). Nelle piante irrigate, il peso fresco del parenchima non è variato significativamente; in quelle non irrigate, invece, è diminuito del 45% nei cladodi di 1 anno e del 30% nei cladodi di 2 anni (Figura 16 a, b). Durante lo stesso periodo, nelle piante irrigate, la massa secca dei cladodi di 1 anno non ha subito significative variazioni, mentre, nei cladodi di 2 anni, si è verificato un incremento di peso secco del 60%, dovuto principalmente ad un raddoppio del PS dei tessuti parenchimatici (Figura 17 a, b). In realtà, nelle piante irrigate, il parenchima dei cladodi di 2 anni è risultato maggiore di 2,5 volte rispetto a quello dei cladodi di 1 anno (Figura 17 a, b), mentre, sempre in termini di peso

secco, non ci sono state variazioni significative nei cladodi di 1 e 2 anni delle piante non irrigate (Figura 17 a, b).

Alla fine del periodo di secca, il peso fresco dei cladodi dell'anno delle piante in irriguo è risultato circa 2,5 volte maggiore rispetto a quello delle piante in asciutto (Figura 18 a). I giovani cladodi delle piante in stress idrico, in questa fase, non hanno mostrato alcun tessuto parenchimatico (Figura 18 a, b); il PF e il PS del clorenchima, invece, non è risultato significativamente differente nelle due tesi (Figura 18 a, b). I campionamenti svolti quindici giorni dopo l'irrigazione di soccorso (effettuata il 12 agosto) hanno mostrato una completa reidratazione dei tessuti nei cladodi delle piante della tesi in asciutto. Infatti, le differenze tra i tessuti dei cladodi dell'anno, 1 anno e 2 anni delle due tesi non sono state superiori al 10% (dato non mostrato).

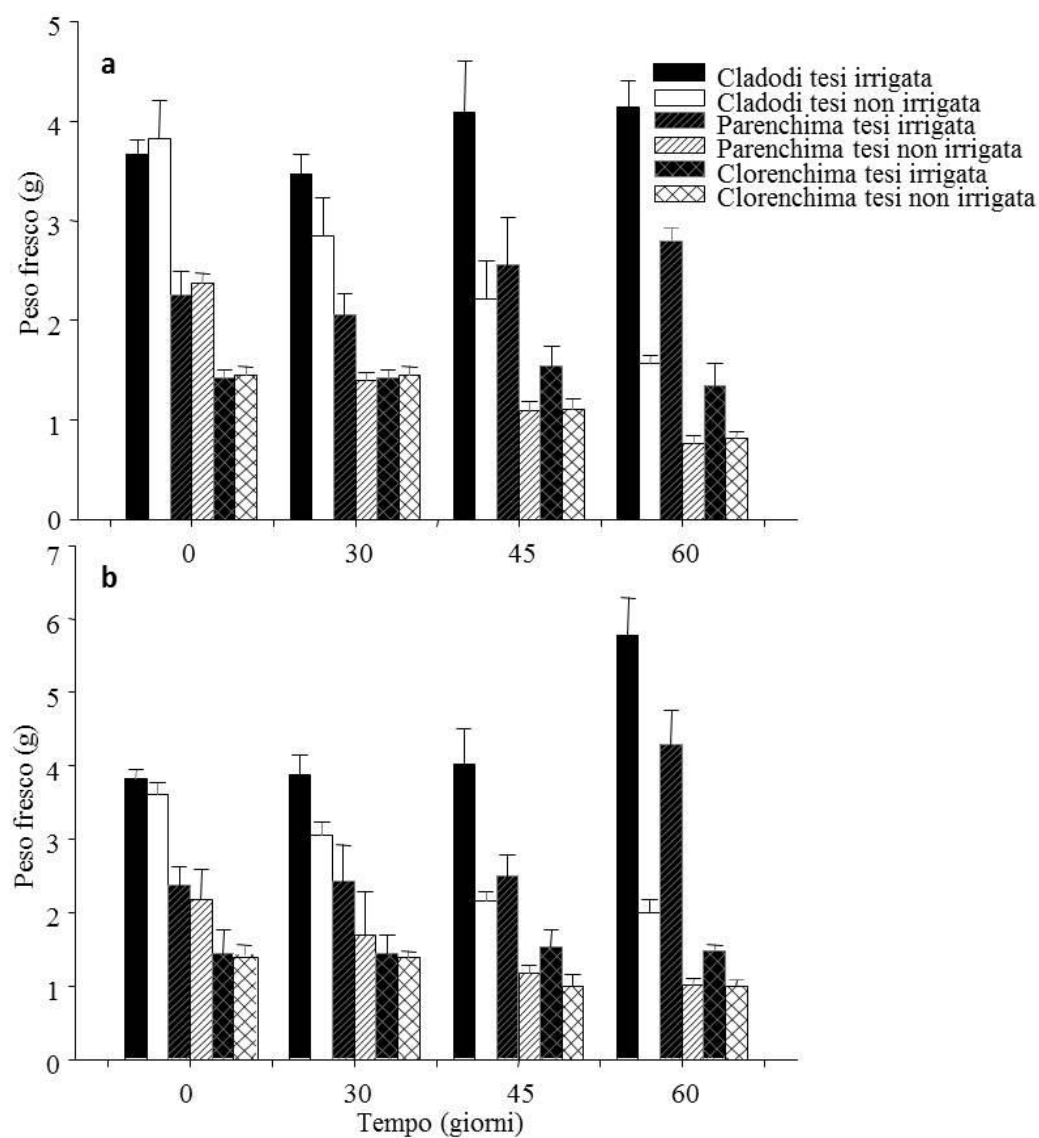


Figura 16. Peso fresco medio ( $\pm$  e.s.) di porzioni di tre cladodi di 1 anno (a) e di 2 anni (b), appartenenti a piante di *Opuntia ficus-indica* in asciutto e in irriguo nelle quattro date di rilievo. I prelievi sono stati effettuati per mezzo di un succhiello di 1,4 cm in data 12 giugno, 12 luglio, 28 luglio e 12 agosto 2010.



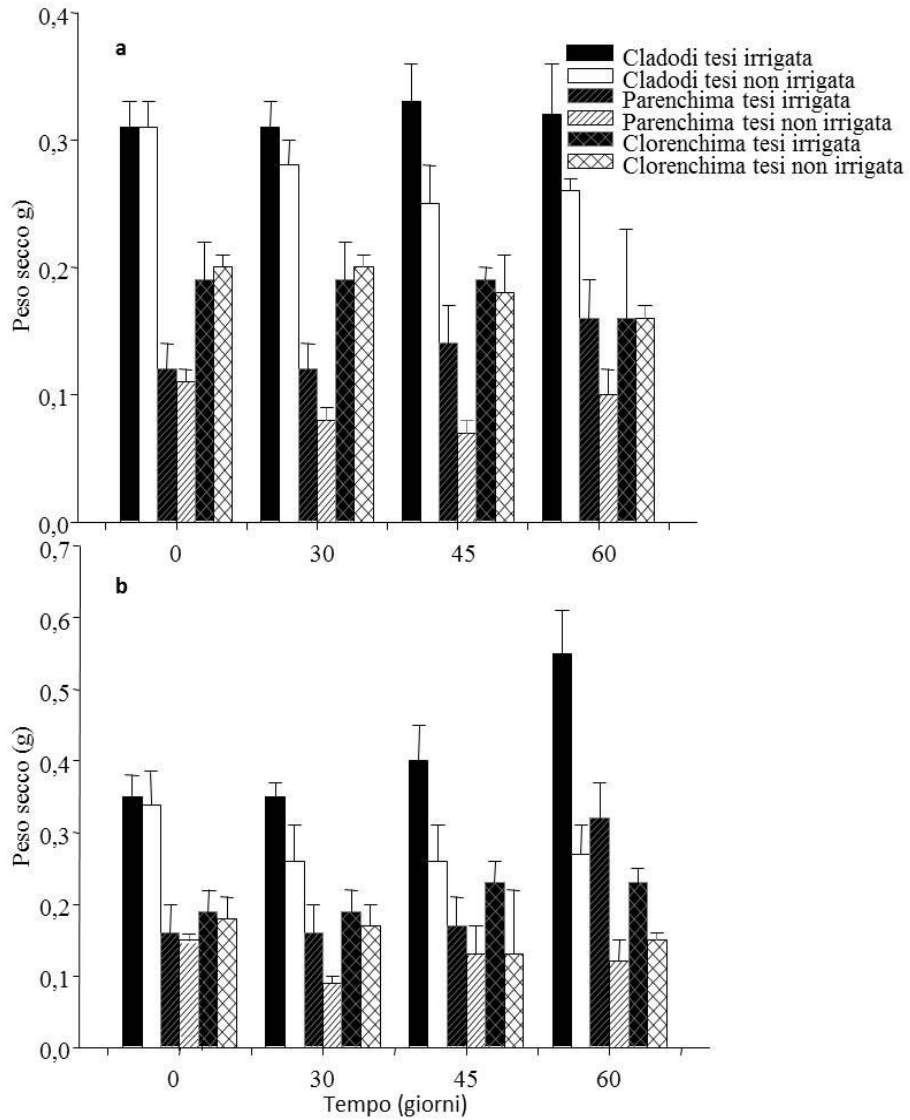


Figura 17. Peso secco medio ( $\pm$  e.s.) di porzioni di tre cladodi di 1 anno (a) e di 2 anni (b), appartenenti a piante di *Opuntia ficus-indica* in asciutto e in irriguo nelle quattro date di rilievo. I prelievi sono stati effettuati per mezzo di un succhiello di 1,4 cm in data 12 giugno, 12 luglio, 28 luglio e 12 agosto 2010.

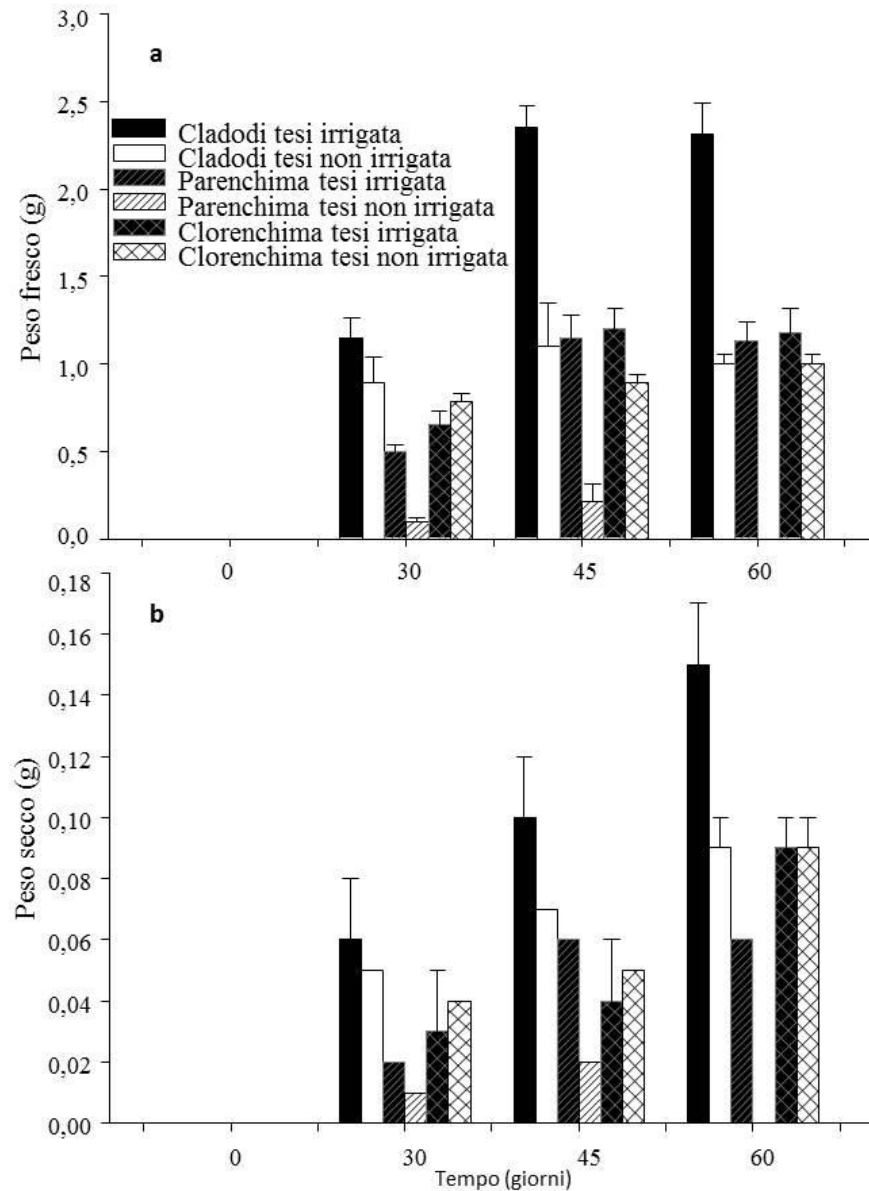


Figura 18. Peso fresco medio (a) e peso secco medio (b) ( $\pm$  e.s.) di porzioni di tre cladodi dell'anno, appartenenti a piante di *Opuntia ficus-indica* in asciutto e in irriguo nelle quattro date di rilievo. I prelievi sono stati effettuati per mezzo di un succhiello di 1,4 cm in data 12 giugno, 12 luglio, 28 luglio e 12 agosto 2010.

### 3.2. Scambi di CO<sub>2</sub> in singoli cladodi di 1 e 2 anni

L'accumulo medio notturno di CO<sub>2</sub> nei cladodi di 1 e 2 anni, nel periodo compreso tra la prima e l'ultima data di misure (114 giorni), è risultato rispettivamente di 458,6 mmol m<sup>-2</sup> giorno<sup>-1</sup> e 382,3 mmol m<sup>-2</sup> giorno<sup>-1</sup> (Tabella 6). Durante tale periodo, il sequestro di carbonio medio dei cladodi di 1 e 2 anni è stato di 5,2 g m<sup>-2</sup> giorno<sup>-1</sup> e 4,5 g m<sup>-2</sup> giorno<sup>-1</sup>, ovvero di 592,8 g C m<sup>-2</sup> e di 513 g C m<sup>-2</sup> durante i 114 giorni considerati. Differenze significative in termini di potenziale di accumulo di anidride carbonica in relazione all'età dei cladodi si sono verificate soltanto nei rilievi effettuati in luglio e agosto (Tabella 6). Nei cladodi di 1 anno si è inoltre evidenziata un'alta correlazione tra l'accumulo notturno di CO<sub>2</sub> e il PPF giornaliero ( $R^2 = 0,72$ ). Per i cladodi di 2 anni, invece, tale correlazione è risultata piuttosto bassa ( $R^2 = 0,32$ ) (dato non mostrato), indicando che i cladodi di 1 anno hanno una più alta efficienza fotosintetica rispetto quelli di 2 anni. I tassi di assimilazione istantanei di maggiore intensità si sono verificati dalle 24:00 alle 04:00 sia nei cladodi di 1 anno che in quelli di 2 anni (Figura 19); questi non sono stati significativamente diversi nei cladodi di 1 e 2 anni. Le maggiori differenze nell'assorbimento di CO<sub>2</sub> tra cladodi di età diversa si sono riscontrate, invece, nelle prime ore della notte (Figura 19).

Data	Accumulo medio CO <sub>2</sub>		PPF giornaliero (mol m <sup>-2</sup> giorno <sup>-1</sup> )	Temperature medie (°C)
	(mmol m <sup>-2</sup> giorno <sup>-1</sup> )			
	1 anno	2 anni		
<b>21 maggio</b>	314 ns	349	25,5	17
<b>4 giugno</b>	610 ns	502	27,3	16
<b>8 giugno</b>	619 ns	585	31,2	21
<b>16 luglio</b>	564 a	418 b	35,2	24
<b>5 agosto</b>	554 a	344 b	39,0	24
<b>2 settembre</b>	282 ns	246	28,2	20
<b>17 settembre</b>	311 ns	198	28,5	18

Tabella 6. Accumulo notturno di CO<sub>2</sub> in cladodi di 1 e 2 anni nelle date di rilievo in relazione a PPF e temperature medie notturne. Ogni dato rappresenta la media di tre cladodi. Le diverse lettere tra le colonne indicano differenze significative nell'accumulo totale di CO<sub>2</sub> per  $P < 0,01$  tramite test di Tukey (ns: non significative).

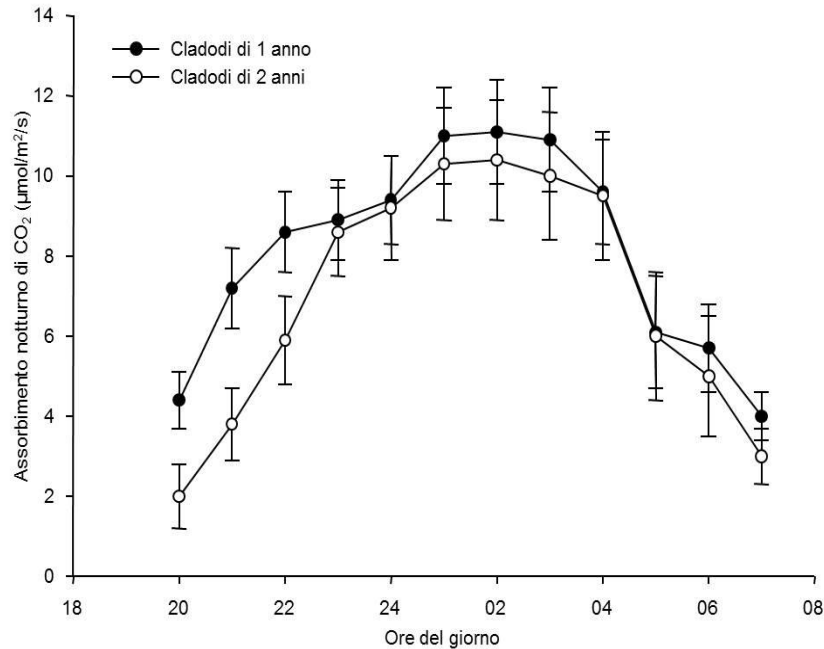


Figura 19. Accumulo medio stagionale di CO<sub>2</sub> in cladodi di 1 e 2 anni appartenenti a piante di *Opuntia ficus-indica* di 8 anni allevate in pieno campo. Ogni punto rappresenta la media ( $\pm$  e.s.) oraria nelle sette date di rilievo. Ciascuno dei sette valori componenti la media oraria è a sua volta il valore medio dei tre cladodi di 1 anno e 2 anni.

#### 4. Discussione e conclusione

Pimienta-Barrios *et al.* (2000), hanno riportato tassi di accumulo netto giornaliero di CO<sub>2</sub> in singoli cladodi di OFI piantati in pieno campo, in condizioni ottimali di PPF e temperatura (26/16°C) ma con bassa umidità del suolo (<10%), pari a 618 mmol m<sup>-2</sup> giorno<sup>-1</sup>; dopo un periodo di tempo di sessanta giorni con un volume di acqua nel suolo al di sotto del 5%, l'assorbimento di CO<sub>2</sub> è risultato minore del 15% ed è diventato negativo (respirazione) dopo novanta giorni.

Lavorando ancora su singoli cladodi, in condizioni ambientali controllate, Nobel e Hartsock (1984) hanno notato una completa riduzione dei tassi di accumulo di anidride carbonica dopo 50 giorni dall'inizio del periodo secco.

L'esperimento di tesi, attraverso misure in continuo di intere piante di *Opuntia ficus-indica*, ha provato che, dopo cinquantotto giorni dall'ultima irrigazione, con una percentuale di acqua nei vasi del 2% e con elevate temperature, gli scambi di CO<sub>2</sub> sono stati simili a quelli effettuati in giugno con elevate quantità di acqua disponibile e con temperature vicine ai valori di optimum

riportati in letteratura (25/15°C; Nobel, 1988; Nobel e Hartsock, 1994). In agosto i cladodi delle piante in stress hanno perso consistenza e sono diventati flaccidi (ma capaci di svolgere fotosintesi) a causa dell'insufficiente contenuto idrico che ha determinato una perdita di turgore nelle cellule dei tessuti. Tre giorni dopo l'irrigazione di soccorso, tuttavia, il turgore cellulare è stato prontamente ripristinato e il parenchima reidratato. Ad inizio agosto, la superficie dei cladodi dell'anno delle piante della tesi in asciutto era minore del 50% rispetto quella delle piante irrigate.

Nelle piante allevate in irriguo, i tassi di assorbimento giornaliero sono raddoppiati nel corso dei rilievi (giugno - agosto) mostrando una correlazione positiva con il graduale aumento delle temperature dell'aria. I tassi di accumulo istantanei maggiori sono stati misurati in agosto (Figura 15) con picchi di 11,1  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  nelle piante irrigate e di 8,4  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  in quelle non irrigate.

Sebbene, in condizioni di severo stress idrico, il parenchima dei cladodi dell'anno, di 1 anno e di 2 anni abbia subito un calo di PF rispettivamente del 100%, 67% e 54%, il peso fresco del clenchima è diminuito del 45% e del 30% nei cladodi di 1 e 2 anni ed è aumentato del 20% nei giovani cladodi, indicando un movimento d'acqua dai cladodi di 1 anno a quelli dell'anno e dalle cellule del parenchima a quelle del clenchima (Barcikowski e Nobel, 1984; Nobel, 2006; Pimienta-Barrios *et al.*, 2000). Goldstein *et al.* (1991), riportano come il movimento dell'acqua dai tessuti di riserva a quelli fotosintetici, in condizioni di carenza idrica, serva ai cladodi per rimanere performanti dal punto di vista produttivo. Nerd e Nobel (1991) hanno evidenziato come dopo quindici settimane di carenza idrica il peso fresco dei cladodi fosse diminuito del 57%, fenomeno dovuto, in larga parte, alla perdita di acqua del tessuto parenchimatico a salvaguardia di quello fotosintetico.

Mediando i dati relativi le cinque misure effettuate sugli scambi di  $\text{CO}_2$  nelle due tesi, dall'inizio di giugno alla fine agosto l'accumulo medio giornaliero è risultato di 234,3  $\text{mmol m}^{-2} \text{giorno}^{-1}$  e di 172,3  $\text{mmol m}^{-2} \text{giorno}^{-1}$  rispettivamente nelle piante irrigate e non irrigate. Pimienta-Barrios *et al.* (2000) hanno riportato valori medi in termini di accumulo giornaliero di anidride carbonica pari a 367  $\text{mmol m}^{-2}$ , calcolando una media di assorbimento annuale di 134  $\text{mmol m}^{-2}$ .

In aggiunta, considerando una superficie fogliare media di 1,26  $\text{m}^2$  nelle piante della tesi in irriguo e di 1,05  $\text{m}^2$  in quella in asciutto, l'accumulo giornaliero di carbonio nelle due tesi è risultato di circa 3,5  $\text{g C giorno}^{-1}$  e di 2  $\text{g C giorno}^{-1}$  rispettivamente. I dati non tengono in

considerazione la respirazione nelle ore del giorno che pur essendo molto ridotta influisce certamente sul bilancio totale. In ogni caso, il carbonio accumulato è stato ripartito tra la crescita dei giovani cladodi e l'accumulo di sostanza secca nei cladodi di 1 e 2 anni. Studi futuri rivolti alla ripartizione di biomassa ed al turn over dell'apparato radicale sono necessari.

Nelle piante in stress, non è stato rilevato alcun accumulo di sostanza secca nei cladodi di 1 e 2 anni; la crescita ha riguardato soltanto i giovani cladodi, in particolare i tessuti clorenchimatici. In ogni caso, severe condizioni di siccità dovrebbero favorire l'accumulo di biomassa, quando presente, nell'apparato radicale e nei cladodi con più anni, responsabili del recupero della crescita dei giovani organi una volta ristabilite condizioni favorevoli per la crescita. Le radici emesse da cladodi di 18 mesi piantati in pieno campo e in condizioni di carenza idrica, infatti, hanno incorporato una quota di carbonio maggiore del 23% rispetto quelle di cladodi della stessa età che non hanno subito alcuno stress idrico (Luo e Nobel, 1992). Questa strategia di resistenza, che consiste nell'accumulo di sostanze di riserva in organi quali tronco o radici, durante i periodi secchi, è molto comune nelle piante arboree (Da Costa e Huang, 2009; Faust, 1989). Inoltre, nel ficodindia, in periodi caratterizzati da scarsità d'acqua, il contenuto di zuccheri solubili nel parenchima dei cladodi decresce e aumenta la quota di polisaccaridi quali l'amido (Nerd e Nobel, 1991).

Pochissimi sono i dati presenti in letteratura riguardanti i potenziali di accumulo della CO<sub>2</sub> in relazione all'età dei cladodi. Samish e Ellern (1975) riportarono valori di acidità titolabile decrescenti all'aumentare dell'età dei cladodi; il contenuto medio di acidi nei cladodi di 1 anno era tre volte superiore a quello presente nei cladodi di 2 anni collocati alla base dei primi. Tuttavia, il potenziale di accumulo, in termini di contenuto di acidi o di assorbimento di carbonio, deve essere messo in relazione alla radiazione fotosintetica giornaliera assorbita e dalla posizione sulla pianta dei singoli cladodi; se così non è, le differenze misurate potrebbero essere causate da flussi fotonici giornalieri di differente intensità in cladodi con diversa esposizione. Inoltre, è stata ipotizzata la traslocazione di carbonio da cladodi di 2 anni verso quelli di 1 anno a causa dell'ingente domanda di fotoassimilati nel periodo di sviluppo e maturazione dei frutti (Inglese *et al.*, 1994; De La Barrera e Nobel, 2004). Similmente, la ripartizione di fotoassimilati tra giovani cladodi e cladodi attigui varia in relazione allo sviluppo dei primi e alle condizioni ambientali (Luo e Nobel, 1992; Pimienta-Barrios *et al.*, 2005).

I flussi notturni, misurati in sette date della stagione vegetativa, di cladodi di 1 e 2 anni localizzati nella posizione terminale di piante di 8 anni allevate in pieno campo, sono stati significativamente differenti (ad esclusione del 4 giugno) durante i rilievi nei quali sono state massime le temperature ed il PPF. Ciò nonostante, l'accumulo medio di anidride carbonica nel periodo di tempo delimitato dalle misure effettuate (maggio - settembre) è stato maggiore nei cladodi di 1 anno del 22%. Questo divario potrebbe essere ancora più grande se si considera che i cladodi di 2 anni si trovano raramente nella posizione terminale di una pianta adulta e che quindi la quantità di PAR assorbita è spesso minore nei cladodi subterminali (Nobel, 1988).

## **CONCLUSIONI GENERALI SUGLI ESPERIMENTI CONDOTTI**

Lo studio di tesi ha voluto analizzare tre aspetti ancora poco approfonditi riguardanti la fisiologia e la coltivazione del ficodindia. Sebbene diversi ricercatori si siano interessati allo studio di questa coltura, le ricerche condotte fino ad oggi sono state incentrate su aspetti riguardanti la morfologia, la fisiologia e la biologia ambientale, in particolare i meccanismi metabolici in relazione a specifici parametri ambientali come ad esempio alte temperature oppure limitate disponibilità di acqua e nutrienti. Forse perchè si tratta di una coltura di elevato interesse per quanto riguarda l'uso di terreni in aree marginali, con ridotte disponibilità idriche, o addirittura povere, lo studio di aspetti colturali quali nuove tecniche di gestione di impianti, individuazione di fabbisogni irrigui o produzione di frutti di qualità, ovvero tematiche di rilevanza agronomica, è stato solo parzialmente affrontato. Eppure da diversi anni e in diversi paesi, la coltura del ficodindia viene tenuta in buona considerazione quale fonte di alimentazione umana (i frutti contengono elementi essenziali quali zuccheri, calcio, fosforo, potassio e vitamina C) e animale (foraggio) a tal punto che nel 1994 la FAO ha istituito una rete internazionale di cooperazione tecnico-scientifica chiamata CactusNet con lo scopo di diffonderne e facilitarne l'innovazione e la conoscenza. Inoltre negli ultimi anni gli usi medici e cosmetici di alcuni prodotti naturali estratti dai cladodi e dai frutti hanno apportato un valore aggiunto alla coltura di notevole interesse commerciale.

La conoscenza di come la sostanza organica prodotta venga ripartita tra i vari organi della pianta è di fondamentale importanza se si vuole implementarne l'accumulo verso determinate parti piuttosto che verso altre. Il primo esperimento di tesi ha, quindi, evidenziato come l'elevata produttività delle piante in termini di nuova vegetazione annualmente formata (circa il 50% della sostanza secca annuale è investita nella nuova vegetazione) e la bassa fertilità media dei cladodi, associata ad un alto indice di area fogliare, suggerisca un'operazione di rinnovamento della vegetazione delle piante (capitozzatura) favorendo l'emissione di nuovi germogli, con lo scopo di abbassare l'incidenza percentuale (in termini di peso o superficie) di parti improduttive (tronco e scaffold) a favore di giovani cladodi. Le piante, o l'impianto possono ritenersi efficienti, in termini di produttività primaria netta, considerato che i valori di biomassa prodotta sono del tutto simili a quelli ottenuti in altre specie frutticole per impianti commerciali. E' sempre difficile, comparare i dati assoluti di produzione primaria netta all'interno della stessa



specie o tra specie diverse, perchè tranne pochi casi quasi mai si riesce a comparare dati di condizioni colturali e ambientali coerenti. In OFI ad esempio il dato più alto riportato in letteratura,  $50 \text{ t ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$ , fa riferimento ad un impianto sperimentale, di nessun interesse commerciale. Produttività di  $13$  e  $27 \text{ t ha}^{-1}$  di sostanza secca si sono ottenute rispettivamente con densità d'impianto pari a  $250000$  e  $10000$  piante  $\text{ha}^{-1}$  di  $2$  e  $5$  anni di età (Acevedo *et al.*, 1983; García de Cortazar e Nobel, 1992). I dati di questa tesi con una densità di impianto di oltre  $700$  volte inferiore rispetto a quella teorica realizzata da Nobel, indicano una produttività netta della componente epigea pari a circa il  $25\%$  di quella teorica potenziale. Se questo dato viene poi posto in riferimento alla quantità di input, ancora una volta si evidenzia la capacità della specie di produrre notevoli quantità di biomassa senza ricorrere a somministrazioni elevate di acqua e concimi. Dal punto di vista agronomico, se si fa riferimento, invece, all'efficienza produttiva delle piante e dell'impianto, rimane aperta la questione di come incrementare la produttività ad ettaro di OFI. I nostri dati evidenziano una fertilità unitaria dei cladodi di  $1$  anno, quelli potenzialmente fertili, molto ridotta, pari a  $2$  frutti per cladodio fertile. Nonostante questo, l'HI è paragonabile a quello raggiunto in pesco (Caruso *et al.*, 1999) e in melo (Forshey e McKee, 1970) a livelli di fertilità ottimali. L'elevata produttività raggiunta è quindi funzione del numero molto alto di cladodi fertili, che potenzialmente, avrebbero potuto dare una produzione fino a tre volte superiore senza che questo si traducesse in una riduzione significativa del peso medio dei frutti. Immaginando infatti una fertilità dei cladodi di  $1$  anno pari a cinque frutti, si arriverebbe ad un H.I. teorico del  $50\%$ . Le ragioni di questa ridotta fertilità sono probabilmente legate alle diverse condizioni di luce nelle quali i cladodi si sono sviluppati. Il LAI d'impianto è, in effetti, del tutto simile a quello indicato come ottimale da Nobel, per la produzione di biomassa e non di frutti. Un LAI pari a  $4$  è infatti quello al quale si ottengono  $50 \text{ t ha}^{-1}$  di sostanza secca con  $250000$  piante.

Un parametro importante, specialmente quando si parla di metabolismo CAM, è l'efficienza d'uso dell'acqua (WUE), esprimibile anche come tasso di traspirazione (TR). Il ficodindia, in particolare, si caratterizza per una elevata WUE. Nel 2009 due esperimenti di tesi sono stati parallelamente condotti. Sono stati quindi calcolati sia la produzione totale in termini di sostanza secca ( $12,9 \text{ t ha}^{-1}$ ) che l' $\text{ET}_c$  nello stesso sito sperimentale. La traspirazione delle piante è stata calcolata sottraendo all' $\text{ET}_c$  totale di sistema ( $290,3 \text{ mm}$ ) la quota di acqua evaporata dal suolo ( $75,5 \text{ mm}$ ) durante lo stesso periodo. Il TR delle piante è risultato di  $166,5 \text{ Kg H}_2\text{O Kg}^{-1} \text{ s.s.}$  Il

TR delle piante, considerando anche l'evaporazione dell'acqua dal suolo è invece risultato di 225 Kg H<sub>2</sub>O Kg<sup>-1</sup> s.s. Black (1973) riporta valori TR di 50 - 125 Kg H<sub>2</sub>O Kg<sup>-1</sup> s.s. nelle specie CAM, 250 – 350 Kg H<sub>2</sub>O Kg<sup>-1</sup> s.s. nelle piante C<sub>4</sub> e 450 – 950 Kg H<sub>2</sub>O Kg<sup>-1</sup> s.s. nelle C<sub>3</sub>. Han e Felker (2005) in un impianto sperimentale di *Opuntia ellisiana* di 4 anni con LAI di 3,88 hanno riportato valori di TR pari a 162 Kg H<sub>2</sub>O Kg<sup>-1</sup> s.s., in linea con i valori del presente studio. Neales *et al.* (1968), hanno misurato per l'*Aeonium hawarthii* un TR di 154 mg H<sub>2</sub>O mg<sup>-1</sup> CO<sub>2</sub>. Le misure di scambio di anidride carbonica effettuate in continuo in relazione allo stato idrico hanno evidenziato come piante intere siano capaci di sopportare prolungati periodi di siccità, e come dopo due mesi di sostanziale carenza idrica ed elevate temperature e PAR, l'accumulo di carbonio si sia mantenuto sui livelli misurati in giugno, con quantitativi di acqua disponibile prossimi alla capacità di campo. Questa risposta può apparire sorprendente e in buona parte lo è, se si considerano i dati fin qui disponibili e fondamentalmente riferibili a singoli cladodi allevati in ambiente controllato, per i quali poche interazioni sussistevano tra organi della stessa pianta, essendo le piante estremamente semplificate (1 – 3 cladodi). Nel nostro caso, la risposta complessiva della pianta indica come al di là della capacità dei singoli cladodi di mantenere il più elevato possibile il turgore del tessuto fotosintetico, il clorenchima, sono probabilmente i cladodi più maturi quelli capaci di garantire la stabilità assimilativa della pianta nel suo complesso. Nel corso dell'esperimento, infatti, le piante irrigate raddoppiano la loro capacità assimilativa a fronte di una superficie fotosintetica dei cladodi dell'anno più elevata del 35% rispetto a quella raggiunta nelle piante in asciutto. Le differenze in termini di incidenza dei cladodi dell'anno sulla superficie fotosintetica complessiva della pianta sono limitate: 24% nelle piante in asciutto e 32% nelle piante in irriguo, e da sola non basta a giustificare la maggiore produttività delle piante in asciutto che è legata anche all'aumento del tasso fotosintetico complessivo. Ulteriori osservazioni sono comunque necessarie per chiarire se e come i cladodi di diversa età rispondano diversamente allo stress idrico modulando la loro attività fotosintetica. Differenze in termini di potenziale di assorbimento della CO<sub>2</sub> tra cladodi di 1 e 2 anni hanno sottolineato come queste, nella maggior parte dei casi, siano evidenti con flussi radiativi e di calore sensibile di elevata intensità. Tuttavia non è ancora chiaro quale sia, all'interno della pianta, il contributo effettivo dei cladodi di 3, 4 e 5 anni nell'accumulo del carbonio atmosferico e se da essi avvenga una traslocazione di fotosintetati verso *sinks* quali frutti, nuova vegetazione o radici oppure se i cladodi stessi diventino dei *sinks* in periodi dell'anno nei quali l'attività

vegetativa è minore. Tutti questi aspetti, nel loro complesso, indicano la necessità di mantenere un equilibrio costante tra nuova e vecchia vegetazione e di garantire un'adeguata distribuzione della luce all'interno della pianta.

## BIBLIOGRAFIA

- Acevedo, E., Badilla, I., Nobel, P.S., 1983. Water Relations, Diurnal Acidity Changes, and Productivity of a Cultivated Cactus, *Opuntia ficus-indica*. *Plant Physiology* 72, 755-780.
- Adams, R.S., Black, T.A., Fleming, R.L., 1991. Evapotranspiration and surface conductance in a high elevation, grass-covered forest clearcut. – *Agricultural Forest Meteorology* 56, 173-193.
- Allen, R.G., Walter, I.A., Elliott, R.L., Howell, T.A., Itenfisu, D., Jensen, M.E., Snyder, R.L., 2005. The ASCE Standardized Reference Evapotranspiration Equation. American Society of Civil Engineers, pp. 192.
- Alterio, G., Giorio, P., Sorrentino, G., 2006. Open-System Chamber for Measurements of Gas Exchanges at Plant Level. *Environmental Science & Technology* 40, 1950-1955.
- Alterio, G., Giorio, P., Sorrentino, G., 2007. Set-Up, Calibration and Testing of an Automated Chamber System for Gas Exchanges Measurement of Field-Grown Whole-Grapevine (*Vitis×Vinifera* ‘Aglianico’). *Acta Horticulturae* 754, 249-256.
- Andrade, J.L., Cervera, J.C., Graham, E.A., 2009. Microenvironments, water relations, and productivity of CAM plants. In: *Perspectives in Biophysical Plant Ecophysiology: A Tribute to Park S. Nobel* (Eds E. De la Barrera e W. Smith), pp. 95-120.
- Baldocchi, D.D., 1994. A comparison study of mass and energy exchange over a close (wheat) and an open (corn) canopy: I. The partitioning of available energy into latent and sensible heat exchange. *Agricultural Forest Meteorology* 67, 191–200.
- Barbera, G., 1984. Ricerche sull’irrigazione del Ficodindia. *Frutticoltura* 46, 49-55.
- Barbera, G., Carimi, F., Inglese, P., Panno, M., 1992. Physical, morphological and chemical changes during fruit development and ripening in three cultivars of prickly pear, *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller. *Journal of Horticultural Science* 67 (3), 307-312.
- Barbera, G., Inglese, P., Pimienta-Barrios, E., 1995. Agroecology, cultivation and uses of cactus pear. *FAO Plant Production and Protection Paper* 132, Roma, IT, pp. 216.

- Barcikowsky, W., Nobel, P.S., 1984. Water relations of cacti during desiccation: distribution of water in tissues. *Botanical Gazette* 145, 110-145.
- Black, C.C., 1973. Photosynthetic carbon fixation in relation to net CO<sub>2</sub> uptake. *Annual Review of Plant Physiology* 24, 253–282.
- Black, C.C., Osmond, C. B., 2003. Crassulacean acid metabolism photosynthesis: ‘working the night shift’, *Photosynthesis Research* 76, 329–341.
- Blum, A., 2005. Drought resistance, water-use efficiency, and yield potential - are they compatible, dissonant, or mutually exclusive? *Australian Journal of Agricultural Research* 56, 1159–1168.
- Brandon, P.C., 1967. Temperature features of enzymes affecting crassulacean acid metabolism. *Plant Physiology* 42, 977-984.
- Buchanan-Bollig, I.C., Kluge, M., Müller, D., 1984. Kinetic changes with temperature of phosphoenolpyruvate carboxylase from a CAM plant. *Plant, Cell and Environment* 7, 63-70.
- Businger, J.A., 1988. A note on the Businger-Dyer profiles. *Boundary-Layer Meteorology* 42, 145-151.
- Cannon, W.A., 1911. *The Root Habits of Desert Plants*. Publication 131, Carnegie Institution of Washington, Washington, D.C., pp. 96.
- Caruso, T., Inglese, P., Giovannini, D., Turci, E., 1995. Rootstock influence on dry matter and minerals above-ground content and partitioning in 'Maravilha' peach trees. *Acta Horticulturae* 383, 105–114.
- Caruso, T., Giovannini, D., Marra, F.P., Sottile, F., 1997. Two new planting systems for early ripening peaches (*Prunus persica* L. Batsch): yield and fruit quality in four low chill cultivars, *Journal of the American Society for Horticultural Science* 72, 873–883.
- Caruso, T., Inglese, P., Sottile, F., Marra, F.P., 1999. Effect of Planting System on Productivity, Dry-matter Partitioning and Carbohydrate Content in Above-ground Components of

- 'Flordaprince' Peach Trees. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 124 (1), 39-45.
- Chalmers, D.J., Van den Ende, B., 1975. Productivity of peach trees: factors affecting dry weight distribution during tree growth. *Annals of Botany* 39, 423-432.
- Chalmers, D.J., Mitchell, P.D., van Heek, L., 1981. Control of peach tree growth and productivity by regulated water supply, tree density, and summer pruning. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 106, 307-312.
- Chen, W., Novak, M.D., Black, T.A., Lee, X., 1997. Coherent eddies and temperature structure functions for three contrasting surfaces. Part I: Ramp model with finite micro-front time. *Boundary-Layer Meteorology* 84, 99-123.
- Conde, L.F., 1975. Anatomical comparison of five species of *Opuntia* (Cactaceae). *Annals of the Missouri Botanical Garden* 62, 425-473.
- Corelli Grappadelli, L., Magnanini, E., 1993. A whole-tree system for gas-exchanges studies. *American Society for Horticultural Science* 28 (1), 41-45.
- Corelli Grappadelli, L., Magnanini, E., 1997. Whole-tree gas exchanges: can we do it cheaper? *Acta Horticulturae* 451, 279-285.
- Cui, M., Miller, P.M., Nobel, P.S., 1993. CO<sub>2</sub> Exchange and Growth of the Crassulacean Acid Metabolism Plant *Opuntia ficus-indica* under Elevated CO<sub>2</sub>, in Open-Top Chambers. *Plant Physiology* 103, 519-524.
- Da Costa, M., Huang, B., 2009. Physiological adaptations of perennial grasses to drought stress. In: *Perspectives in Biophysical Plant Ecophysiology: A Tribute to Park S. Nobel* (Eds E. De la Barrera e W. Smith), pp. 169-190.
- De La Barrera, E., Nobel, P.S., 2004. Carbon and water relations for developing fruits of *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller, including effects of drought and giberellic acid. *Journal of Experimental Botany* 55, 719-729.

- De La Barrera, E., Smith, W.K., 2009. Perspectives in Biophysical Plant Ecophysiology. Universidad Nacional Autónoma de México, pp 400.
- Downes, R.W., 1969. Differences in transpiration rates between tropical and temperate grasses under controlled conditions. *Planta* 88, 261-273.
- Dwyer, D.D., De Garmo, H.C., 1970. Greenhouse productivity and water-use efficiency of selected desert shrubs and grasses under four soil-moisture levels. New Mexico State Univer. Agric. Exp. Sta. Bull. 570, pp. 15.
- Faust, M., 1989. Physiology of temperate zone fruit trees. John Wiley & Sons, Inc., pp. 338.
- Felker, P., Inglese, P., 2002. Short-Term and Long-Term Research Needs for *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. Utilization in Arid Areas. *Journal of the Professional Association for Cactus Development* 5, 131-152.
- Forshey, C.G., Weires, R.W., Stanley, B.H., Seem, R.C., 1983. Dry Weight Partitioning of 'McIntosh' Apple Trees. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 108 (1), 149-154.
- Francesconi, A.H.D., Lakso, A.N., Denning, S.S., 1997. Light and temperature effects on whole-canopy net carbon dioxide exchange rates of apple trees. *Acta Horticulturae* 451, 287-294.
- Fuchs, M., Tanner, C.B., 1967. Evaporation from drying soil. *Journal of Applied Meteorology* 6, 852-857.
- García de Cortazar, V., Acevedo, E., Nobel, P.S., 1985. Modeling of PAR interception and productivity by *Opuntia ficus-indica*. *Agricultural and Forest Meteorology* 34, 145-162.
- García de Cortazar, V., Nobel, P.S., 1986. Modeling of PAR interception and productivity of a prickly pear cactus, *Opuntia ficus-indica*, at various spacings. *Agronomy Journal* 78, 80-85.
- García de Cortazar, V., Nobel, P.S., 1990. Worldwide environmental productivity indices and yield predictions for a CAM plant, *Opuntia ficus-indica*, including effects of doubled CO<sub>2</sub> levels. *Agricultural and Forest Meteorology* 10, 261-278.

- García de Cortazar, V., Nobel, P.S., 1992. Biomass and Fruit Production for the Prickly Pear Cactus, *Opuntia ficus-indica*. Journal of the American Society for Horticultural Science 117 (4), 558-562.
- Garrat, J.R., Hicks, B.B., 1973. Momentum, heat and water vapour transfer to and from natural and artificial surfaces. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 19, 680-687.
- Gifford, R.M., Evans, L.T., 1981. Photosynthesis, carbon partitioning and yield. Annual Reviews of Plant Physiology 32, 485-509.
- Giuliani, R., Nerozzi, F., Magnanini, E., Corelli-Grappadelli, L., 1997. Influence of environmental and plant factors on canopy photosynthesis and transpiration of apple trees. Tree Physiology 17, 637-645.
- Goldstein, G., Ortega, J.K.E., Nerd, A., Nobel, P.S., 1991. Diel Patterns of Water Potential Components for the Crassulacean Acid Metabolism Plant *Opuntia ficus-indica* when Well-Watered or Droughted. Plant Physiology 95, 274-280.
- Goodwin, I., Jerie, P.H., Boland, A.M., 1998. Water saving techniques for orchards in Northern China. In: Water is Gold, Irrigation Association of Australia 1998 National Conference and Exhibition, Brisbane, 19-21 May 1998. Brisbane, Australia, Department of Natural Resources.
- Gregory, F.G., Spear, I., Thimann, K.V., 1954. The Interrelation Between CO<sub>2</sub> Metabolism and Photoperiodism in *Kalanchoe*. Plant Physiology 29 (3), 220-229.
- Griffiths, H, Ong, B.L., Avadhani, P.N., Goh, C.J., 1989. Recycling of respiratory CO<sub>2</sub> during Crassulacean acid metabolism: alleviation of photoinhibition in *Pyrrhosia piloselloides*. Planta 179, 115-122.
- Gucci, R., 2006. Implications of water relations on irrigation management of olive trees [*Olea europaea* L.]. Italus Hortus 13 (1), 61-70.
- Gugliuzza, G., Inglese, P., Farina, V., 2002. Relationship between fruit thinning and irrigation on determining fruit quality of cactus pear fruits. Acta Horticulturae 581, 221-225.



- Guralnick, L.J., Ting, I.P., Lord, E.M., 1986. Crassulacean acid metabolism in the Gesneriaceae. *American Journal of Botany* 53, 336-345.
- Hamdy, A., Ragab, R., Scarascia-Mugnozza, E., 2003. Coping with water scarcity: water saving and increasing water productivity. *Irrigation and Drainage* 52, 3–20.
- Han, H., Felker, P., 1997. Field validation of water-use efficiency of the CAM plant *Opuntia ellisiana* in south Texas. *Journal of Arid Environments* 36, 133–148.
- Higbie, R., 1935. The rate of absorption of a pure gas into a still liquid during short periods of exposure. *Transactions of the American Institute of Chemical Engineers* 31, 355-388.
- Ilgin, M., Caglar, S., 2009. Comparison of leaf stomatal features in some local and foreign apricot (*Prunus armeniaca* L.) genotypes. *African Journal of Biotechnology* 8 (6), 1074–1077.
- Inglese, P., Israel, A.A., Nobel, P.S., 1994. Growth and CO<sub>2</sub> uptake for cladodes and fruit of the Crassulacean acid metabolism species *Opuntia ficus-indica* during fruit development. *Physiologia Plantarum* 91, 708-714.
- Inglese, P., Barbera, G., La Mantia, T., 1995. Research strategies for the improvement of cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) fruit quality and production. *Journal of Arid Environments* 29, 455-468.
- Inglese, P., De Salvador, R., 1996. Gestione dell'albero e qualità dei frutti nel pesco: aspetti fisiologici e tecnici. *Frutticoltura* 4, 65-72.
- Inglese, P., Barbera, G., La Mantia, T., 1999. Seasonal Reproductive and Vegetative Growth Patterns and Resource Allocation during Cactus Pear Fruit Growth. *Journal of The American Society for Horticultural Science* 34 (1), 69-72.
- Inglese, P., Basile, F., Schirra, M., 2002. Cactus pear fruit production. In: P.S. Nobel (ed.), *Cacti: biology and uses*. University of California, Berkeley, California, Usa, pp. 163-183.
- Inglese, P., Costanza, P., Inglese, G., Liguori, G., 2010. Influence of within-tree and environmental factors on fruit quality of cactus Pear (*O. ficus-Indica*). *Fruits* 65 (3), 179-189.

- Jarvis, P.G., McNaughton, K.G., 1986. Stomatal control of transpiration: Scaling up from leaf to region. *Advances in Ecological Research* 15, 1-49.
- Joshi, M.C., Boyer, J.S., Kramer, P.J., 1965. Growth, carbon dioxide exchange, transpiration and transpiration ratio of pineapple. *Botanical Gazette* 126, 174–179.
- Kaimal, J.C., Finnigan, J.J., 1994. *Atmospheric Boundary Layer Flows. Their Structure and Measurement*. Oxford University Press, pp. 302.
- Kausch, W., 1965. Beziehungen zwischen Wurzelwachstum, Transpiration und CO<sub>2</sub>-Gaswechsel bei einigen Kakteen. *Planta* 66, 229–238.
- Le Houèrou, H.N., 2000. Cacti (*Opuntia* spp.) as a fodder crop for marginal lands in the mediterranean basin. *Acta Horticulturae* 581, 21-46.
- Liguori, G., Gugliuzza, G., Inglese, P., 2009. Evaluating carbon fluxes in orange orchards in relation to planting density. *Journal of Agricultural Science* 147, 637-645.
- Lötter, J. DeV., Beukes, D.J., Weber, H.W., 1985. Growth and quality of apples as affected by different irrigation treatments. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 60, 181-192.
- Luo, Y., Nobel, P.S., 1992. Carbohydrate partitioning and compartmental analysis for a highly productive CAM plant, *Opuntia ficus-indica*. *Annals of Botany* 70, 551-559.
- Lüttge, U., 2004. Ecophysiology of Crassulacean Acid Metabolism (CAM). *Annals of Botany* 93, 629-652.
- Mattii, G., Orlandini, S., 2005. Whole-plant gas-exchange measurements in grapevine to estimate water-use efficiency. In: "Integrated soil and water management for orchard development", *FAO Land and Water Bulletin* 10, 113-118.
- Miller, A.N., Walsh, C.S., 1988. Growth and seasonal partitioning of dry matter in eight-year-old 'Loring' peach trees. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 113, 309–314.

- Miller, D.P., Howell, G.S., Flore, J.A., 1996. A Whole-plant, Open, Gas-exchange System for Measuring Net Photosynthesis of Potted Woody Plants. *American Society for Horticultural Science* 31 (6), 944–946.
- Mondragòn-Jacobo, C., Pèrez-González, S., 2001. Cactus (*Opuntia* spp.) as forage. Ed. Mondragòn-Jacobo, C., Pèrez-González, S. FAO Plant Production and Protection Paper 169, pp. 148.
- Monteith, J.L., 1965. Evaporation and environment. In: Fogg, G.E. (Ed.), *The State and Movement of Water in Living Organism*. Proceedings of the XIX Symposium of the Society for Experimental Biology. Cambridge University Press, pp. 205–234.
- Moriana, A., Orgaz, F., Pastor, M., Fereres, E., 2003. Yield responses of mature olive orchard to water deficits. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 123, 425-431.
- Mpelasoka, B.S., Behboudian, M.H., Green, S.R., 2001. Water use, yield and fruit quality of lysimeter-grown apple trees, responses to deficit irrigation and to crop load. *Irrigation Science* 20, 107-113.
- Neales, T.F., Patterson, A.A., Hartney, V.J., 1968. Physiological adaptation to drought in the carbon assimilation and water loss of xerophytes. *Nature* 219, 469–478.
- Nerd, A., Karady, A., Mizrahi, Y., 1989. Irrigation, fertilization and polyethylene covers influence bud development in prickly pear. *Horticultural Science* 24, 773-775.
- Nerd, A., Nobel, P.S., 1991. Effects of drought on water relations and nonstructural carbohydrates in cladodes of *Opuntia ficus-indica*. *Physiologia Plantarum* 81, 495-500.
- Nishida, K., 1963. Studies on the re-assimilation of respiratory CO<sub>2</sub> in illuminated leaves. *Plant and Cell Physiology* 3, 111–124.
- Nobel, P.S., 1977. Water relations and photosynthesis of a barrel cactus, *Ferocactus acanthodes*, in the Colorado Desert. *Oecologia* 27, 117–133.
- Nobel, P.S., 1988. *Environmental Biology of Agaves and Cacti*. Cambridge University Press, Cambridge New York, USA, pp. 270.

- Nobel, P.S., 1991. Achievable productivities of certain CAM plants: basis for high values compared with C<sub>3</sub> and C<sub>4</sub> plants. *New Phytologist* 119, 183–205.
- Nobel, P.S., 1992. High annual productivity of certain agaves and cacti under cultivation. *Plant, Cell and Environment* 15, 329–335.
- Nobel, P.S., 2002. Cactus pear physiological ecology, emphasizing gas exchange of *Platyopuntia* fruit. *Acta Horticulturae* 581, 145-150.
- Nobel, P.S., 2006. Parenchyma-chlorenchyma water movement during drought for the hemiepiphytic cactus *Hylocereus undatus*. *Annals of Botany* 97, 469-474.
- Nobel, P.S., 2009. *Desert Wisdom of Agaves and Cacti: CO<sub>2</sub>, Water, Climate Change*. iUniverse, Inc. New York Bloomington, pp, 182.
- Nobel, P.S., Hartsock T.L., 1983. Relationships between Photosynthetically Active Radiation, Nocturnal Acid Accumulation, and CO<sub>2</sub> Uptake for a Crassulacean Acid Metabolism Plant, *Opuntia ficus-indica*. *Plant Physiology* 71, 71-75.
- Nobel, P.S., Hartsock, T.L., 1984. Physiological responses of *Opuntia ficus-indica* to growth temperature. *Physiologia Plantarum* 60, 98-105.
- Nobel, P.S., García de Cortazar, V., 1991. Growth and predicted productivity of *Opuntia ficus-indica* for current and elevated carbon dioxide. *Agronomy Journal* 83, 224-230.
- Nobel, P. S., Israel, A. A., 1994. Cladode development, environmental responses of CO<sub>2</sub> uptake, and productivity for *Opuntia ficus-indica* under elevated CO<sub>2</sub>. *Journal of Experimental Botany* 45, 295-303.
- Nobel, P.S., Bobich, E., 2002. Initial net CO<sub>2</sub> uptake responses and root growth for a CAM community placed in a closed environment. *Annals of Botany* 90, 593–598.
- Osmond, C.B., 1978. Crassulacean acid metabolism: a curiosity in context. *Annual Review of Plant Physiology* 29, 379–414.
- Paulson, C.A., 1970. The mathematical representation of wind speed and temperature profile in the unstable surface layer. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 9, 857-861.

- Paw U, K.T., Qui, J., Su, H.B., Watanabe, T., Brunet, Y., 1995. Surface renewal analysis: a new method to obtain scalar fluxes without velocity data. *Agricultural Forest Meteorology* 74, 119-137.
- Pimienta-Barrios, E., M. Loera, Q., Lopez, A., 1992. Estudio anatómico comparativo en morfoespecies del subgénero *Opuntia*. In: Actas III Congreso Internacional de Tuna y Cochinilla, Santiago de Chile, pp. 30-39.
- Pimienta-Barrios, E., Zañudo-Hernández, J., Yopez, E., Pimienta-Barrios, E., Nobel, P.S., 2000. Seasonal variation of net CO<sub>2</sub> uptake for cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) and pitayo (*Stenocereus queretaroensis*) in a semi-arid environment. *Journal of Arid Environments* 44, 73–83.
- Pimienta-Barrios, E., Zañudo-Hernández, J., Nobel, P.S., 2005. Effects of young cladodes on the gas exchange of basal cladodes of *Opuntia ficus-indica* (Cactaceae) under wet and dry conditions. *International Journal of Plant Sciences* 166 (6), 961-968.
- Reñasco, G., 1976. Cultivo de Tunales. Boletín divulgativo 44. Servicio Agrícola y Ganadero, Santiago, pp. 35.
- Richards, H. M., 1915. Acidity and gas exchange in cacti. Washington: Carnegie Institution Publication N° 209.
- Sàenz, C., 2006. Utilizaciòn agroindustrial del nopal. Ed. Rosel, C. Boletín de Servicios Agrícolas de la FAO 162, pp. 165.
- Salisbury, F.B., Ross, C.W., 1985. Plant physiology. Third edition. Wadsworth Publishing Co., Belmont, California, pp. 540.
- Samish, Y.B., Ellern, S.J., 1975. Titratable Acids in *Opuntia ficus-indica* L. *Journal of Range Management* 28 (5), 365-369.
- San José, J.J., Montes, R., Nikonova, N., 2007. Diurnal patterns of carbon dioxide, water vapour and energy fluxes in pineapple [*Ananas comosus* (L.) Merr. Cv. Red Spanish] field using eddy covariance. *Photosynthetica* 45 (3), 370-384.

- Sipes, D.L., Ting, I.P., 1985. Crassulacean acid metabolism and crassulacean acid metabolism modifications in *Peperomia camptotricha*. *Plant Physiology* 77, 59-63.
- Slack, E.M., 1974. Studies of stomatal distribution on the leaves of four apple varieties. *Journal of Horticultural Science* 49, 95-103.
- Soil Conservation Service. 1982. Procedures for collecting soil samples and methods of analysis for soil survey. Soil survey investigation report 1, Washington, DC.
- Spear, I., Thimann, K.V., 1954. The Interrelation Between CO<sub>2</sub> Metabolism and Photoperiodism in *Kalanchoe*. II. Effect of Prolonged Darkness and High Temperatures. *Plant Physiology* 29 (5), 414-417.
- Stewart, B.A., Steiner, J.L., 1990. Water-Use Efficiency. In: *Dryland Agriculture: Strategies for Sustainability*. Advances in Soil Science, Volume 13. Springer-Verlag New York, Inc., New York, pp. 151-173.
- Sugita, M., Brutsaert, W., 1990. Regional surface fluxes from remote sensed surface skin temperature and lower boundary layer measurements. *Water Resources Research* 26, 2937-2944.
- Szarek, S.R., Johnson, H.B., Ting, I.P., 1973. Drought adaptation in *Opuntia basilaris*. Significance of recycling carbon through Crassulacean Acid Metabolism. *Plant Physiology* 52, 539-541.
- Teare, I.D., Kanemasu, E.T., Powers, W.L., Jacobs, H.S., 1973. Water-use efficiency and its relation to crop canopy area, stomatal regulation and root distribution. *Agronomy Journal* 65, 207-211.
- Ting, I.P., 1985. Crassulacean acid metabolism. *American Review of Plant Physiology* 36, 595-622.
- Tognetti, R., D'Andria, R., Sacchi, R., Lavini, A., Morelli, G., Alvino, A., 2007. Deficit irrigation affects seasonal changes in leaf physiology and oil quality of *Olea europaea* (cultivars Frantoio and Leccino). *Annals of Applied Biology* 150 (2), 169-186.

- Van Atta, C.W., 1977. Effect of coherent structures on structure functions of temperature in the atmospheric boundary layer. *Archives of Mechanics* 29, 161-171.
- Van Der Merwe, L.L., Wessels, A.B., Ferreira, D.I., 1997. Supplementary irrigation for spineless Cactus Pear. *Proceedings of the III International Congress on Cactus Pear and Cochenille. Acta Horticulturae* 438, 77-82.
- Verma, S.B., 1989. Aerodynamic resistance to transfer of heat, mass and momentum. In: Black, T.A., Spittlehouse, D.L., Novak, M.D. and Price, D.T.. (Eds.), *Estimation of Areal Evapotranspiration. International Association of Hydrological Science, Wallingford*, pp. 13-20.
- Wareing, P.F., Patrick, J., 1975. Source-sink relations and the partition of assimilate. In: J.P. Cooper (ed.). *Photosynthesis and productivity in different environments. Cambridge University Press, Cambridge, U.K.*, pp. 481-499
- White, J.D., Gutzwiller K.J., Barrowb, W.C., Randallb, L.J., Swinta, P., 2008. Modeling mechanisms of vegetation change due to fire in a semi-arid ecosystem. *Ecological Engineering* 214, 181-200.
- Winter, K., 1985. Crassulacean acid metabolism. In: Barber J, Baker NR, eds. *Photosynthetic mechanisms and the environment. Amsterdam: Elsevier*, pp. 329-387.
- Wolf, J., 1960. Der diurnale Säurerhythmus. In: *Encyclopedia of plant physiology vol 12. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag*, pp. 809-889.

## **Curriculum del dottorando**

### ***Attività formativa all'estero***

Dal 27 giugno al 12 dicembre 2010 presso il Dept. of Land, Air and Water Resources di University of California - Davis, collaborando con il Dott. Richard L. Snyder, Specialista di Biometeorologia.

### ***Seminari e corsi seguiti***

- 27 gennaio 2009: "Modalità di commercio a valenza sociale, etica e ambientale " (Dott. Luca Falasconi - Università degli Studi di Bologna);
- 29 maggio 2009: "Genetic Diversity of Tunisian Olive Tree (*Olea europaea* L.) and Oil" (Dr. Sofiane Abdelhamid - Institut de l'Olivier Unit Tecnology and Quality, Sfax – Tunisia).
- 5 - 9 ottobre 2009: International Course on Trends in Measurements and Estimation of Crop Water Requirements organizzato dalla Società Italiana di Ortoflorofrutticoltura e tenutosi nel Dipartimento di Ingegneria Agraria della Facoltà di Agraria dell'Università degli Studi di Catania.
- 28 maggio 2010: Giornata di studio con tema "L'apparato radicale delle piante arboree ", con seminari su "Morfologia e fisiologia delle radici delle piante arboree" (Dott. Moreno Toselli - Dipartimento di Colture Arboree, Università degli Studi di Bologna) e "Impiego dei minirizotroni nello studio delle radici delle piante arboree " (Dott.ssa Elena Baldi - Dipartimento di Colture Arboree, Università degli Studi di Bologna).
- 7 - 9 giugno 2011: convegno AIAM 2011 (Associazione Italiana di Agro Meteorologia) tenutosi presso la Facoltà di Agraria dell'Università degli Studi di Bologna;
- 27 settembre 2011: "Tree fruits, nut crops and grapes at the National Clonal Germplasm Repository Davis, California" (Prof. John E. Preece - USDA-ARS National Clonal Germplasm Repository, Davis, CA.);
- 21 novembre 2011: "Environmental Stress and Functional Ecology: from cells to ecosystems" (Prof.ssa Cristina Maria Filipe Máguas da Silva - Departamento de Biologia Vegetal, Università di Lisbona).

### ***Pubblicazioni relative alla ricerca svolta***

Inglese, P., Costanza, P., Inglese, G., Liguori, G., 2010. Influence of within-tree and environmental factors on fruit quality of cactus Pear (*O. ficus-Indica*). *Fruits* 65(3), 179-189.



Inglese, P., Inglese, G., Liguori, G., 2011. Fruit productivity and carbon gain of *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. Trees. Israel Journal of Plant Sciences. Accepted, In Press.

Inglese, P., Inglese, G., Liguori, G., 2012. CO<sub>2</sub> uptake of Cactus Pear whole trees and single cladodes, in relation to plant water status and cladode age. Plant Science. Submitted.

Consoli, S., Inglese, P., Inglese, G., 2012. Determination of Evapotranspiration and Annual Biomass Productivity of a Cactus Pear (*Opuntia ficus-indica* L. (Mill.) Orchard in a Semi-arid Environment. Agricultural Water Management. Submitted.

### ***Altre pubblicazioni***

Sortino, G., Inglese, G., Famiani, F., Inglese, P., 2011. Come massimizzare la qualità dell'olio di Cerasuola. Informatore Agrario 48, 50-54.